

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة جيلالي بونعاما

Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre

Département de **Sciences de la Terre**



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme de **Master** en

Domaine: Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géologie appliquée

Spécialité: Hydrogéologie

***Prédiction de l'aptitude des eaux souterraine à
l'irrigation à l'aide de modèle de réseau
neuronal (ANNs), plaine de Khemis Miliana***

Présenté par :

- *Laidoudi Fatima el Zahra*
- *Bouniati Soumia*

Devant le jury :

M. Bouderbala A	MCA	Président	(U.D.B Khemis Miliana)
M. Gharbi B	MCB	Promoteur	(U.D.B Khemis Miliana)
M. Hennia K	MAA	Examineur	(U.D.B Khemis Miliana)

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

Ce modeste travail est dédié spécialement à :

Ma chère mère pour sa patience son amour et ses sacrifices.

*Mon très cher père pour ses encouragements et son support
incontestable puisse Allah vous protéger pour moi*

*A mes chers frères Hakim, Ahmed, Soufiane et Hicham Qui ont
été t toujours à mes cotes et toujours à l'écoutes merci beaucoup.*

A toute la famille Bouniati.

C'est un honneur de dédié mon travail à toutes mes amies Amina,

Fatima, Soumia

Merci d'exister.

Soumia.

Dédicace

Je dédier ce travail avec grande fierté :

À ma grande mère qui je souhaite une bonne santé

A ma chère mère

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour
éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez
consenti pour mon instruction et mon bien être*

*A mon cher père celui qui s'est changé la nuit en jour pour
m'assurer les bonnes conditions.*

*A mon cher frère Fethallah et mes chères sœurs Nour Houda et
Hadjer et ses enfants.*

Puisse Allah vous donne la sante le bonheur et la joie.

A toute ma famille Laidoudi

Et à mes amies Amina, Soumia, Fatima.

Zolla.

Remercîments

Au terme de ce travail, et avant tout nous remercions ALLAH qui nous a donné la force et le courage afin de réaliser ce travail de fin d'étude.

Tout d'abord, nous tenant à exprimer nos gratitudees pour notre encadreur Mr Gherbi Benyoucef (maître de conférences) pour avoir accepté de nous encadrer. Ainsi pour la qualité de leur enseignement, leur conseils et surtout pour leur patience et compréhension durant la période de notre travail.

Nous souhaitant d'adresser nos remerciements aux membres de jury :

Mr Bouderbala et Mr Hennia D'avoir accepté de juger ce travail. Nous n'oublions pas de remercier tous nos professeurs de la faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre de l'université Djilali Bounaama Khemis -Miliana et aussi tout le corps administratif.

Enfin nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Abstract

Limited water resources are one of the major challenges facing Algeria during the current years. The water quality mapping is important water resource methods which can be used for water management in agriculture. Thus, the current study aims to assess the Groundwater quality for irrigation purpose through predicting its suitability for irrigation. Further analysis was carried out to evaluate the irrigation Groundwater quality index (IGWQI) through spatial approaches and artificial neural network (ANN) model. The results indicated that the computed IGWQI values ranged between 36 and 75. Around 44% of the surfaces were classified as high restricted water, while 54 % of the plain surface groundwater were categorized as medium restricted water for irrigation. The results of IWQI showed a standard deviation of 10.32 with medium restricted groundwater dominated the result confirms that the ANN model is a best applied tool to predict the groundwater suitability for irrigation purpose in Khemis Miliana alluvial plain.

Keywords: IGWQI, Artificial neural networks (ANN), irrigation index, Khemis Miliana, Groundwater.

Résumé

Les ressources en eau limitées sont l'un des défis majeurs auxquels l'Algérie est confrontée au cours des années actuelles, ainsi, la présente étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation en prédisant son aptitude à l'irrigation, une analyse plus approfondie a été réalisée pour évaluer l'indice de qualité de l'eau souterraine d'irrigation (IGWQI) grâce à des approches spatiales et à un modèle de réseau de neurones artificiels (ANN). Les résultats ont indiqué que les valeurs IGWQI calculées variaient entre 36 et 75. Environ 44% de la surface étaient classés comme eau à haute restriction, tandis que 54% de la surface des eaux souterraines étaient classées comme eau à restriction moyenne pour l'irrigation. Les résultats de l'IGWQI ont montré un écart type de 10,32 avec des eaux souterraines à restriction moyenne qui domine. Le résultat confirme que le modèle ANN est le meilleur outil appliqué pour prédire l'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation dans la plaine alluviale de Khemis Miliana.

Mots-clés : eaux souterraine, IGWQI, irrigation, ANN, Khemis Miliana.

ملخص

تعد الموارد المائية المحدودة أحد التحديات الرئيسية التي تواجه الجزائر خلال السنوات الحالية. يعد رسم خرائط جودة المياه أحد الأساليب الهامة لإدارة الموارد المائية التي يمكن استخدامها لإدارة المياه في الزراعة. إن الدراسة الحالية تهدف إلى تقييم نوعية المياه الجوفية لأغراض الري من خلال التنبؤ بمدى ملاءمتها للري. تم إجراء مزيد من التحليل لتقييم مؤشر جودة المياه الجوفية للري من خلال الأساليب المكانية ونموذج الشبكة العصبية الاصطناعية. أشارت دلت نتائج هذا البحث ان قيمه تراوحت بين 36 و75. صُنّف حوالي 44% من مساحة المياه الجوفية على أنها مياه ذات جودة سيئة عالية المقاطعة، بينما تم تصنيف 54% من سطح المياه الجوفية على أنها مياه ذات قابلية متوسطة للري. أظهرت النتائج انحرافا معياريا يقدر ب 10.32 مع سيطرة المياه الجوفية المتوسطة الجودة للري. تؤكد نتائج البحث على إن استخدام النموذج الشبكي النيوروني يعتبر وسيلة ناجعة للتنبؤي بدرجة جودة المياه الجوفية للسقي في سهل خميس مليانة

كلمات مفتاحيه: مياه جوفية، مؤشر جودة السقي، الشبكة العصبية، خميس مليانة.

Table des matières

Dédicace	
Remerciements	
Abstract	
Résumé	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et abréviations	

Chapitre I Synthèse Bibliographique

Introduction générale	1
I. Le réseau neuronal artificiel	3
I.1 Définition.....	3
I.2 Les composants des réseaux de neurones artificiels	3
I.2.1 Couche d'entrée.....	3
I.2.2 Couches cachées.....	3
I.2.3 Couche de sortie	3
I.3 L'histoire de réseau neuronal	4
I.4 Les types de réseau neuronal.....	5
I.4.1 Réseau neuronal Feed-foward	5
I.4.2 Réseaux neuronaux auto-organisés de Kohonen	6
I.4.3 Réseaux de Hopfield.....	7
I.5 L'architecteur ANN.....	7
I.5.1 Les réseaux de neurones non bouclés.....	7
I.5.2 Les réseaux de neurones bouclés.....	8
I.6 Apprentissage	10
I.7 Types d'apprentissage	10
I.7.1 Apprentissage supervisé	10
I.7.2 Apprentissage non supervisé	10
I.7.3 Algorithme de rétro propagation	10
I.8 Les avantages et les inconvénients de réseau neuronal artificiel	11
I.8.1 Les avantages.....	11

I.8.2	Les inconvénients	11
I.9	L'irrigation	11
I.9.1	Définition.....	11
I.9.2	Qualité d'eau d'irrigation	11
I.9.3	Problèmes liée à la qualité de l'eau d'irrigation	12
I.9.4	Les principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation.....	12
I.9.5	Les indices d'irrigation	13
I.9.6	L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI)	15

Chapitre II Présentation de la zone d'étude

II.	Présentation de la zone d'étude	18
II.1	Domaine géographique de secteur d'étude	18
II.2	Urbanisation et démographie.....	19
II.3	L'occupation du sol	19
II.4	Aspect hydro-climatique	20
II.5	Réseaux hydrographique	20
II.6	Précipitations	22
II.7	Contexte géologique.....	25
II.7.1	Cadre général.....	25
II.7.2	Cadre local.....	26
II.8	Litho-stratigraphie	27
II.9	Contexte hydrogéologique	31

Chapitre III Matériels et méthodes

III.	Matériels et méthodes	32
III.1	Collecte des données	32
III.2	Hydrochimie et spatialisation des paramètres	33
III.2.1	Détermination de quantité en réaction en meq/L.....	33
III.2.2	Spatialisation Hydrogéochimique.....	33
III.2.3	Aptitude des eaux à l'irrigation	34

Chapitre IV Résultat et discussion

IV.	Résultat et discussion.....	36
IV.1	Classification des eaux souterraines.....	36
IV.2	Les indices de pollutions	37

IV.3	La distribution spatiale des indices d'aptitude des eaux à l'irrigation	40
IV.4	La comparaison	44
IV.5	Approche cartographique de la qualité de l'eau souterraine à l'irrigation	47
IV.6	Indice de qualité de l'eau d'irrigation.....	51
IV.7	Réseau de neurones artificiels (ANN).....	56
IV.8	Analyse de régression multiple (ARM).....	60
IV.9	Analyse de la carte d'IWQI.....	62

Liste des figures

Figure 1 : Structure de réseau neuronal	4
Figure 2 : Perceptron multicouche	5
Figure 3 : Réseau non bouclé avec une seule couche de neurone.	7
Figure 4 : Réseau neuronal bouclé	8
Figure 5 : Forme conique d'un réseau neuronal bouclé	9
Figure 6 : Carte de la situation géographique de la région d'étude.....	18
Figure 7 : Carte d'occupation du sol du périmètre du Haut Cheliff. D'après ONID Khemis Miliana.....	20
Figure 8 : Réseau hydrographique de la région d'étude.....	21
Figure 9 : La répartition mensuelle des précipitations.....	23
Figure 10 : La répartition mensuelle des précipitations	23
Figure 11 : Variation spatio-temporelle des températures moyennes annuelles	24
Figure 12 : Histogrammes de variations des températures moyennes mensuelles.....	25
Figure 13 : carte géologique de la plaine de Haut Cheliff	27
Figure 14 : Log litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine alluviale de.....	30
Figure 16 : Répartition spatiale des éléments anionique des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana.	39
Figure 17 : répartition spatiale d'aptitude des indices des eaux d'irrigation des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana.....	42
Figure 18 : les cartes de la répartition spatiales de la qualité d'indices d'irrigation des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana.	43
Figure 19 : les cartes de la répartition spatiale de la qualité d'indices d'irrigation normalisée des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana.	45
Figure 20 : les cartes de la répartition spatiale de la qualité d'indices d'irrigation normalisée des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana.	46
Figure 21 : Architecture ANNs	56
Figure 22 : structure du Model ANNs.....	57
Figure 23 : les données d'entraînement, de validation et de test.....	59
Figure 24 : Carte de la répartition spatiale de l'indice d'irrigation des eaux souterraines	60

Liste des tableaux

Tableau 1. Réseau hydrographique.	22
Tableau 2. Les statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana.....	32
Tableau 3. Faciès chimiques des eaux souterraines rencontrés dans la plaine de Khemis Miliana.	36
Tableau 4. Résultat de calcul des paramètres d'aptitude à l'irrigation.....	48
Tableau 5. Classification de la qualité d'aptitude des eaux à l'irrigation.....	49
Tableau 6. Valeurs limites de la qualité des paramètres.....	51
Tableau 7. Pondérations pour les paramètres de l'indice IGWQI.....	52
Tableau 8. valeur calculé $Q_i \cdot W_i$ de chaque ainsi que l'indice finale IWQI	53
Tableau 9. Limites pour les paramètres de qualité de l'irrigation.....	54
Tableau 10. Performances statistiques des modèles ANNs.....	58
Tableau 11. Statistiques des variables étudiées.....	60
Tableau 12. Résultats statistiques.....	61

Notion et abréviation

ANN : Réseau neuronal artificiel.

ANRH : agence national des ressources hydraulique.

IQWI : indice de qualité de l'eau d'irrigation.

ONID : Office national de l'irrigation et de drainage.

Qi : Paramètre de mesure de la qualité de l'eau.

UCCC : Comité des consultants de l'Université de Californie.

Wi : témoin d'accumulation.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource limitée et devient une denrée rare dans de nombreuses régions du monde (Trabelsi & Zairi, et al. 2007), généralement de meilleure qualité que les eaux de surface, les eaux souterraines contribuent à une large part de l'alimentation en eau potable et permettent l'essor d'une activité économique (en particulier dans les secteurs agricoles et industriels) dont le développement est conditionné par la qualité comme par la quantité de ressources disponibles (Petit, 2004).

L'accroissement des activités humaines, les demandes en eau sans cesse croissantes et l'exigence d'une meilleure qualité de vie imposent que l'on réponde aux besoins en eau, non seulement en termes de quantité, mais aussi en termes de qualité, notamment par le respect des normes exigées (Achraf, 2003).

Une grande partie de l'agriculture mondiale dépend des eaux souterraines, en particulier dans les régions arides et semi-arides. (Zhou & zwahlem et al. 2010) dont la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement. Ainsi, les propriétés physiques et chimiques du sol, telles que sa structure et sa perméabilité, sont très sensibles au type d'ions potentiellement échangeables présents dans les eaux d'irrigation (LACHACHE & BOUDJENAH-HAROUN).

Pour comprendre les eaux souterraines, il est essentiel de connaître la qualité de la ressource elle-même et les effets d'une mauvaise qualité sur la société. Les eaux souterraines salines, saumâtres ou contaminées sont peu utiles aux agriculteurs et encore moins aux et encore moins pour le secteur urbain. (Davidson & Wei, 2012) Le concept de qualité de l'eau est complexe car de nombreux facteurs l'influencent. La qualité de l'eau doit être définie sur la base d'un ensemble de variables physiques et chimiques qui sont étroitement liées à l'utilisation prévue de l'eau. Pour chaque variable, des valeurs acceptables et inacceptables doivent ensuite être définies. L'eau dont les variables répondent aux normes préétablies pour un usage donné est considérée comme convenable pour cette utilisation. Si l'eau ne répond pas à ces normes, elle doit être traitée avant d'être utilisée (Cordoba & Martinez, 2010).

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de plus en plus utilisés pour prédire et prévoir les variables des ressources en eau. Les ANN ont été utilisés avec succès dans les processus hydrologiques, la gestion des ressources en eau, la prévision de la qualité de l'eau et l'exploitation des réservoirs (Antonopoulos & Gianniou, et al. 2016). Elles sont capables

Introduction générale

d'approximer avec précision des relations non linéaires complexes entre les entrées et les sorties (Palami & Liong, 2008).

La plaine de Khemis-Miliana sous un climat semi-aride et avec une vocation agricole les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées. L'étude de la qualité des eaux souterraines utilisées dans le domaine d'irrigation devient primordiale. Pour mieux connaître la qualité des eaux une étude hydrochimique a été élaborer, dont cette étude est basée sur un modèle de réseau neuronal artificiel (ANN), a fin déteindre l'objectif principal qui est :

- L'établissement des cartes spéciales de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, en tenant compte de techniques modernes.

Aperçu
bibliographique

I. Le réseau neuronal artificiel

I.1 Définition

Un ANN est un système de traitement de l'information massivement parallèle et distribué qui possède certaines caractéristiques de performance ressemblant aux réseaux neuronaux biologiques du cerveau humain (Haykin, 1994). Le réseau neuronal artificiel (ANN), est fréquemment utilisé ces dernières années dans de nombreux domaines. Il se compose de nombreuses unités, chacune d'entre elles étant désignée comme un neurone artificiel. Les unités sont divisées en trois couches : la couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et la couche de sortie. ANN est souvent utilisée en raison de l'absence d'hypothèses et de sa facilité d'utilisation (Sahoo & Jha, 2013).

I.2 Les composants des réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont considérés comme un groupe de cellules ou neurones liés entre eux et organisés sous forme de couches, nous trouvons :

I.2.1 Couche d'entrée

Les neurones de cette couche reçoivent les valeurs d'entrée du réseau et les transmettent aux neurones cachés. Chaque neurone reçoit une valeur, il ne fait pas donc de sommation.

I.2.2 Couches cachées

C'est la couche qui est entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Nous pouvons en trouver plusieurs couches cachées que l'on appelle (Multi-Layer Network) et s'il y a une seule couche cachée on l'appelle (Single-Layer Network). Chaque neurone de cette couche reçoit l'information de plusieurs couches précédentes, effectue la sommation pondérée par les poids, puis la transforme selon sa fonction d'activation qui est en général une fonction sigmoïde. Par la suite, il envoie cette réponse aux neurones de la couche suivante

I.2.3 Couche de sortie

Elle représente les résultats de l'application du réseau. Elle joue le même rôle que les couches cachées, la seule différence entre ces deux types de couches est que la sortie des neurones de la couche de sortie n'est liée à aucun autre neurone (Boularas & Djalab, 2020).

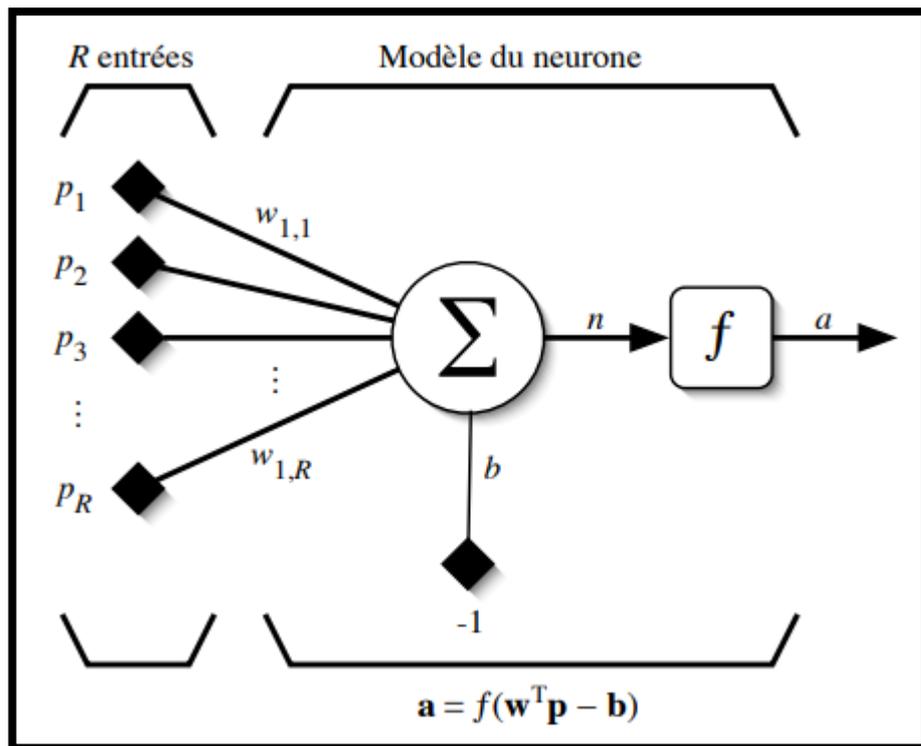


Figure 1 : Structure de réseau neuronal (Parizeau, 2004).

I.3 L'histoire de réseau neuronal

Dès 1890, W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb. En 1943 J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).

En 1949 D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.

En 1957 F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. En 1960 : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente.

Synthèse bibliographique

En 1969, M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèles de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers les systèmes à bases de règles. Du 1967 jusqu'à 1982 S. Grossberg, T. Kohonen, toutes les recherches ne sont pas interrompues elles se poursuivent sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance de formes, la modélisation en neurobiologie, etc.

En 1982 : J. J. Hopfield est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels met en avant l'isomorphisme de son modèle avec le modèle d'ising (modèle des verres de spins). Cette idée va drainer un flot de physiciens vers les réseaux de neurones artificiels. En 1983 : La machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue.

En 1985 : La rétro-propagation de gradient apparaît nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables ([Personnaz & Rivals, 2003](#)).

I.4 Les types de réseau neuronal

I.4.1 Réseau neuronal Feed-foward

Ces réseaux sont généralement organisés sous forme de couches où chaque couche comporte un certain nombre de neurones comme unités de traitement. Les signaux sont transférés d'une couche à l'autre par le biais de l'entrée-sortie, où les signaux sont traités à chaque couche et transférés dans le sens direct. Cette architecture de base d'un traditionnelle est appelée perceptron multicouche (MLP).

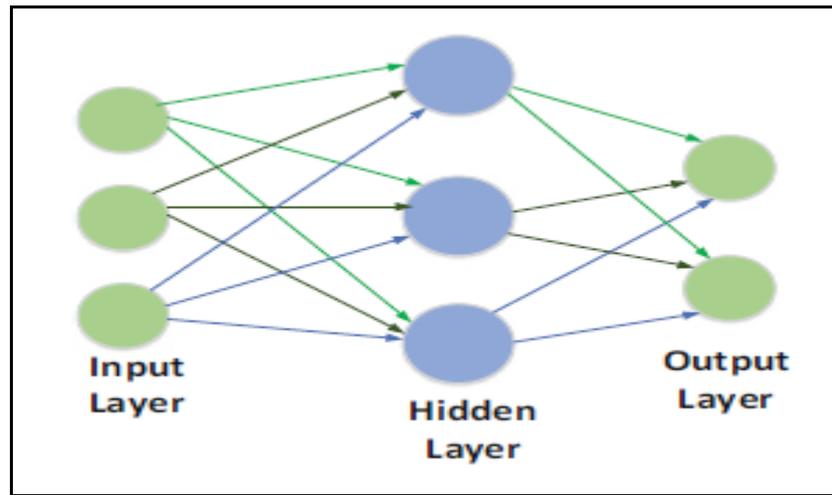


Figure 2 : Perceptron multicouche (Khan, 2018).

Le modèle de perceptron multicouche composé d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie.

I.4.2 Réseaux neuronaux auto-organisés de Kohonen

Les cartes auto-organisées (SOM), qui sont utilisées comme méthodes de calcul pour la visualisation et l'analyse de données à haute dimension, ont été introduites par Teuvo Kohonen. Les cartes sont basées sur un apprentissage compétitif non supervisé dont la source d'inspiration est la structure biologique du cortex. Le cortex comporte différentes zones qui sont responsables de différentes activités humaines (motrices, sensorielles, visuel et somato sensoriel). Chaque zone sensorielle est mise en correspondance avec la zone correspondante du cortex cérébral. On pense que le cortex contient la carte computationnelle auto-organisée du corps. Le cortex sensoriel préserve également autant que possible les relations spatiales entre les parties du corps. Le même phénomène se produit également dans le cortex moteur.

Les réseaux auto-organisés ont une topologie à deux couches, la première étant la couche d'entrée et la seconde la couche de Kohonen. Il y a un nœud pour chaque dimension de l'entrée dans la couche d'entrée et chaque entrée est connectée à tous les nœuds de la couche de Kohonen, les deux couches sont donc entièrement connectées, la valeur du nœud dans la couche de Kohonen représente la sortie, le nombre de nœuds dans la couche de Kohonen ou de sortie doit être au moins égal au nombre de catégories à reconnaître. Un neurone de la couche de sortie doit être activé pour chaque dimension de l'entrée. Les neurones de la couche de Kohonen sont voisins de la grille. Ces réseaux sont d'une grande importance dans des applications telles que le regroupement de données, qui se produit dans la reconnaissance vocale et la reconnaissance de l'écriture manuscrite pour des données distribuées de manière éparses. Ils utilisent des inhibitions

biologiques latérales qui s'inspirent du fonctionnement du système de vision dans les systèmes neuronaux.

I.4.3 Réseaux de Hopfield

Un réseau neuronal courant est connu sous le nom de réseau Hopfield. Les réseaux récurrents possèdent la propriété d'un flux bidirectionnel d'informations. Les nœuds de ces réseaux sont entièrement connectés les uns aux autres et peuvent fonctionner à la fois comme entrée et comme sortie. L'idée sous-jacente est que l'instabilité des états est itérée jusqu'à ce qu'un état stable soit atteint (Khan, 2018).

I.5 L'architecteur ANN

I.5.1 Les réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans "retour en arrière" ; si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les "connexions" entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. Le terme de "connexions" est une métaphore : dans la très grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par des programmes d'ordinateurs, non des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; néanmoins, le terme de connexion, issu des origines biologiques des réseaux de neurones, est passé dans l'usage, car il est commode quoique trompeur. Il a même donné naissance au terme de connexionnisme.

La **Figure 3** représente un réseau de neurones non bouclé qui a une structure particulière, très fréquemment utilisée : il comprend des entrées, une couche de neurones "cachés" et des neurones de sortie. Les neurones de la couche cachée ne sont pas connectés entre eux. Cette structure est appelée Perceptron multicouche.

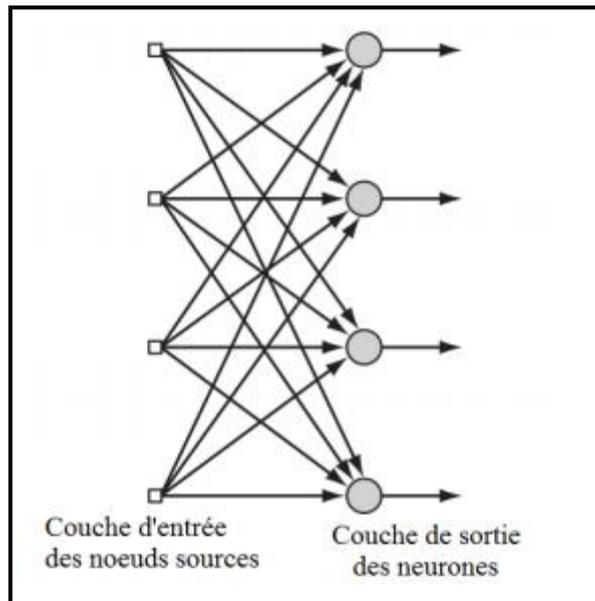


Figure 3 : Réseau non bouclé avec une seule couche de neurone (Lakhdar & Mohamed, 2003).

I.5.2 Les réseaux de neurones bouclés

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard : un réseau de neurones bouclé est donc un système dynamique, régi par des équations différentielles ; comme l'immense majorité des applications sont réalisées par des programmes d'ordinateurs, on se place dans le cadre des systèmes à temps discret, où les équations différentielles sont remplacées par des équations aux différences.

La forme la plus générale des équations régissant un réseau de neurones bouclé est appelée forme canonique ;

$$x(k+1) = \phi [x(k), u(k)]$$

$$Y(k) = \psi [x(k), u(k)]$$

Où ϕ et ψ sont des fonctions non linéaires réalisées par un réseau de neurones non bouclé et où k désigne le temps (Dreyfus & Martinez, 2002).

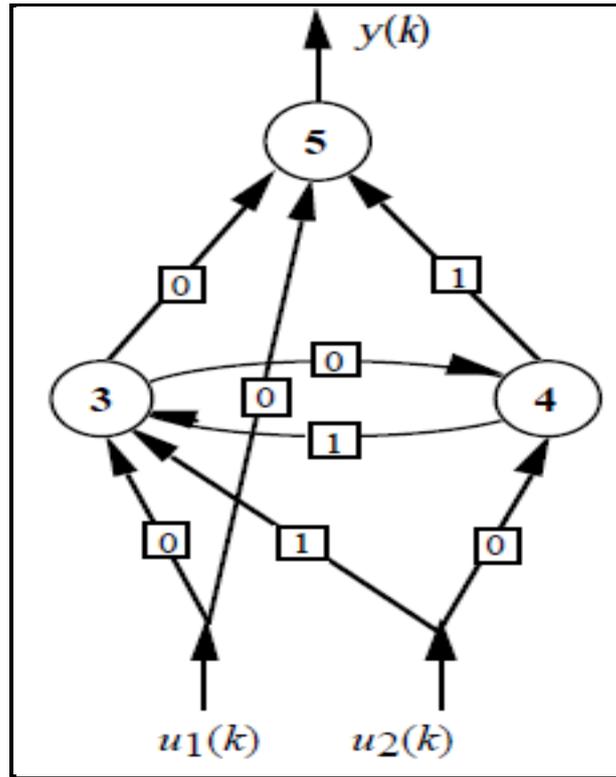


Figure 4 : Réseau neuronal bouclé (Dreyfus & Martinez, 2002).

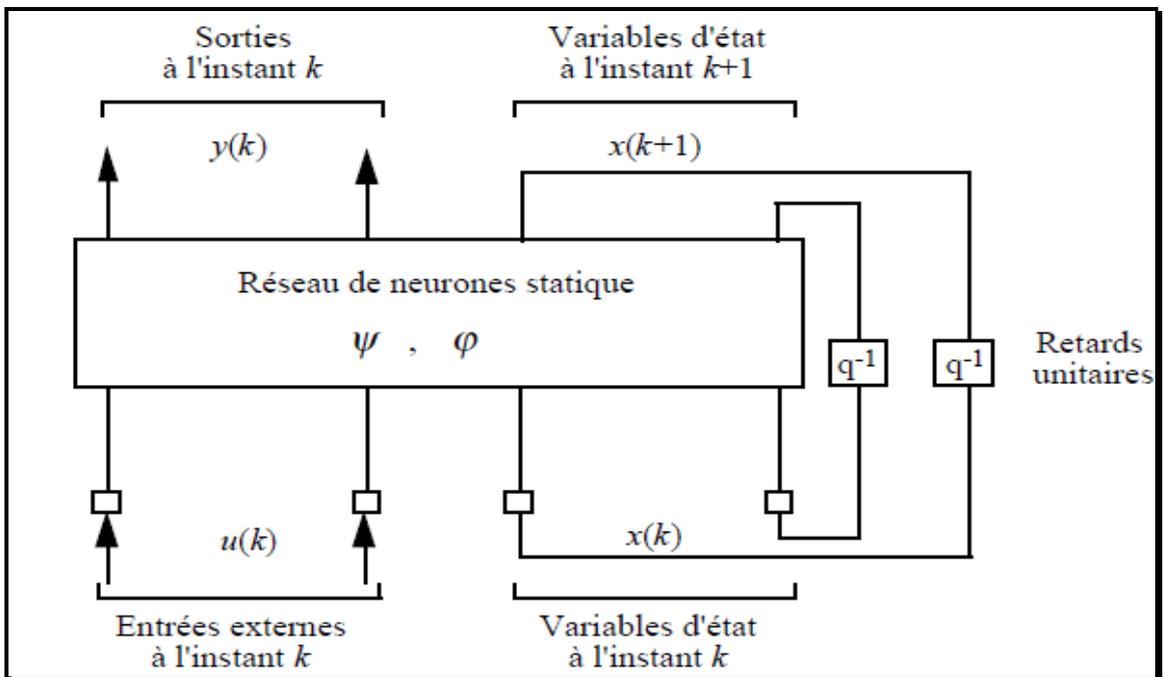


Figure 5 : Forme conique d'un réseau neuronal bouclé (Dreyfus & Martinez, 2002).

I.6 Apprentissage

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt. Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions.

L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Il est souvent impossible de décider à priori des valeurs des poids des connexions d'un réseau pour une application donnée. A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation ([Touzet, 1992](#)).

I.7 Types d'apprentissage

I.7.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé, un ensemble d'entrées et sorties adéquates sont utilisées pour former le réseau. Le réseau produit ensuite ses propres sorties. Ces sorties sont comparées avec les sorties correctes et la différence (erreur) est utilisée pour modifier les poids.

I.7.2 Apprentissage non supervisé

Apprentissage non supervisé ou auto-organisation est l'endroit où un réseau développe ses propres règles de classification par l'extraction d'informations à partir des entrées présentée au réseau.

La formation des lots est l'endroit où les modifications apportées aux poids et les préjugés sont prises en fonction de l'application de l'ensemble ensemble d'entrée de vecteurs de données sur le réseau.

La formation progressive est l'endroit où les modifications apportées aux poids et les préjugés sont effectués après l'application de chaque vecteur de données d'entrée individuel. Formation incrémentielle est également considérée comme une formation en ligne ou de formation adaptative ([Hadj Kaddour, 2017](#)).

I.7.3 Algorithme de rétro propagation

C'est un algorithme supervisé dont l'objectif est d'ajuster les poids du réseau MLP de façon à minimiser une fonction de coût différentiable. L'algorithme de BP assure la descente du gradient sur le critère d'erreur pour atteindre le minimum ([Gadda, 2015](#)).

I.8 Les avantages et les inconvénients de réseau neuronal artificiel

I.8.1 Les avantages

- ❖ Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe.
- ❖ Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par retro-propagation des erreurs.
- ❖ l'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique.
- ❖ Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- ❖ Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en matière, informatique statistique requise.
- ❖ Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données.
- ❖ Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

I.8.2 Les inconvénients

- ❖ L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s).
- ❖ Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- ❖ Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation).
- ❖ La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur (Boularas & Djalab, 2020).

I.9 L'irrigation

I.9.1 Définition

Est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe (Bouarouj, 2012).

I.9.2 Qualité d'eau d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation indique la qualité de l'eau souterraine ou de surface appliquée, sa teneur en minéraux et en nutriments (excès ou carence) qui affecte directement le rendement des plantes et modifie également la composition du sol. La bonne qualité des eaux

souterraines pour l'irrigation a un grand impact sur la qualité et le rendement des cultures (Coppola, Poulton, Charles, et al. 2003).

I.9.3 Problèmes liée à la qualité de l'eau d'irrigation

L'eau utilisée pour l'irrigation peut dépendre du type et de la quantité de sels dissous. Les sels sont présents dans l'eau d'irrigation en quantité relativement faible mais significative. Ils proviennent de la dissolution ou de l'altération des roches et du sol, y compris la dissolution de la chaux, du gypse et d'autres minéraux du sol à dissolution lente. Ces sels sont transportés avec l'eau jusqu'à l'endroit où elle est utilisée. Dans le cas de l'irrigation, les sels sont appliqués avec l'eau et restent dans le sol lorsque l'eau s'évapore ou est utilisée par la culture.

L'aptitude d'une eau à l'irrigation est déterminée non seulement par la quantité totale de sel présente, mais aussi par le type de sel. Divers problèmes de sol et de culture se développent lorsque la teneur totale en sel augmente, et des pratiques de gestion spéciales peuvent être nécessaires pour maintenir des rendements acceptables. La qualité de l'eau ou son aptitude à l'emploi est jugée en fonction de la gravité potentielle des problèmes que l'on peut s'attendre à voir apparaître au cours d'une utilisation à long terme.

Les problèmes qui en résultent varient selon les cultures, ainsi que selon les compétences et les connaissances de l'utilisateur de l'eau. Par conséquent, il n'existe pas de limite fixe pour la qualité de l'eau ; son aptitude à l'utilisation est plutôt déterminée par les conditions d'utilisation qui affectent l'accumulation des constituants de l'eau et qui peuvent restreindre le rendement des cultures. Les problèmes de sol les plus couramment rencontrés et utilisés comme base pour évaluer la qualité de l'eau sont ceux liés à la salinité, au taux d'infiltration de l'eau, à la toxicité et à un groupe d'autres problèmes divers (Ayers & Westcot, 1985).

I.9.4 Les principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation

- **La salinité** : Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-).
- **Le Sodium (Na^+)** : Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des instructions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation. Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement

impermeable à l'eau. La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que les sols plus lourds lorsqu'irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, cependant un problème potentiel existe. La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'adsorption du sodium (SAR).

- **Alcalinité :** L'alcalinité est une mesure du pouvoir de l'eau à neutraliser les acides. En d'autres termes, l'alcalinité mesure la résistance à tout changement de pH. Le pouvoir neutralisant de l'eau est attribué principalement à la présence de bicarbonates de calcium et de magnésium dissous dans l'eau.
- **La dureté :** La dureté fait référence à la quantité de calcium et de magnésium contenue dans l'eau. Ces deux éléments proviennent de l'altération de la roche-mère. La teneur en calcium est habituellement plus élevée que le magnésium dans les eaux souterraines.
- **Le bore :** Des excès en bore sont presque tout le temps associés à des puits très profonds qui ont également une forte salinité. Une eau d'irrigation contenant plus de 1 ppm de bore (B) peut causer une accumulation toxique pour les cultures sensibles (Couture, 2004).

I.9.5 Les indices d'irrigation

En général, les paramètres de qualité de l'eau (les principaux cations tels que (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) et anions (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, NO₃⁻) et les métaux lourds sont des indicateurs de l'utilisation de l'eau potable, tandis que les indices de qualité de l'eau tels que le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), le rapport de Kelly (KR) [ou l'indice de Kelly (KI)], l'indice de perméabilité (PI), les indices chloro-alcalins (CAI1 et CAI2), risque de magnésium (MH) (ou rapport d'adsorption du magnésium ; MAR), les solides dissous totaux en fonction des paramètres primaires de qualité de l'eau sont fréquemment utilisés pour déterminer la qualité de l'eau pour l'irrigation (Rawat, Singh, et al. 2018).

➤ Rapport d'adsorption de sodium (SAR)

Le SAR est un rapport relatif d'ions Na à Ca² et le présent d'ions Mg² dans l'échantillon d'eau. Le SAR est utilisé pour estimer que le potentiel de Na accumule dans le sol essentiellement (le mouvement d'eau) à la charge de Ca², Mg² et K à la suite de l'utilisation régulière d'eau sodique. Il est formulé comme suit : (Zouahri, Dakak, et al. 2015).

$$(\text{SAR}) = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2}$$

Les concentrations ioniques sont données en (meq /L)

Sur la base de la gamme de SAR, l'eau d'irrigation peut être classifiée dans quatre classes comme SAR <10 (idéal ou excellent), 10–18 (bien), 18–26 (douteux) et > 26 (inapproprié). SAR

Synthèse bibliographique

influence aussi le temps de filtration d'eau dans le sol. Donc, la valeur basse de SAR d'eau d'irrigation est désirable (Rawat, Singh, et al. 2018).

➤ Sodium pourcentage (Na %)

La concentration de sodium est importante pour classer l'eau d'irrigation car elle réagit avec le sol pour en réduire la perméabilité. Un excès de sodium dans l'eau produit des effets indésirables, à savoir modification des propriétés du sol et réduction de sa perméabilité (Kelley, 1951). La concentration en pourcentage de Na⁺ est un facteur permettant d'évaluer son aptitude à l'irrigation. Na⁺ réagit avec le CO₃²⁻ et forme des sols alcalins, tandis que le Na⁺ réagit avec le chlorure et forme des sols salins. Le % de Na est calculé à l'aide de la formule donnée ci-dessous, où toutes les concentrations sont en meq/l.

$$(\%Na)=100*Na/ (Ca+Mg+Na)$$

La classification de l'eau en fonction du %Na est la suivante : (<20%) excellente pour l'irrigation, (20-40%) bonne pour l'irrigation, (40-60%) Acceptable, (60-80%) douteuse, >80% inappropriées pour l'irrigation (Rawat, Singh, et al. 2018).

➤ Indice de perméabilité :

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation. La teneur en sodium, calcium, magnésium et bicarbonate du sol l'influence. La formule PI est exprimé comme suit : (Zouahri, Dakak, et al. 2015).

$$(PI)=100\times (Na+\sqrt{HCO_3})/ (Ca+Mg+Na)$$

Les concentrations des ions sont exprimés en meq /L

Doneen a élaboré un critère d'évaluation de l'aptitude de l'eau à l'irrigation basé sur l'indice de perméabilité. En conséquence, les eaux peuvent être classées en ordres de classe I, II et III. Les eaux de classe I et de classe II sont classées comme bonnes pour l'irrigation avec une perméabilité maximale de 75 % ou plus. Les eaux de classe III sont inadaptées avec 25% de la perméabilité maximale (Joshi & Kumar, 2009).

➤ Indice Chloro-Alcalines :

Les indices chloro-alcalins (CAI-I et CAI-II) ont été proposés par Schoeller(1977). Ils présentent une technique bien établie pour distinguer l'échange d'ions entre l'eau souterraine et son environnement d'interaction roche-eau hôte pendant le séjour ou le déplacement dans la subsurface. Ils sont calculés par les deux équations suivantes :

$$(ICA): CAI I = Cl^- - \frac{(Na^+ + K^+)}{Cl^-}$$

$$CAI II = Cl^- - \frac{(Na^+ + K^+)}{[So_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^- + CO_3^{2-}]}$$

Synthèse bibliographique

Si le CAI est positif, il n'y a pas d'échange d'ions basiques et, par contre, lorsque le CAI est négatif, il y a sûrement un échange d'ions basiques entre le sodium et le potassium dans l'eau et le calcium et le magnésium dans la roche. De nombreux scientifiques ont utilisé le CAI pour estimer le pourcentage d'échange ionique pourcentage des eaux souterraines dans différentes régions (Adimalla, Li, et al. 2018).

➤ **Le rapport d'absorption de magnésium :**

Le risque lié au magnésium est calculé comme la fraction (Eq.4) entre le magnésium et la somme du magnésium et du calcium totaux (meq/L) d'un échantillon d'eau. Dans les eaux souterraines, Ca^{2+} et Mg^{2+} sont généralement présents à l'état d'équilibre. Si le Mg^{2+} est présent en plus grande concentration, cet équilibre est perturbé. Cet excès de Mg^{2+} convertit l'eau en plus alcaline et affecte la croissance des plantes. Chimiquement, teneur de 50% supérieure à celle du Ca^{2+} . Par conséquent, les Mg^{2+} sont faiblement liés aux particules d'argile et entravent le mécanisme d'infiltration du sol (Hossain, Patra, et al. 2020).

$$(MH) = \frac{Mg^{2+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$$

➤ **Rapport de Kelly:**

KR est un paramètre important pour les évaluations de l'eau d'irrigation. Pour calculer ce paramètre, Na est mesuré par rapport à Ca et Mg, car le Ca et le Mg conservent leur état d'équilibre dans la plupart des eaux. Les valeurs KR inférieures à 1 indiquent une aptitude à l'irrigation, et celles supérieures à 1 indiquent que les eaux ne conviennent pas à l'irrigation (Karakuş, & Yıldız, 2020).

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

I.9.6 L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI)

L'IWQI, est une méthode spécifique, a été développée principalement par Meireles et al et a été utilisée initialement pour l'évaluation de la qualité de l'eau à des fins agricoles]. Il existe de légères différences entre ces méthodes et la méthode basée sur l'IQE employée par l'OMS. Afin de calculer le poids relatif dans cette méthode, il faut utiliser les valeurs estimées de chaque paramètre qui proviennent des données sur la qualité de l'eau d'irrigation selon le Comité des consultants de l'Université de Californie (UCCC) ainsi que les critères d'Ayers et Westcot. Cependant, dans le modèle IWQI, il faut tout d'abord identifier les paramètres dominants qui jouent un rôle important dans la qualité de l'eau à des fins agricoles doivent être identifiés qui sont notamment EC, Na^+ , Cl^- , et HCO_3^- et le SAR. Dans la deuxième étape, le poids des paramètres de qualité de l'eau incluant : la valeur du paramètre de mesure de la qualité de l'eau

Synthèse bibliographique

(Q_i) et le témoin d'accumulation (W_i) doivent être déterminés en fonction de la valeur de chaque paramètre individuel et en tenant finalement compte des critères proposés par Ayers et Westcot. Il convient de mentionner que dans ce modèle, une valeur plus faible représente la mauvaise qualité de l'eau et vice versa. En utilisant l'équation suivante, la valeur de Q_i a été calculée :

$$q_i = q_{max} - \left(\frac{[(x_{ij} - x_{inf}) \times q_{imap}]}{x_{amp}} \right)$$

q_{max} est la valeur maximale de q_i pour chaque classe ; la valeur observée de chaque paramètre est représentée par X_{ij} ; également X_{inf} désigne la valeur limite inférieure de la classe à laquelle le paramètre appartient ; q_{imap} représente l'amplitude de la classe et X_{amp} correspond à l'amplitude de la classe à laquelle appartient le paramètre. A cet égard, la limite supérieure a été considérée comme étant la valeur la plus élevée déterminée dans l'analyse des échantillons d'eau qui est nécessaire pour évaluer X_{amp} de la dernière classe de chaque paramètre.

L'IWQI est calculé par l'équation suivante : (ABBASNIA, RADFARD, et al. 2018).

$$IWQIM = \sum_{i=1}^n q_i w_i$$

Présentation de la zone d'étude

Présentation de la zone d'étude

II. Présentation de la zone d'étude

II.1 Domaine géographique de secteur d'étude

La plaine alluviale du Haut Cheliff, également appelée plaine de Khemis Miliana, est localisée dans la wilaya d'Ain Defla. Elle est située à 120 km au Sud-ouest d'Alger et à 25 Km à l'Est du chef-lieu de la Wilaya sur la route nationale N°4. Elle est comprise entre la coordonnée géographique $36^{\circ}12' - 36^{\circ}17'$ de latitude Nord, et $2^{\circ}12' - 2^{\circ}17'$ de longitude Est.

La zone d'étude est limitée :

- Au Nord par les monts du Zaccar (1579 m d'altitude) ;
- Au Sud les contreforts de l'Ouarsenis ;
- A l'Est par Djebel Gountas (seuil de Djendel) 781 m d'altitude ;
- A l'Ouest par le massif de Doui.

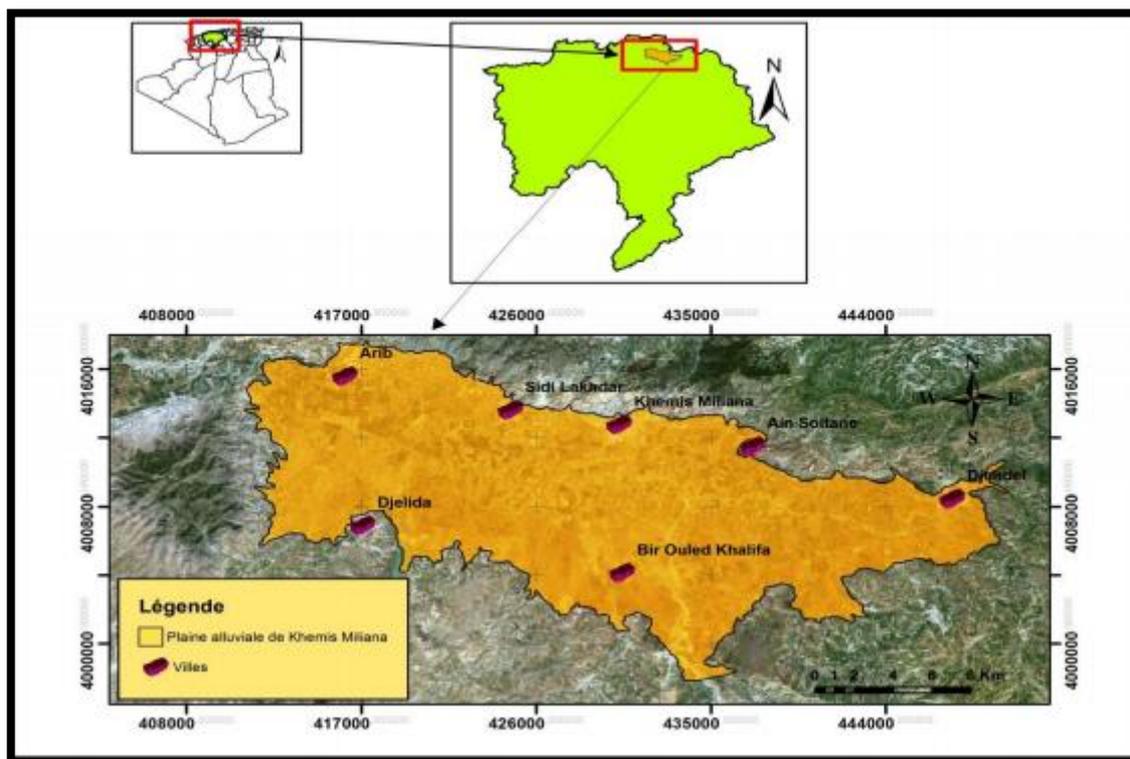


Figure 6 : Carte de la situation géographique de la région d'étude (AMINA & KHAOULA, 2019).

Présentation de la zone d'étude

Cette plaine appartient au bassin du Cheliff et couvre une superficie de 359 Km² un périmètre de 159 Km et de 270 m d'altitude moyenne. Elle forme l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine de la région Caractérisée par une pente relativement faible (< 10%) pour la majorité de la surface.

II.2 Urbanisation et démographie

La population dans la plaine à la fin de l'année 2011 est estimée de 248178 habitants avec un taux d'accroissement de 1.3%. En 2015 la population a passé au 278485 habitas avec un taux d'accroissement de (8 %), elle sera environ 381 628 habitants en 2020 dont (82,55%) sont concentrés agglomérée et 17.45% uniquement en zones rurales. Cette population est concentrée surtout dans les agglomérations qui sont située au Nord de la plaine. Les plus importantes sont respectivement d'Est en Ouest : Djendel, Ain Sultan, Khemis-Miliana, Sidi Lakhdar et Arib, tandis qu'au Sud de la plaine la densité des agglomérations est minime et moins dense, les plus importantes agglomérations sont Djelida et Bir Oueld Khelifa ([Touaibia & Harkat, 2019](#)).

II.3 L'occupation du sol

La région du Haut Cheliff en général, est à vocation agricole. La prédominance de l'arboriculture fruitière couvre environ 47% de la superficie cultivée totale sur les plaines et les terrains à faible pente. Les cultures céréalières et maraîchères (principalement pomme de terre), arboriculture fruitière et oléiculture, cultures industrielles occupent en plaine, et dans les zones de montagnes, occupent par les cultures en sec (céréales et fourrages) et l'élevage ovin et caprin.

Le pourcentage le plus élevé de la superficie forestière de la plaine du Haut Cheliff occupe par des arbres pin d'Alep, Chêne lièges et de chêne vert ([Aberkane & Ben Zahra, 2018](#)).

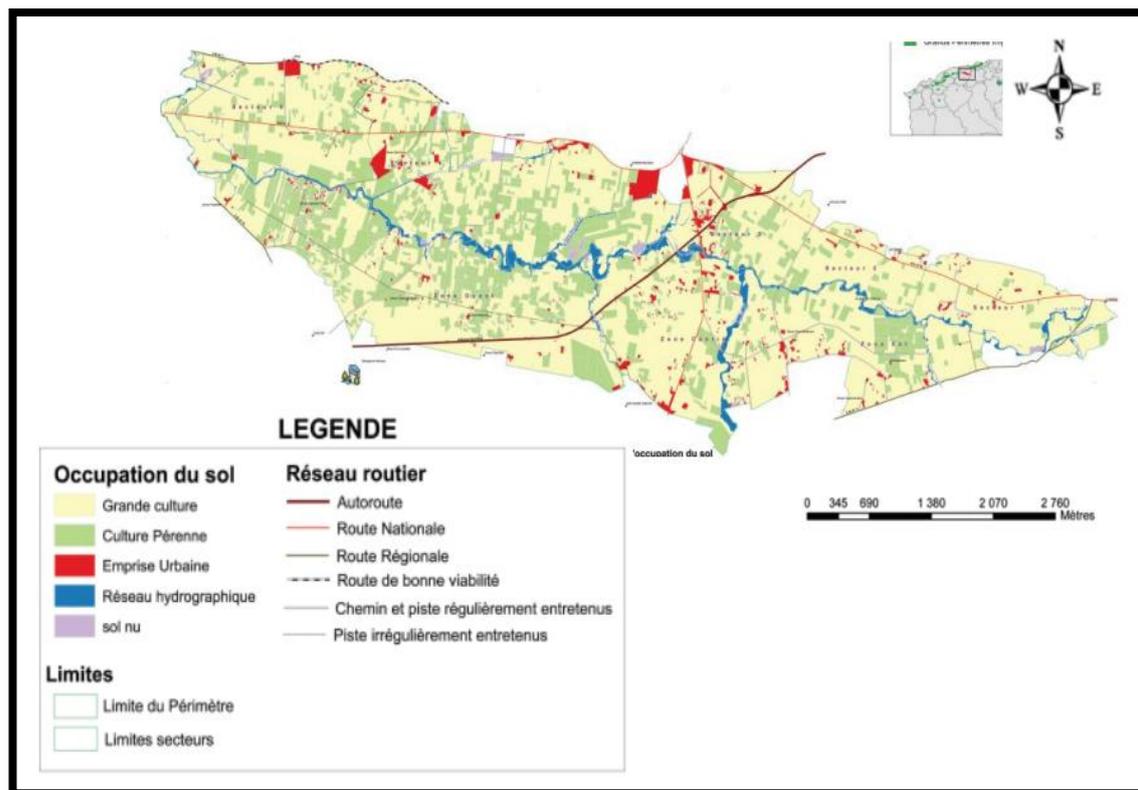


Figure 7 : Carte d'occupation du sol du périmètre du Haut Cheliff. D'après ONID Khemis Miliana, 2012 (Aberkane & Ben Zahra, 2018).

II.4 Aspect hydro-climatique

Le climat du Haut Cheliff est de type Méditerranée avec un caractère de continentalité marqué par un hiver humide et froid et un été sec et chaud, le printemps et l'automne sont des saisons très brèves, la pluviométrie moyenne se situe à des niveaux oscillant d'ouest en est entre 350 et 470mm.

La région de El-Khemis est caractérisée par les aléas climatiques suivants : les vents dominants provenant généralement de l'ouest, la grêle presque inexistante, et la gelée noire est rare, la gelée blanche est de 80% en hiver, et 20% au printemps (Mohamed & Abdessalam, 2011).

II.5 Réseaux hydrographique

La plaine du Haut Cheliff est traversée d'Est en Ouest par Oued Cheliff et ses principaux affluents qui sont Oued Souffay, Millet et Boutane au Nord, Deurdeur, Massine et Harreza au Sud.

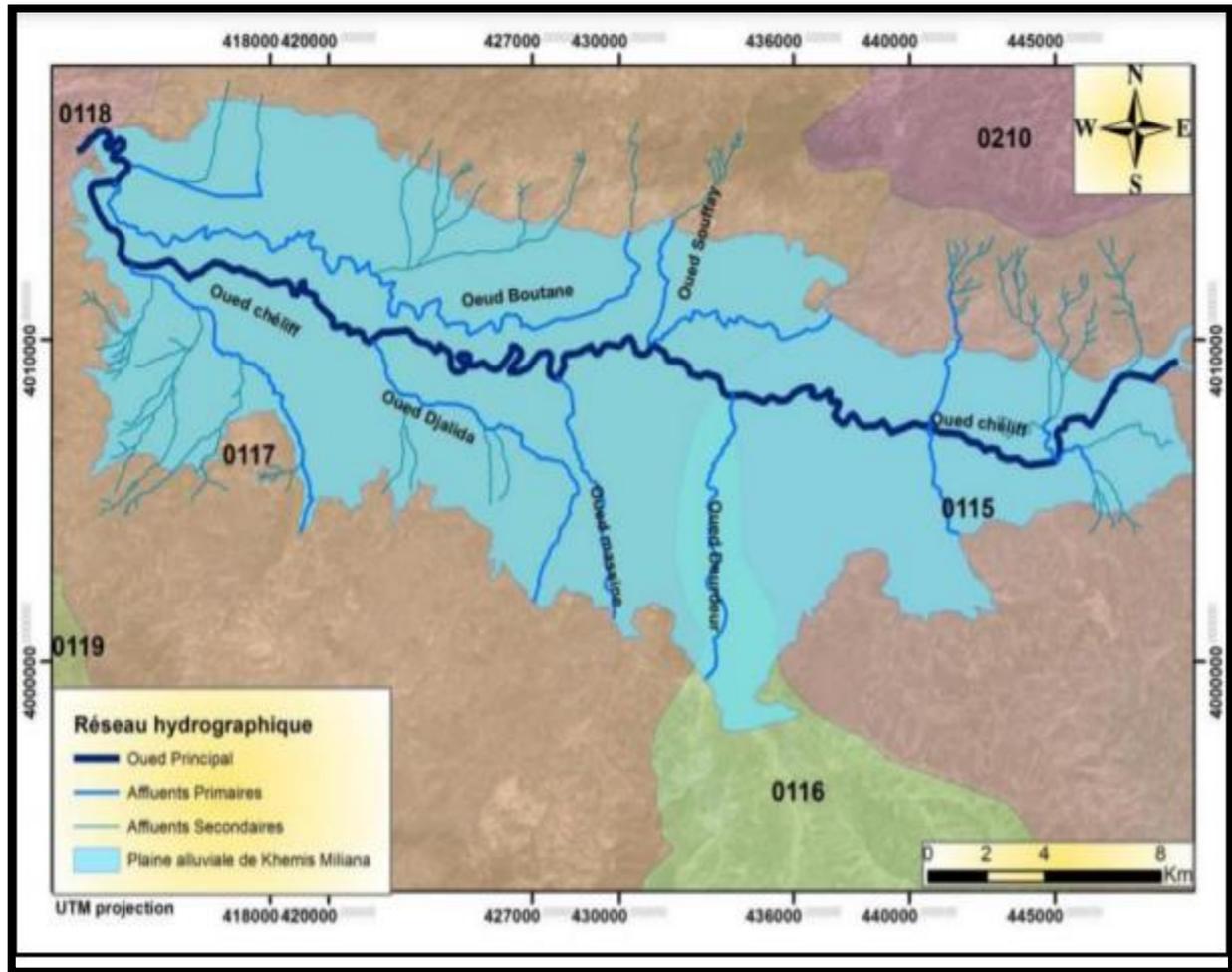


Figure 8 : Réseau hydrographique de la région d'étude (Touaibia & Harkat, 2019).

Les deux caractéristiques telles que la longueur et direction du réseau hydrographique représenté sur le tableau ci-après :

Tableau 1. Réseau hydrographique (Bong & Meziani, 2013).

Cours d'eau	Longueur (m)	Direction découlement
Cheliff	59275.67	E-W
Souffay	43056.85	NNE-SSO
Millet et Boutane	30897	E-W
Deurdeur	5171	SSO-NNE
Massine	6424	SSE-NNO
Harreza	10273	SE-NO
Djelida	5665	ESE-ONO

Toutes les eaux issues des principaux affluents représentés par les Oueds de : Souffay et Boutane au Nord, Oued Deurdeur et Harreza au Sud sont collectés en direction du centre de la plaine du Cheliff vers le principal Oued en question, ce dernier draine toutes les eaux du bassin versant du Cheliff vers l'exutoire.

II.6 Précipitations

L'étude pluviométrique de la plaine de Khemis-Miliana est basée sur les données de quelque station, ces données proviennent de l'ANRH pour une période de 34 ans assurée par ONM (Sahraoui, 2015). Les **Figure 9** et **Figure 10** portes les valeurs moyennes mensuelles (en mm) de la pluviométrie enregistrée pour les neuf stations existant dans la région durant la période allant de 1980 à 2014.

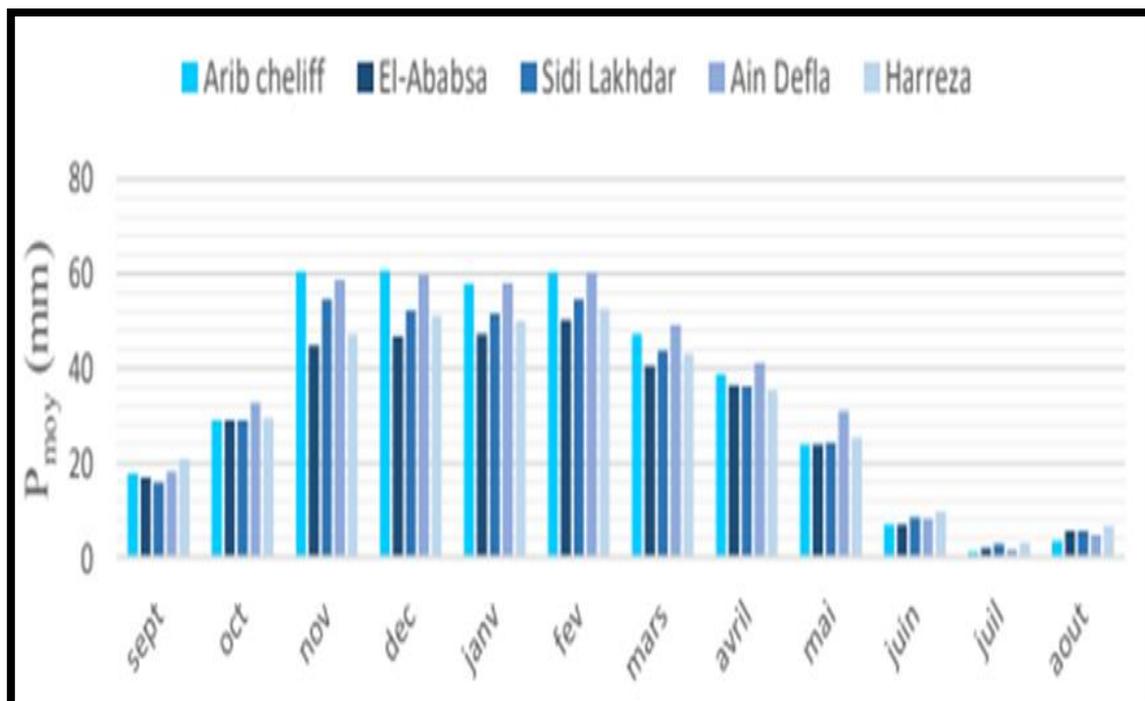


Figure 9 : La répartition mensuelle des précipitations (1980-2014).

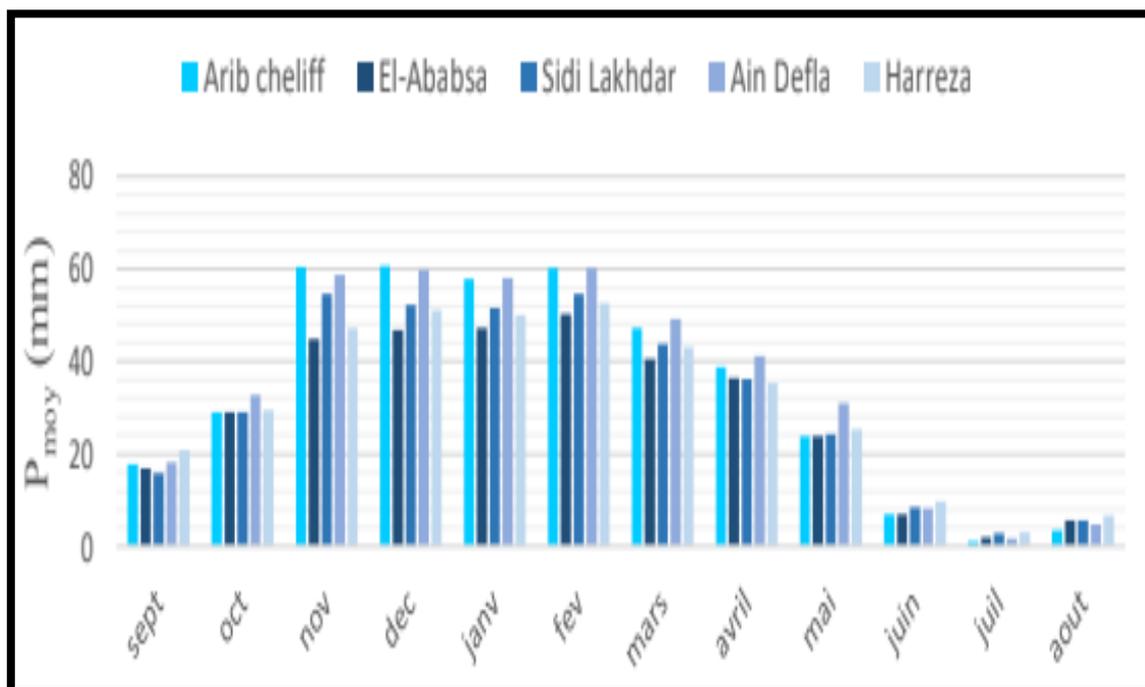


Figure 10 : La répartition mensuelle des précipitations (1980-2014).

Présentation de la zone d'étude

La distribution spatiale des pluies mensuelles suit globalement un gradient décroissant de septembre à aout. Au cours de cette période, les pluies les plus importantes sont enregistrées à l'est et l'ouest de la Plaine. Pendant les mois de novembre, décembre, **janvier et février**, les hauteurs pluviométriques dépassent les 60 mm sur les stations d'Arib Cheliff, Djendel, Ain Soltan et Ain Defla, alors qu'ils atteignent à peine les 10 mm partir des mois juin, juillet et aout. Ce comportement spatial de la pluviométrie mensuelle au cours de l'année (décrit ci-dessus) montre une division de la période à saison humide (d'octobre à avril), où la pluviométrie atteint le maximal et une saison sèche (allant de juin à la fin de septembre)

La mesure des températures s'effectuent sous abri normalisé à 1.50 m au-dessus du sol, les températures sont saisonnières et leurs variations sont régulières pendant le temps, les seules données qu'on a pu avoir sont celles du barrage Harreza et du poste pluviométrique de Khemis-Miliana (Bourekiza & Labdi, 2018).

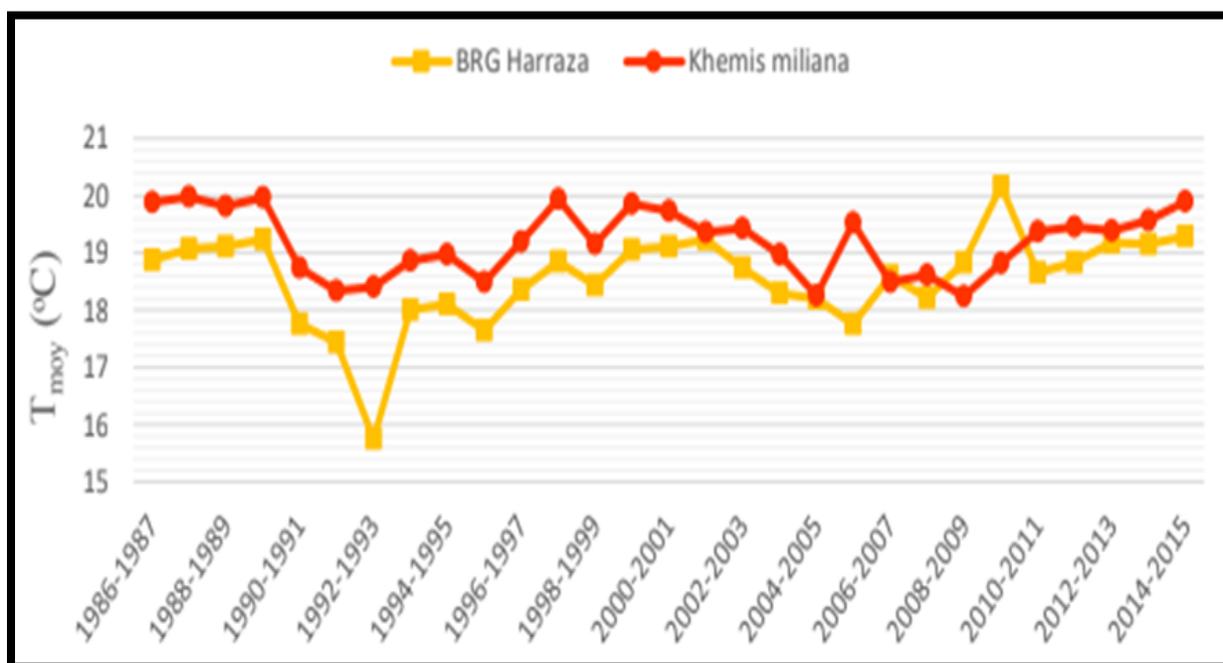


Figure 11 : Variation spatio-temporelle des températures moyennes annuelles (1980-2014).

L'analyse graphique des températures moyennes annuelles de la période 1980-2014, montre que la Température moyenne annuelle varie à la proximité de 19.98°C dans la station de Khemis Miliana pour l'année 1987 est 20.17 °C, pour la station de barrage Harreza de l'année 2009, la température minimale atteint 15.75 °C à l'année 1992, et qui correspond à une zone semi-aride. Les températures moyennes mensuelles calculées à partir des mesures portant sur

Présentation de la zone d'étude

la période de 28 ans d'observation (1986-2014) au niveau des stations du barrage Harreza et Khemis-Miliana sont représentées dans la **Figure 11**.

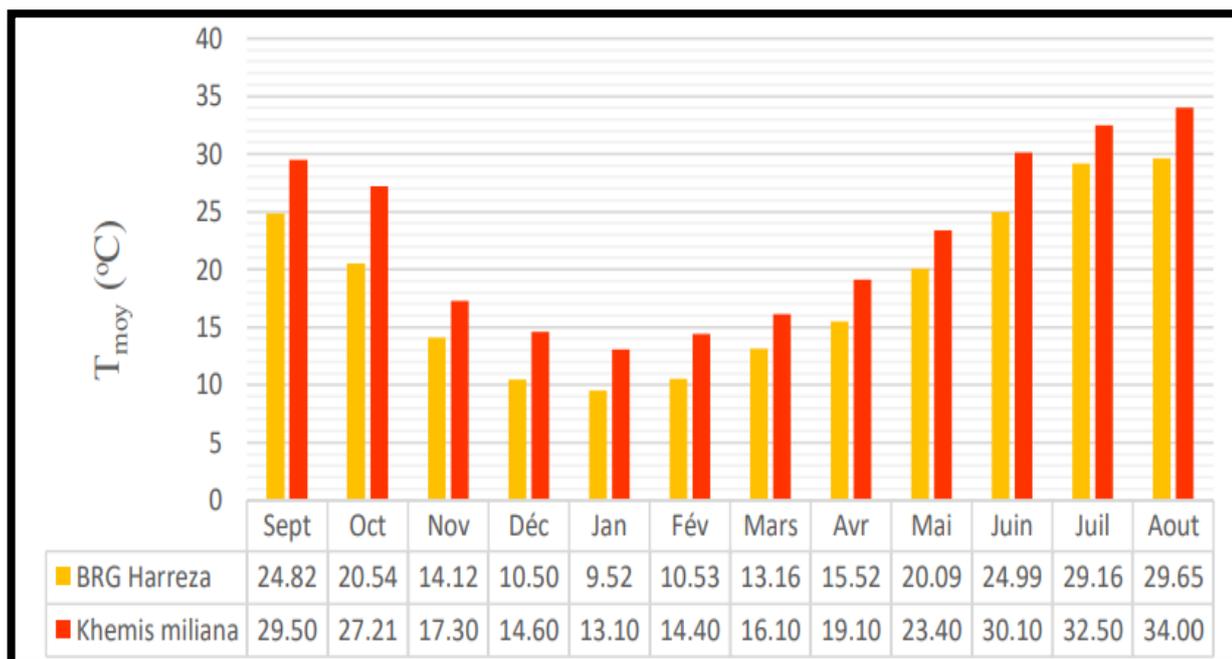


Figure 12 : Histogrammes de variations des températures moyennes mensuelles (1986-2014).

L'histogramme de Température moyenne mensuelle au-dessus, montre qu'il existe un pôle chaud allant du mois de mai au mois d'octobre et un autre froid allant du mois de novembre au mois d'avril. La Température maximale atteint les 34.00 °C au mois d'aout et la température minimale atteint les 9.52 °C au mois de février. Après analyse de l'histogramme nous ne constatons que la température dans la station de Harreza moins élevée par rapport station de Khemis Miliana à cause de la présence d'un microclimat causé par les eaux de barrage (Boudjenane and Maarouf, 2015).

II.7 Contexte géologique

II.7.1 Cadre général

La plaine de Khemis-Miliana correspond à une zone déprimée à sédimentation récente mio-plio-quaternaire. Elle est traversée d'Est en Ouest par l'Oued Chélif qui entre La plaine par le seuil de Djendal et en sort par celui du Doui. La partie nord de la plaine est dominée par une ligne des reliefs que forme le Djebel Gontas (871m), le massif des Zaccar (1579m et 1532m) et des Arib, elle appartient au tell septentrional. La partie sud est limitée par les premiers contreforts de l'Ouarsenis, elle appartient au tell méridional. Les épitements jurassico-primaires des Zaccar, Doui et Arib constituent l'autochtone épi métamorphique à schistosité anté-nappe sur lequel repose l'allochtone caractérisé par des nappes de charriage à

matériel crétacé. Ces nappes venant du nord se sont mises en place au Miocène inférieur. Cette plaine correspond à un sillon intra montagneux subsidant dans lequel l'érosion des reliefs environnants et les transgressions successives ont permis les dépôts de fortes épaisseurs de sédiments néogènes et quaternaire.

II.7.2 Cadre local

La plaine d'El Khemis est une dépression de remplissage alluvionnaire formée de deux compartiments séparés par un seuil dont l'axe passe à côté d'Oued Souffay et dans la partie Sud-est qu'il est repéré. Ce seuil dû à une remontée du substratum Crétacé traduit l'avancée des terrains crétacés vers le centre de la plaine à l'Ouest d'Oued Deurdeur. Le compartiment est appartient au bassin miocène de Médéa dans lequel les formations grésos conglomératique du Miocène ont bien développées. Le compartiment ouest est de sédimentation déférente (grés, poudingues, schistes, marnes).

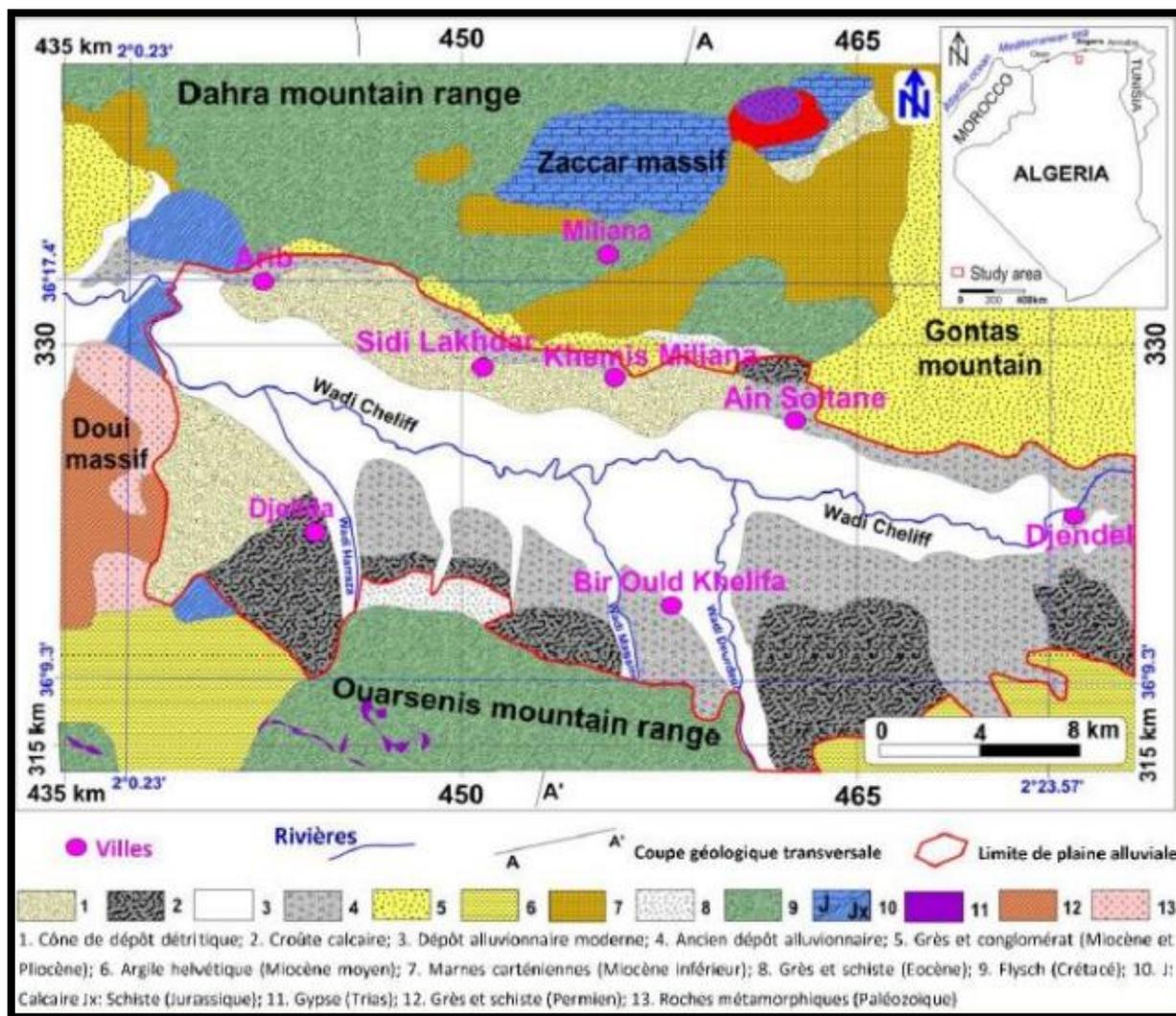


Figure 13 : carte géologique de la plaine de Haut Cheliff (Perrodon, 1957).

II.8 Litho-stratigraphie

A partir de la coupe transversale effectuée dans la plaine on peut observer du haut en bas :

- Le Crétacé inférieur, imperméable et s'étalant sur toute la largeur de la plaine. Il a servi comme un fond étanche lors de la réalisation du barrage de Ghrif.
- Les dépôts alluvionnaires de l'oued Chélif, en premier lieu ; étant en contact avec la formation argileuse du Miocène, ils forment une couche d'alluvions argileuses d'une épaisseur de 32m.
- Les dépôts alluvionnaires grossiers de l'oued Chélif proprement dit ; avec des épaisseurs pouvant dépasser les 70m, ils forment l'aquifère le plus important de la région.

Présentation de la zone d'étude

- À la bordure de l'oued, le contact argileux du Miocène et les dépôts alluvionnaires forment des lentilles d'alluvions argileuses.
- Finalement, un couvrement limoneux surmonte le tout ; observé essentiellement au centre de la plaine, il rend l'aquifère captive dans quelques endroits.
- Les terrains affleurant au niveau de la zone d'étude sont constitués de la base au sommet par une succession des étages montres ci-dessous :
- ❖ **Crétacé** : Le Crétacé affleure sur les pourtours de la dépression du Cheliff où il est formé la base au sommet par :
 - Le Néocomien : Qui affleure au niveau des flancs Nord et Ouest du Zaccar, où il est formé par une puissante série d'argile de schistes et grès schisteux d'une épaisseur de 800 à 1000 mètres. Dans la région de Bou Maad, cette série est surmontée par les calcaire zoogénies d'une épaisseur de 10 à 30 mètres.
 - L'Albo- Aptien : Est formé par des terrains à faciès flysch affleurant au Nord de la zone d'étude. Il est constitué par une série de 1000 mètres d'épaisseur, représentée par des schistes plissés alternant avec des bancs de quartzites.
 - Le Cénomaniens- Vraconien : D'une épaisseur de 20 à 60 mètres constitué par une série de calcaires noirs alternant avec des marno-calcaires. Au Sud de la région étudiée, le Cénomaniens -Vraconien montre à la base des calcaires et des schistes phosphatés.
 - Le Sénonien : Qui a été décrit au Nord Est du col des Righas où il est représenté par des marnes à rognons e calcaires et es intercalations de bancs de calcaires et marnes.
 - L'Oligo-Eocène : Il est formé par une série nummulitique affleurant au Nord de la vallée du Chéiff, constituée essentiellement par 100 mètres des schistes bariolés à nodules siliceux, degrés et de quartzite (Dekkiche & Mezaour, 2019).
- ❖ **Miocène** : Il est constitué de la base au sommet par :
 - Le Burdigalien : Qui est constitué par des calcaires à polypiers dont les affleurements sont bien visibles à l'Est de Le vacher où l'épaisseur atteint les 1000 mètres environ. Le toit du Burdigalien est constitué par des marnes dites cartésiennes d'une épaisseur de 100 à 300 mètres.
 - Le Vindobonien : Comprend de bas en haut
 - Une série de calcaires à lithothamnium rognon eux affleurant à l'Est de la région d'étude.

Présentation de la zone d'étude

- Des grès et poudingues constitués de sables friables bien développés à l'Est e la plaine.
- Des argiles dites helvétiques, d'une épaisseur de 200 mètres affleure dans la partie nord-ouest du secteur et passant dans la partie supérieure aux grès de Gontas par l'intermédiaire d'assises gréseuses.
- Des grès et poudingues du Gontas composés de grès sableux et de bancs de poudingues discordant sur le Crétacé et peut être sur le Burdigalien. Au Nord d'Ain Soltan, cette série montre une épaisseur de 100 mètres (Dekkiche & Mezaour, 2019).

❖ **Mio-Pliocène :**

- Des grès, des poudingues, des argiles détritiques discordant sur le Vindobonien. Entre El-Khemis et Littré, cette série s'enfouit sous les alluvions anciennes de la plaine de Chélif où elle a été traversée sur plus de 100 mètres d'épaisseur par des sondages.
- Des travertins déposés par un écoulement ancien des sources du Zaccar et montrant des épaisseurs dans les environs de la localité de Miliana (Dekkiche & Mezaour, 2019).

❖ **Quaternaire ancien :**

- Une carapace calcaire, compacte recouvrant indifféremment tous les terrains, et bien développée au niveau de la bordure Sud de la plaine de Chélif
- Des alluvions anciennes correspondant aux niveaux supérieurs de la terrasse qui domine de plus de 20 m la vallée de l'oued Ebda, et aux niveaux inférieurs mieux cimentés une épaisseur de 50 mètres dominants les cônes de déjection.

❖ **Quaternaire récent :**

- Des alluvions récentes constituées par de cailloutis avec des bancs d'argiles et de limons, couverts par un sol organique.
- Les éléments des cônes de déjection des vallées atlastiques mélangés aux limons provenant par l'intermédiaire des apports du Chélif.
- Des alluvions et limons, en partie Eoliens, occupant les hautes vallées dans la dépression située au sommet di Zaccar Gharbi.
- Les éboulis de pente, en grande partie constitués de calcaires ou schisto quartziteux de la série de Zaccar contenant des fragments de taille variable plus ou moins consolidés. Ils formaient d'épaisses carapaces masquant le substratum (Dekkiche & Mezaour, 2019).

Présentation de la zone d'étude

Epaisseur (m)	Log	Lithologie	Age	Comportement Hydrogéologique
10 à 20		Limons et argiles	Quaternaire récent	Semi-perméable
100		Alluvions grossières (grès et poudingues)	Quaternaire ancien	Perméable
		Alluvions argileuses (sables, graviers, argiles)		
100		Argiles	Pliocène	Imperméable
		Grès et conglomérats		Perméable
100		Grès et poudingues		Perméable
200		Argiles	Miocène supérieur (Vindobonien)	Imperméable
		Grès et poudingues		Perméable
?		Calcaires	Miocène inférieur (Burdigalien)	Perméable
300		Marnes		Imperméable
1000		Grès et poudingues		Perméable
20		Calcaires	Eocène	Perméable
?		Grès quartzitiques		Perméable
		Argiles et schistes		Imperméable
?		Marnes et calcaires marneux	Senouien	Imperméable
20 à 60		Calcaires et marnes calcaire	Cénomannien	Imperméable
1000		Schistes et bancs quartzites	Crétacé	Imperméable
800 à 1000		Argiles schisteuses	Néocomien	Imperméable
1000		Calcaires	Jurassique	Perméable
?		Gypse et argiles	Trias	Semi-perméable
500		Schistes et quartzites	Permo-Trias	Imperméable

Figure 14 : Log litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine alluviale de Khemis Miliana (Mattauer 1658, Perrodon 1967).

II.9 Contexte hydrogéologique

L'aquifère principal de la plaine du Haut-Cheliff est formé de dépôts alluvionnaires, y compris des formations de galets, de gravier, de sable et d'argile, dont l'épaisseur peut atteindre 150 m.

C'est un aquifère localement confiné, car il est recouvert de limon et d'argile en surface, de 5 à 20 m d'épaisseur au centre de la plaine. Nord-est du mont Gontas et au Sud-est de la ville de Djendel. Dans cette zone, plusieurs puits et forages ont été forés et ont montrés une bonne qualité des eaux souterraines et qui peuvent atteindre 200 m de profondeurs (Bouderbala, 2017).

Le système aquifère dans cette plaine peut être considéré comme des systèmes aquifères multicouches. La continuité hydraulique entre l'aquifère alluvial et l'aquifère du Mio-Pliocène n'existe que dans les limites de la plaine où il y a un contact entre les deux aquifères sans couche imperméable entre eux ; Cependant, au centre de la plaine, il y a une couche d'argile épaisse entre les deux aquifères. Nous notons ici que nous nous intéressons uniquement à l'aquifère alluvial quaternaire

Les eaux souterraines de cet aquifère alluvial s'écoulent vers le centre de la plaine où se situe l'axe de drainage principal, qui coïncide avec l'oued Cheliff, avec un écoulement principal d'est en ouest. La profondeur de la nappe phréatique varie de 5 m. Dans la zone ouest (près des villes de Djelida et Arib) à 30 m dans la zone est (près de la ville de Djendel), tandis que dans la partie centrale de la plaine la profondeur des nappes phréatiques est d'environ 10 m (Bouderbala & Gharbi, 2017).

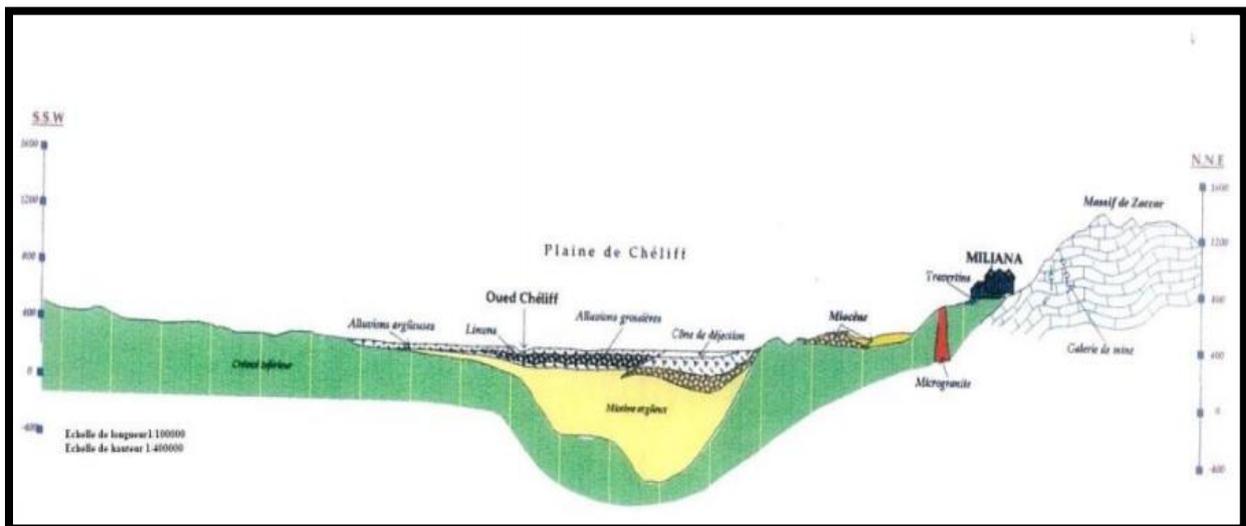


Figure 15 : Coupe hydrogéologique de la plaine de Haut Cheliff (Dekkiche & Mezaour, 2019).

Matériels et méthodes

III. Matériels et méthodes

III.1 Collecte des données

39 échantillons représentatifs des eaux souterraines sont collectés à partir de différents locations (localisation) dans la plaine à vocation agricole de Khemis-Miliana durant plusieurs campagnes de mesure de (2002,2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016).

La méthodologie adoptée pour le calcul des paramètres physicochimiques et les ratios des indices propices à l'irrigation est la méthode classique. Les concentrations des ions sont converties de milligramme /L au meq/L pour calculer les différents ratios. Le software diagramme est utilisé pour le calcul de la balance ionique ($\pm 10\%$).

Le R et Excel sont employés pour les descriptions statistiques et la conception du modèle (ANN).

La distribution spatiale des cartes des paramètres et ratio d'irrigation sont établis à l'aide de logiciel Arc GIS.

Les statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques sont calculées et représenté dans le tableau (2)

Tableau 2. Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana.

variable	Mean	Min	Max	S.Déviaton
-PH	10.42	7.3	7.9	5.36
-EC	2845.37	908	5652	912.16
-Ca	232.7	120.26	336.51	44
-Mg	94.13	39.98	182.78	22.30
-Na	192.65	56.60	467.5	79.45
-K	4.10	0.83	10.44	1.63
-Cl	538.9	149.88	1588.13	200.77
-So4	320.2	111	682.4	88.74
-Hco3	285.8	160	449	33.29
-No3	59.8	12	133.4	16.07

III.2 Hydrochimie et spatialisation des paramètres

III.2.1 Détermination de quantité en réaction en meq/L

Le rapport de la quantité de réaction est calculé par :

$$r = \frac{c \times v}{M}$$

r : Quantité de réaction en meq/l

V: Valence en réaction

M: Masse molaire

C : Concentration en mg/l

La fiabilité des données hydrogéochimique a été étudié à partir d'une vérification du bilan ionique d'abord une analyse des ions majeur été faite intervenant dans l'évaluation du bilan ionique lorsque la balance ionique est inférieur ou égale 10 on peut dire que l'analyse est représentatif. Automatique les balances ionique de chaque échantillons ont été vérifié ou : l'erreur sur la balance ionique est donnée en pourcentage elle est calculer par :

$$(BI\%) = 100 \times \left| \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{anions} - \sum \text{cations}} \right|$$

- Σ cations : Somme des cations majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent.
- Σ anions : Somme des anions majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent. (best mémo)

III.2.2 Spatialisation Hydrogéochimique

Dans l'étude présente, nous avons adoptés une plate-forme du SIG qui s'appelle Arc GIS, qui nous a permis à cartographier, collecter, analyser et traiter toutes des données sur la qualité des eaux que nous avons.

L'inclusion de certains modules dans l'Arc GIS, tel que spatial analyst a permis de faire les interpolation spatiales de plusieurs paramètres, une base de données a été créé sous l'Arc catalog. Les cartes ont été générées par interpolation IDW- Pondération par l'inverse de distance. Les informations normalisées ont été utilisées comme entrée du réseau, dans lequel le logiciel normalise les informations. La normalisation des données garantit un traitement et une convergence rapides pendant la formation et minimise l'erreur de prédiction. Les données d'entrée et de sortie (données brutes) ont été normalisées avant d'être soumises à la formation et au test en transformant les données dans la plage 0-1 à l'aide de l'équation : (Wagh, Panaskar, Muley, et al. 2016)

$$\hat{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

III.2.3 Aptitude des eaux à l'irrigation

L'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dépend de l'effet des constituants minéraux de l'eau sur les plantes et les sols.

Les critères généraux pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation sont : la concentration totale en sel mesurée par CE, les proportions relatives de Na⁺ exprimées par le %Na, le SAR, le MAR, salinité potentiel, rapport de Kelly, indice de perméabilité, indice chloro-Alcaline.

Les critères de qualité de l'eau peuvent être utilisés comme lignes directrices par les agriculteurs pour choisir les pratiques de gestion appropriées pour surmonter le risque potentiel de salinité, si la qualité de l'eau disponible pose un problème pour l'irrigation (Ramesh & Elango, 2012).

➤ Classification selon le SAR

Est exprimé par l'équation suivante :

$$(\text{SAR}) = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2}$$

Tous les ions sont exprimés en meq/L.

- ❖ SAR < 10 l'eau est Excellent.
- ❖ 10 < SAR < 18 l'eau est Bonne.
- ❖ 18 < SAR < 26 l'eau est utilisable.
- ❖ SAR > 26 l'eau est mauvais (Rawat, Singh, et al. 2018).

➤ Classification selon le pourcentage de sodium :

La concentration du sodium dans l'eau d'irrigation est également connue sous le nom de pourcentage de sodium est données par l'expression suivante :

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}}{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na})} \times 100$$

- ❖ Na < 20 l'eau est Excellente.
- ❖ 20-40 Bonne.
- ❖ 40-60 Acceptable.
- ❖ 60-80 Douteux.
- ❖ > 80 Inappropriés (Sheikhy, Ramli, et al. 2015).

➤ Classification selon le MAR

Une concentration élevée de Mg^{2+} est généralement due à la présence de Na^+ échangeable dans les sols irrigués. L'équation 6 a été suggérée par (Doneen 1964) pour spécifier le risque de magnésium pour l'eau d'irrigation :

$$(MAR) = \frac{Mg^{2+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$$

- ❖ $MAR < 50\%$ indique l'aptitude de l'eau pour l'irrigation (Sheikhy, Ramli, et al 2015)

➤ Classification selon l'indice de perméabilité

Doneen (1964) et l'OMS (1989) ont donné un critère pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation sur la base de l'IP, où les concentrations sont exprimées en meq/l.

$$IP = \frac{(Na + \sqrt{HCO_3})}{(Ca + Mg + Na)} \times 100$$

- ❖ Classe 1 : $>75\%$ Excellente pour l'irrigation.
- ❖ Classe 2 : 25-75 % Bonne pour l'irrigation.
- ❖ Classe 3 : $<75\%$ Mauvaise pour l'irrigation (Ramesh & Elango, 2012).

➤ Classification selon le rapport de Kelly

Il peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Toutes les concentrations sont exprimées en meq/L

Les valeurs KR inférieures 1 à indiquent une aptitude à l'irrigation, et celles supérieures à 1 indiquent que les eaux ne conviennent pas à l'irrigation (Karakuş & Yıldız, 2020).

➤ Classification selon Chloro-Alcaline

Il est calculé par la formule suivante :

$$CA = Cl^- - \frac{(Na^+ + K^+)}{Cl^-}$$

- ❖ $CAI < 0$ Approprié.
- ❖ $CAI > 0$ Inapproprié (Rawat, Singh, et al. 2018).

Résultat et discussion

IV. Résultat et discussion

IV.1 Classification des eaux souterraines

On a plusieurs méthodes de classifications des eaux souterraines. Dans notre étude on s'intéresse à la méthode de **Kurlov's** pour déterminer le faciès hydrogéochimiques des eaux de la région. Les principaux faciès rencontrés dans la zone sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3. Faciès chimiques des eaux souterraines rencontrés dans la plaine de Khemis Miliana.

ID	X	Y	Faciès
W084/105	414614.87	4012843.49	Chloruré sodique et magnésien
W084/166	415448.1764	4009056.068	Chloruré bicarbonaté calcique magnésien et sodique
W84/125	415750.5244	4009805.178	Chloruré calcique et magnésien
W084/154	429437.9515	4005612.222	Chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/129	413806.4267	4011711.381	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/143	431783.121	4004054.895	Chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/127	414101.5674	4010160.302	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/57	429470.9282	4008162.208	chloruré sulfaté calcique sodique et magnésien
W084/139	432535.0121	4004652.627	chloruré sulfaté calcique magnésique et sodique
W084/155	429035.4696	4004813.483	chloruré sodique et calcique
W084/169	415090.0015	4006457.062	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/314	427608.2373	4012118.114	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/107	420316.3123	4014791.074	chloruré sulfaté calcique sodique et magnésien
W084/63	425108.1624	4005725.708	Chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/73	426110.0626	4012722.875	Chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/72	427458.3538	4012168.624	Chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/196	420571.3764	4016390.353	Bicarbonaté chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/91	420561.9592	4013390.213	chloruré sulfaté et calcique
W084/140	431536.2784	4005055.731	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/110	414063.2884	4013910.692	chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W084/311	428982.9412	4004013.644	chloruré sodique calcique et magnésien
W084/12	435487.7059	4005493.388	Chloruré calcique
W084/22	436938.4813	4005738.905	chloruré sulfaté calcique sodique et magnésien
W084/14	435504.9323	4004593.35	chloruré calcique et magnésien
W084/39	434557.1686	4011746.444	chloruré sulfaté calcique et magnésien
W084/309	436354.0711	4010740.778	chloruré sodique et calcique
W084/80	421948.414	4009035.742	chloruré sulfaté calcique sodique et magnésien
W084/92	420515.1371	4014390.449	chloruré bicarbonaté calcique et sodique
W084/08	435196.03	4006528.9	chloruré calcique et sodique
W084/81	421252.251	4010287.965	chloruré calcique et sodique
W084/310	429338.73292	4005862.56902	chloruré calcique sodique et magnésien
W084/93	422265.79482	4014584.95796	chloruré sulfaté bicarbonaté calcique et magnésien
W084/185	430099.36498	4009260.32405	chloruré sulfaté calcique et sodique
W084/115	419748.48000	4007477.06000	chloruré sulfaté magnésien calcique et sodique
W084/56	429402.38000	4008596.96000	chloruré sulfaté calcique et sodique

W084/182	417210.30000	4011335.26000	Chloruré sulfaté calcique magnésien et sodique
W085/6	444746.52111	4008289.60117	chloruré calcique magnésien et sodique
W085/9	446287.08965	4005259.81762	chloruré calcique sodique et magnésien
W085/20	450298.34000	4007181.87000	chloruré calcique sodique et magnésien

D'après les analyses hydrochimique des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana nous constatons que le faciès le plus dominant c'est le faciès : chloruré sulfaté calcique et magnésien qui est distribué dans la partie centrale et la partie aval de la région.

IV.2 Les indices de pollutions

- **Chlorure** : l'origine du chlorure dans les eaux souterraines peut provenir de diverses sources telles que l'altération, le lessivage des roches sédimentaires et des sols, l'intrusion d'eau salée, le sel transporté par le vent dans les précipitations, les rejets de déchets domestiques et industriels, les effluents municipaux...etc. (Sarath Prasanth, et al. 2012). La limite souhaitable de chlorures est spécifiée à 250 mg/L. Dans notre étude les concentrations de chlorures varie entre (149-1587), on a constaté que dans la majorité de la plaine, la concentration de chlorure est excellente compris entre (149-250) dans la partie amont et dans le nord centrale (Khemis Miliana et Sidi Lakhdar). La concentration de chlorure en chlorure est supérieure à la limite maximale autorisée au sud de la région et à l'ouest à côté de la ville des Aribis.
- **Les Nitrates** : la concentration souhaitable de nitrate selon les normes Algériennes est (45mg/L). Pour la zone d'étude on a observé que la partie ouest centrale la concentration de nitrate est excellente varie entre (12-29), et elle est bonne dans la majorité de la plaine. Dans la partie amont de la région la concentration de chlorure est supérieure à la limite autorisée.

- **Les Sulfates :** la teneur élevée de sulfate peuvent être s'expliquer de la région d'étude dont l'observation de cette augmentation de concentration en sulfate à la région de Djelida d'où les concentrations dépassent les 200 mg/L, par rapport à la partie amont et aval ou la distribution de sulfate est bonne avec des valeurs de concentration qui ne dépassent pas les normes Algériennes.

Résultat et discussion

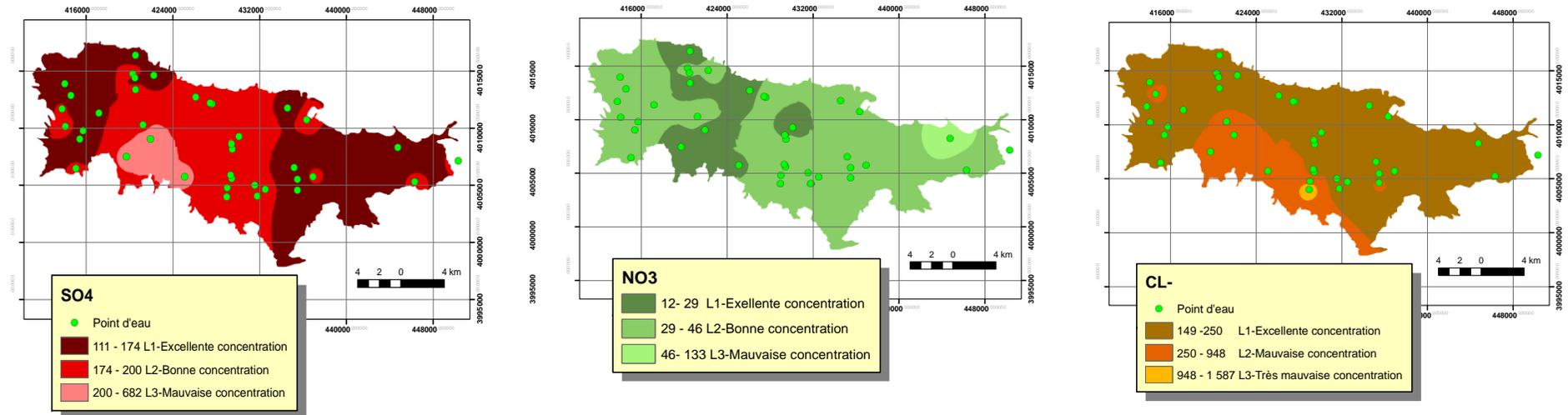


Figure 16 : Répartition spatiale des éléments anionique des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

IV.3 La distribution spatiale des indices d'aptitude des eaux à l'irrigation

Les cartes de répartition spatiales de la qualité des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana ont été établies à partir d'une base de données de différentes valeurs d'indice de qualité de ces eaux telles que l'indice de perméabilité, le rapport de Kelly, Rapport d'adsorption de sodium, Rapport d'adsorption de magnésium, pourcentage de sodium, chloro-Alcaline, un total 38 échantillons repartaient sur la surface de la plaine, ont été analysé et utilisé dans notre étude :

- ❖ L'analyse de la carte de répartition des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana « Rapport d'adsorption de magnésium » nous permis de constater que les eaux de très bonne qualité (Excellent) de niveau 1 couvre la partie N-E et la partie EST on allant vers l'amont à proximité de (Djendel- Khemis Miliana et sidi Lakhdar). Aussi sur la partie S-E de la plaine on trouve les eaux d'excellente qualité sur la partie Sud-ouest et la partie Nord-Ouest de la plaine. Les eaux de bonne qualité de niveau 2 occupe la partie sud centrale à proximité de (Bir Oueld Khelifa) et presque la totalité de la partie de la plaine on parlant du N-W et S-W. Pour les eaux de mauvaise qualité de niveau 3 dont le rapport d'absorption du magnésium et entre 50-60 occupe le centre sud de la plaine on allant vers l'aval et une partie du N-W vers l'aval.
- ❖ L'analyse de la carte de répartition spatial de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana élaboré à partir de Rapport de Kelly montre que les eaux d'excellentes qualité du 1^{er} niveau dont le rapport est entre 0.2 et 0.4 couvre la partie de Nord centre couvrant (sidi Lakhdar, Arib et Khemis Miliana) et on allant vers le sud-ouest. A la limite ouest de Djelida allant vers l'Est une partie de sud-est est occupé par les eaux d'excellente qualité, ces eaux se trouvent aussi dans la partie N-E de la plaine à la limite ouest de Djendel. Les eaux de bonne qualité du niveau 2 dont le rapport de Kelly est entre 0.4 et 0.6 occupe la partie central de la plaine et la partie extraire allant vers l'amont EST à la limite S-E de Djendel. Ces eaux couvre aussi la partie extraire Ouest allant vers l'aval. Une partie de sud central à la proximité de Bir Oueld Khelifa est occupé par des eaux de qualité du niveau 4 dont le rapport de Kelly est supérieur à 1. On allant vers l'aval une petite partie est occupée par des eaux de niveau 3.
- ❖ Ce qui concerne l'analyse de la carte de répartition spatiale de la qualité des eaux souterraines établir à partir des valeurs du l'indice de perméabilité à montrer que les eaux de qualité douteuse niveau 1 dont l'indice de perméabilité est compris entre 27 et 37 couvre une petite partie du centre de la plaine. On allant vers le sud se trouve les eaux de même type. La partie centrale de la plaine couvrant Bir Oueld Khelifa est occupé aussi par les eaux de bonne qualité niveau 3. Les eaux dont la qualité est acceptable niveau 2 ou l'indice de perméabilité est de 37 à 47 sont repartaient sur la partie S-E à la limite EST de Bir Oueld Khelifa et on allant vers le N-E couvrent (Djendel) et aussi Nord centrale qui couvre toute la commune de Khemis

Résultat et discussion

Miliana. Une partie du sud à la limite EST et OUEST de Djelida et occupé par ce type d'eau. Le même type d'eau occupe une partie de la plaine en allant vers le Nord- Ouest. Les eaux de bonne qualité niveau 3 dont l'indice de perméabilité est entre 47-56 couvre la partie extrême ouest de la plaine qui couvre (Arib), aussi et la limite ouest de (Sidi Lakhdar).

- ❖ L'analyse de la carte de répartition spatiale de qualité des eaux souterraines élaborées à partir des valeurs de Pourcentage de sodium montre que presque la totalité de la plaine de Khemis Miliana est occupé par des eaux de bonne qualité niveau 2 dont le pourcentage de sodium est entre 20-40%. Les eaux d'excellente qualité de niveau 1 ou le pourcentage de sodium est compris entre 16-20 se trouvent au Nord de la plaine vers l'Ouest au côté Ouest de Sidi Lakhdar. Les eaux dont le pourcentage de sodium est de 40-60(acceptable) occupent une petite partie du centre sud et aussi petite partie en allant vers l'aval.

- ❖ L'analyse de la carte de répartition spatiale de qualité des eaux souterraine établie à partir des valeurs de Rapport d'absorption de sodium qui nous a pu constater les eaux d'excellente qualité. L'analyse de la carte de la répartition spatiale de l'indice de rapport d'absorption de sodium montre que la partie aval et la partie amont de la région d'étude est affecté par d'excellente qualité niveau 1. Les eaux de bonne qualité couvre la partie sud centrale de la plaine de Khemis Miliana. Les eaux d'une qualité acceptable et douteuse sont distribuées au niveau de sud centrales près de Bir Oueld Khelifa et à l'est de la plaine vers l'amont à la proximité de la ville des Arib.

- ❖ Après l'analyse de la carte représentant la répartition spatiale des eaux souterraines de l'indice de qualité d'irrigation Chloro-Alcaline dans la plaine de Khemis Miliana, nous remarquons que tous les échantillons analysés sont de mauvaise qualité en dégradation. La qualité de niveau 1 peu mauvais varie entre (3-17) couvrent la majorité de la plaine de l'est (Djelida), au centre (Khemis Miliana et Sidi Lakhdar) vers l'ouest (la ville des Arib). Les eaux de mauvaise qualité niveau 2 compris (17-30) sont bien observé au sud central de la plaine à la limite de (Bir Oueld Khelifa) et une petite partie vers l'aval à la proximité de la ville des Arib. Pour la qualité niveau 3 très mauvaise couvrent une petite partie dans le sud central à côté de la plaine de Bir Oueld Khelifa.

Résultat et discussion

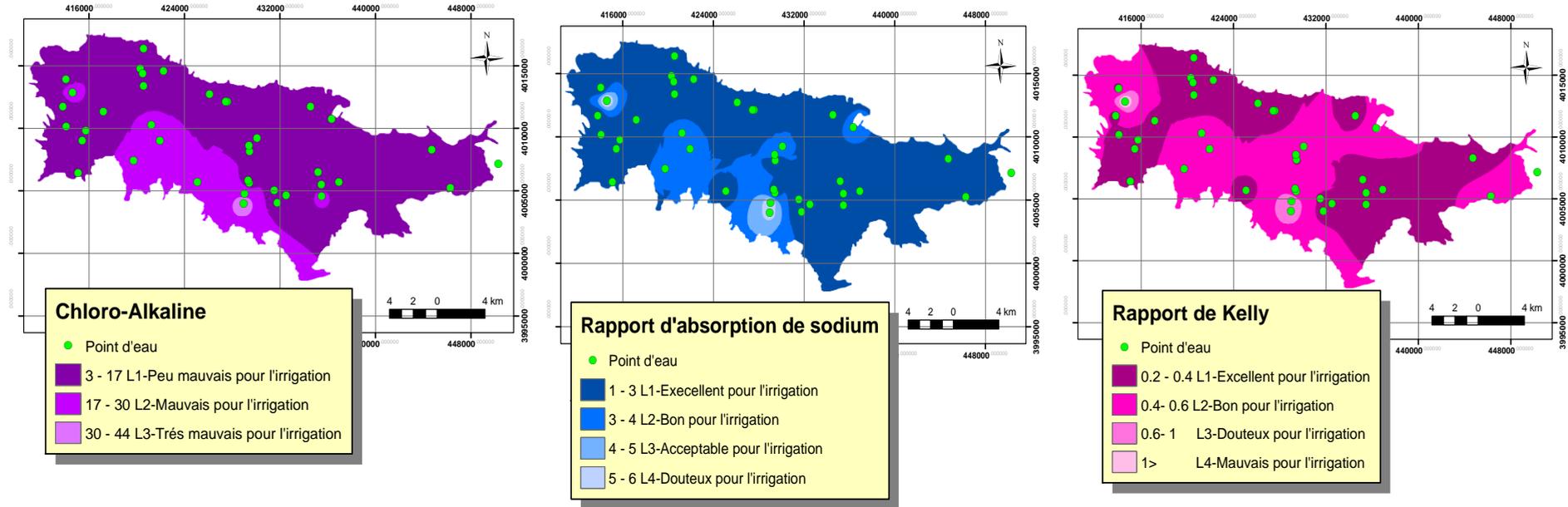


Figure 17 : Répartition spatiale des indices d'aptitude des eaux à l'irrigation normalisée (CA-RAS-RK) dans la plaine de Khemis Miliana.

Résultat et discussion

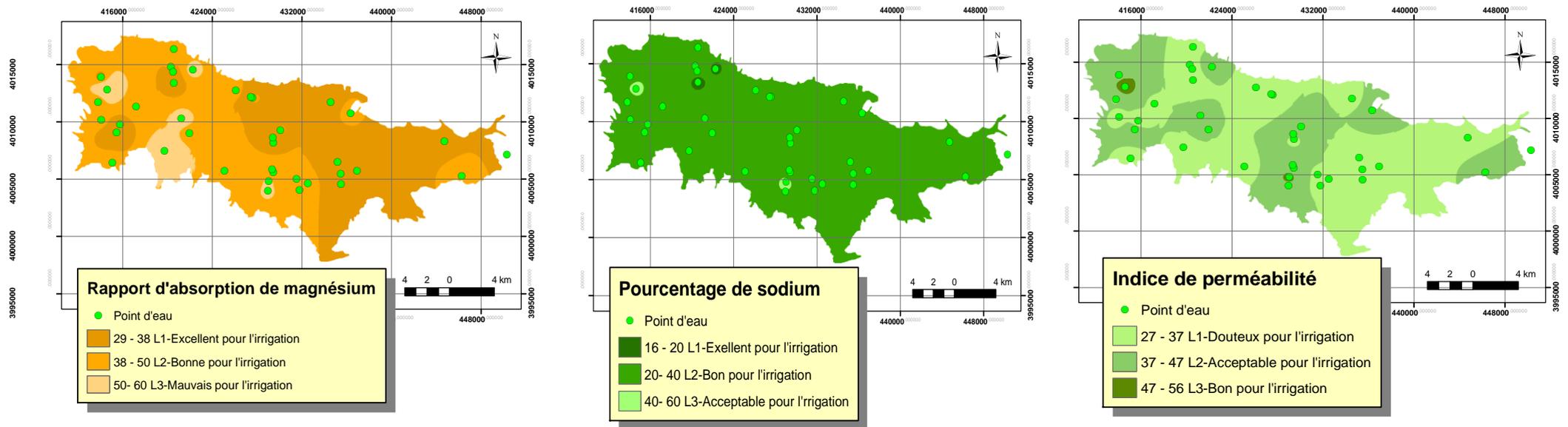


Figure 18 : Répartition spatiales des indices d'aptitude des eaux à l'irrigation normalisée (MAR-PNa-IP) dans la plaine de Khemis Miliana.

IV.4 La comparaison

On comparant les cartes de répartition spatiales de la qualité d'indices d'irrigations des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana, ces indices ont été établis à partir d'une base de données de différentes valeurs d'indice de qualité, ces données ont été normalisées avant d'être soumise à la formation et au test en transformant les données dans la plage 0-1 :

Nous constatons que les indices SAR, MAR, KI, CAI, a la proche de 0 la qualité de l'eau devienne appropriés pour l'irrigation, par contre l'indice de perméabilité, a la proche de 0 la qualité de l'eau devienne inappropriés pour l'irrigation.

Résultat et discussion

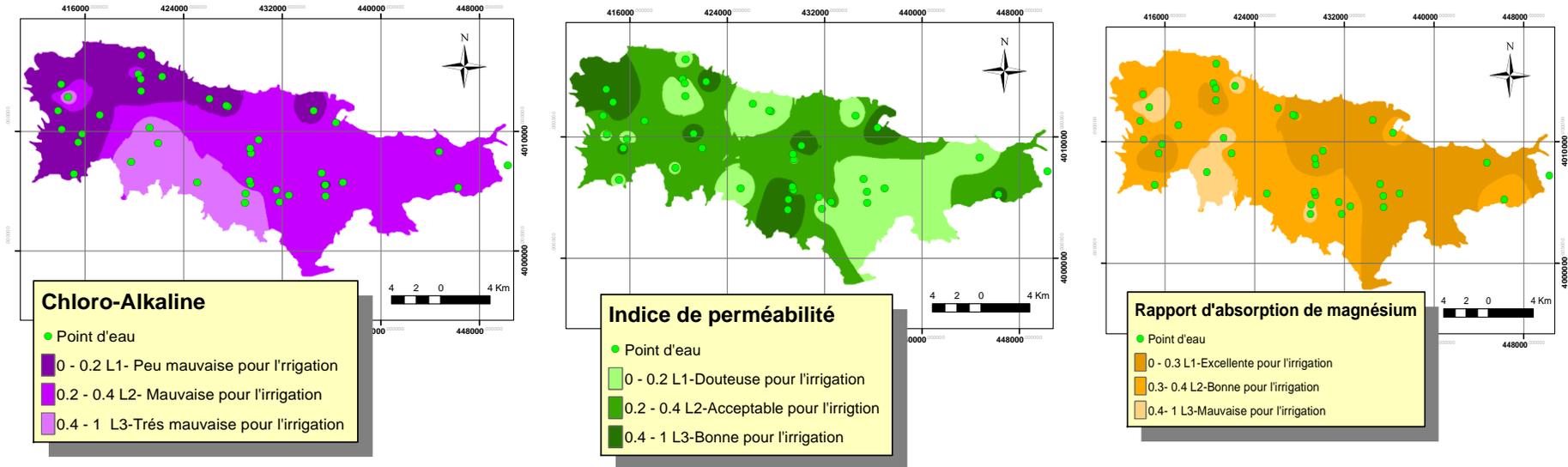


Figure 19 : Répartition spatiale des indices d'aptitude des eaux à l'irrigation normalisés dans la plaine de Khemis Miliana.

Résultat et discussion

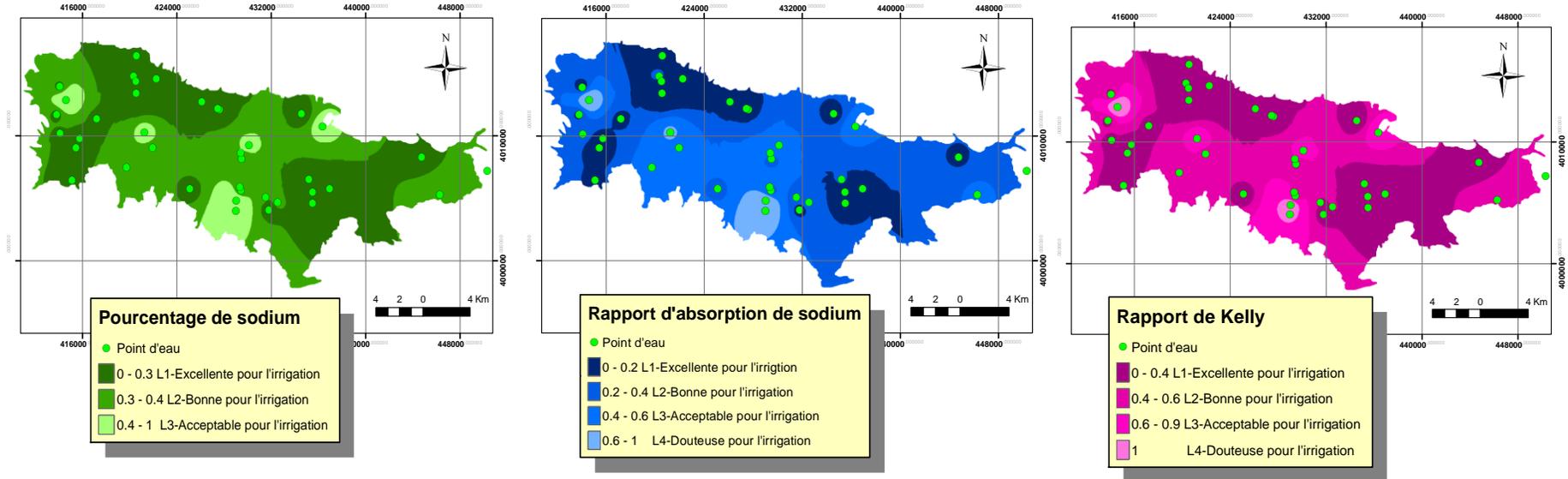


Figure 20 : Répartition spatiale des indices d'aptitude à l'irrigation normalisée dans la plaine de Khemis Miliana.

IV.5 Approche cartographique de la qualité de l'eau souterraine à l'irrigation

Des paramètres tels que SAR, KI, Na% et PI..... Ont été calculés pour déterminer l'adéquation de la qualité de l'eau souterraine de la zone de d'étude pour l'irrigation. En plus de ces paramètres, les valeurs IWQI pour toutes les points d'eau ont été évaluées à l'aide des paramètres EC, Na, Cl et HCO₃ (**tableau 04**). La qualité de l'eau d'irrigation de la zone d'étude a été classée en termes de paramètres EC, SAR, KI, Na%....., PI et IGWQI sur la base des intervalles de valeurs standard donnés dans **le tableau 05** et des classifications précédentes de l'eau d'irrigation ([Shabbir et Ahmad 2015](#) ; [Seth et al. 2015](#), [Meireles et al. 2010](#), [Zahedi 2017](#), [Omran 2012](#)).

Résultat et discussion

Tableau 4. Résultat de calcul des paramètres d'aptitude à l'irrigation.

ID	X	Y	Na	CL	HCO3	EC	SAR
W084/105	414614.87	4012843.49	20.335	30.575	7.358	4410	6.4135
W084/166	415448.1764	4009056.068	4.051	6.55	4.6003	1531	1.736
W84/125	415750.5244	4009805.178	6.4095	6.86	5.308	1725	2.023
W084/154	429437.9515	4005612.222	6.06	12.218	4.447	3429	2.042
W084/129	413806.4267	4011711.381	5.874	7.455	4.869	2236	2.047
W084/143	431783.121	4004054.895	5.786	12.087	4.381	2285	1.947
W084/127	414101.5674	4010160.302	7.543	6.032	4.634	1527	2.377
W084/57	429470.9282	4008162.208	6.952	15.847	4.098	2690	2.224
W084/139	432535.0121	4004652.627	7.521	16.04	4.497	2876	2.448
W084/155	429035.4696	4004813.483	22.445	28.356	4.942	4897	6.479
W084/169	415090.0015	4006457.062	6.299	12.324	4.406	3512	2.136
W084/314	427608.2373	4012118.114	6.551	12.631	4.964	3572	2.178
W084/107	420316.3123	4014791.074	9.859	18.281	4.844	2046	2.889
W084/63	425108.1624	4005725.708	9.163	20.736	6.842	3960	2.443
W084/73	426110.0626	4012722.875	6.529	11.415	3.802	2954	2.053
W084/72	427458.3538	4012168.624	6.357	11.27	5.6902	2561	1.973
W084/196	420571.3764	4016390.353	2.863	4.227	4.267	1428	1.214
W084/91	420561.9592	4013390.213	3.404	8.572	4.471	2117	1.167
W084/140	431536.2784	4005055.731	6.831	12.968	3.781	3495	2.293
W084/110	414063.2884	4013910.692	4.056	8.165	5.011	1666	1.711
W084/311	428982.9412	4004013.644	22.521	44.79	2.622	5652	5.448
W084/12	435487.7059	4005493.388	4.088	12.885	2.622	1585	1.492
W084/22	436938.4813	4005738.905	7.035	14.126	4.375	2216	2.254
W084/14	435504.9323	4004593.35	6.524	19.441	3.612	2934	1.973
W084/39	434557.1686	4011746.444	5.704	10.921	4.413	2465	1.927
W084/309	436354.0711	4010740.778	10.852	16.314	4.664	2300	3.669
W084/80	421948.414	4009035.742	13.037	25.557	4.711	4628	3.491
W084/92	420515.1371	4014390.449	3.302	6.205	4.583	1577	1.339
W084/08	435196.03	4006528.9	7.264	16.442	4.201	2628	2.344
W084/81	421252.251	4010287.965	14.253	22.776	4.642	3800	4.075
W084/310	429338.73292	4005862.56902	8.782	14.727	4.556	3998	2.944
W084/93	422265.79482	4014584.95796	2.592	4.801	3.585	1359	1.099
W084/185	430099.36498	4009260.32405	9.582	14.314	4.393	3061	3.273
W084/115	419748.48000	4007477.06000	13.458	27.49	5.586	4884	3.428
W084/56	429402.38000	4008596.96000	12.745	18.157	5.803	3960	3.591
W084/182	417210.30000	4011335.26000	5.704	10.921	4.249	2982	2.015
W085/6	444746.52111	4008289.60117	6.803	14.953	5.604	2 706	2.171
W085/9	446287.08965	4005259.81762	9.265	16.882	4.695	908	2.979
W085/20	450298.34000	4007181.87000	7.545	14.866	4.184	2 410	2.505

Tableau 5. Classification de qualité d'aptitude des eaux à l'irrigation

L'indice d'irrigation	Qualité de l'eau
SAR	<10 Excellent 10<18 Bon 10<SAR<26 Utilisable SAR>26 Mauvais
Na%	Na<20 Excellent 20-40 Bon 40-60 Acceptable 60-80 Douteux >80 Mauvais
MAR	<50 Appropriés >50 Inappropriés
CAI	<0 Appropriés >0 Mauvais
PI	>75% Excellent 25-75% Bon <25% Mauvais
KI	<1 Appropriés >1 Inappropriés

➤ Rapport d'absorption de sodium (SAR)

Ce paramètre a été initialement proposé par Richards (1954), et il est utilisé pour évaluer la tendance des ions Na à l'adsorption sur le sol, et la tendance des niveaux de cations dissous à entrer dans les régions d'échange de cations dans le sol. Des concentrations élevées de sodium affectent la perméabilité du sol et ont un effet direct sur la salinité totale de l'eau. Cela indique que de telles concentrations peuvent être toxiques pour les produits délicats (González-Acevedo, et al. 2016). La détection du risque de salinité dépend des mesures de conductivité électrique. Le concept de SAR est utilisé pour la détection d'un risque probable de sodium (Almeida, et al. 2008). Le SAR est calculé à l'aide de l'Éq. 1 (Richards 1954).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Résultat et discussion

Les valeurs SAR des points d'eau situés dans la zone de recherche variaient entre 0.21 et 6.5 meq/l. Les valeurs SAR obtenues ont montré que presque tous les échantillons reçus des stations d'eau d'irrigation sont de « bonne » classe de qualité d'eau d'irrigation (**tableau 4**).

➤ Rapport de Kelly (KI)

Les concentrations de Na, Ca et Mg dans l'eau représentent un risque alcalin (Dhembare, 2012). Pour le calcul du paramètre KI, la concentration de Na est mesurée par rapport à Ca et Mg, et dans la plupart des eaux, Ca et Mg préservent leur état d'équilibre. KI est calculé en utilisant l'équation. 2 (Kelley, 1940).

$$KI = \frac{Na}{Ca + Mg}$$

Les valeurs de KI obtenues variaient entre 0.20 et 1,37 meq/. Selon les valeurs de KI obtenues, les échantillons de 38 stations d'eau d'irrigation sont dans la classe « appropriée » et 1 station d'eau d'irrigation est classée comme « non appropriée » (**tableau 4**).

➤ Pourcentage de sodium (Na%)

La quantité de sodium dans l'eau d'irrigation est généralement définie comme Na%. La concentration de sodium dans l'eau induit l'échange d'ions Ca²⁺ et Mg²⁺. Ce processus d'échange réduit à son tour la perméabilité du sol, ce qui entraîne un mauvais drainage interne. De par sa réactivité avec le sol, le sodium est considéré comme un ion important pour la classification de l'eau d'irrigation, et il réduit la perméabilité (Vasanthavigar, et al. 2010 ; Ishaku, et al. 2011). Na% est utilisé pour déterminer la qualité de l'eau à des fins agricoles. L'eau d'irrigation avec un pourcentage élevé de Na provoque un retard de croissance chez les plantes (Mohammed, et al. 2015). Na% est déterminé par le calcul de la proportion relative de tous les cations disponibles dans l'eau (Eq. 3) (Ishaku, et al. 2011).

$$Na\% = \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} \times 100$$

Les valeurs de Na% variaient entre 16.51 et 50,12 meq/l (tableau 1). Comme indiqué par les valeurs Na% obtenues, 75 % des échantillons d'eau reçus des stations d'eau d'irrigation sont dans la catégorie « excellent », 21,87 % dans la catégorie « bon » et 3,12 % dans la catégorie « acceptable » (**tableau 4**).

➤ Indice de perméabilité (PI)

Cet indice a été développé par Doneen (1964) pour déterminer l'aptitude de l'eau à l'irrigation et classe les eaux en Classe 1 (PI > 75 %), Classe 2 (25 % < PI < 75 %) et Classe 3 (IP < 25 %). Les eaux de classe 1 et de classe 2 sont classées comme « bonnes » et « appropriées » avec leur perméabilité maximale plus élevée (Rahman, et al. 2014). La

perméabilité du sol est affectée par la quantité d'ions Na, Mg, Ca et HCO₃ dans le sol. PI est calculé à l'aide de l'équation. 4 (Ghazaryan & Chen, 2016).

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$$

IV.6 Indice de qualité de l'eau d'irrigation

Dans cette étude, l'indice de qualité de l'eau souterraine à l'irrigation (IGWQI), développé en deux étapes par (Meireles, et al. 2010), a été appliqué. L'IGWQI est un paramètre sans dimension compris entre 0 et 100. Il est donné par l'équation suivante :

$$IWQI = \sum_{i=1}^n q_i \times w_i$$

Où **qi** est la qualité du paramètre et **wi** est le poids standardisé attribué à chaque paramètre. Dans la première étape, les paramètres qui contribuent à la variabilité de l'irrigation ont été identifiés en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse factorielle (AF). Dans la deuxième étape, l'IGWQI a été défini et les valeurs qi et wi ont été estimées pour chaque paramètre utilisé dans le calcul de l'indice selon les critères d'eau d'irrigation fournis par le Comité des consultants de l'Université de Californie (UCCC) et les critères établis par Ayers et Westcott (1999) (tableau 06).

Tableau 6. Valeurs limites de la qualité des paramètres.

q_i	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SAR (meq/L) ^{1/2}	Na ⁺ (meq/L)	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
85–100	200 ≤ EC < 750	2 ≤ SAR < 3	2 ≤ Na < 3	1 ≤ Cl < 4	1 ≤ HCO ₃ < 1.5
60–85	750 ≤ EC < 1500	3 ≤ AR < 6	3 ≤ Na < 6	4 ≤ Cl < 7	1.5 ≤ HCO ₃ < 4.5
35–60	1500 ≤ EC < 3000	6 ≤ SAR < 12	6 ≤ Na < 9	7 ≤ Cl < 10	4.5 ≤ HCO ₃ < 8.5
0–35	EC < 200 or EC ≥ 3000	SAR < 2 or SAR ≥ 12	Na < 2 or Na ≥ 9	Cl < 1 or Cl ≥ 10	HCO ₃ < 1 or HCO ₃ ≥ 8.5

Source: Meireles et al. (2010)

Le paramètre de qualité qi est donné par la formule suivante :

$$q_i = q_{imax} - \left[(x_{ij} - x_{inf}) \times q_{iamp} \right] / q_{amp}$$

Où **qimax** est la valeur maximale de qi pour la classe, **xij** est la valeur observée pour le paramètre, **xinf** est la valeur correspondante de la limite inférieure de la classe à laquelle

Résultat et discussion

appartient le paramètre x_{iamp} est l'amplitude de classe, et x_{amp} est l'amplitude de classe auquel appartient le paramètre.

Le poids du paramètre (w_i) utilisé dans l'IGWQI a été obtenu par l'ACP/FA, par la somme de tous les facteurs multipliés par l'explicabilité de chaque paramètre. Ensuite, les valeurs w_i (**tableau 07**) ont été normalisées de telle sorte que leur somme soit égale à un, selon l'équation suivante (Meireles, et al 2010) :

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^k F_j A_{ij}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n F_j A_{ij}}$$

Où w_i est le poids du paramètre, F est la composante 1 auto évaluée, A_{ij} est l'explicabilité du paramètre i par le facteur j , i est le nombre de paramètres physico-chimiques et chimiques sélectionnés par le modèle, et j est le nombre de facteurs sélectionnés dans le modèle.

Tableau 7. Pondérations pour les paramètres de l'indice IGWQI.

Parameters	w_i
Electrical conductivity (EC)	0.211
Sodium (Na^+)	0.204
Chloride (Cl^-)	0.194
Bicarbonate (HCO_3^-)	0.202
SAR	0.189
Total	1.00

Source: Meireles et al. (2010)

Les subdivisions en classes de qualité de l'eau souterraine à l'irrigation ont été établies sur la base de l'IGWQI (**tableau 06**). Les classes ont été définies en tenant compte du risque de problèmes de salinité, de réduction de la perméabilité des sols et de toxicité pour les plantes comme indiqué dans les classifications établies par Bernardo (1995), Holanda et Amorim (1997) et Meireles et al. (2010).

L'analyse spatiale de certains rapports (MH et PI) et des paramètres utilisés pour le calcul de l'IGWQI (Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , EC et SAR) a été effectuée en créant des rasters en utilisant la méthode d'interpolation spatiale IDW.

Résultat et discussion

Tableau 8. Valeurs calculés de $Q_i \cdot W_i$ de chaque ainsi que l'indice final IGWQI

id	X	Y	QiWi_of_Na	QiWi_Cl	QiWi_Hco3	QiWi_SAR	QiWi_EC	IGWQI
W084/105	414614.87	4012843.49	5.5998	4.42708	11.9483	11.31543	3.936205	37
W084/166	415448.1764	4009056.068	17.27676	16.3445	12.11394	6.63579	12.55097	65
W84/125	415750.5244	4009805.178	12.21348	4.42708	12.07152	18.62519813	11.86875	59
W084/154	429437.9515	4005612.222	12.23592	5.8879	16.99426	18.698691	5.7603	60
W084/129	413806.4267	4011711.381	17.1666	11.61284	12.09778	18.766755	10.071726	70
W084/143	431783.121	4004054.895	17.17272	5.90342	17.2407	3.788505	9.8994	54
W084/127	414101.5674	4010160.302	12.14616	16.373988	12.11192	18.88677	12.56505	72
W084/57	429470.9282	4008162.208	17.10132	15.30272	17.01446	18.89244	4.18483	72
W084/139	432535.0121	4004652.627	12.1482	5.58914	16.99022	18.21393	7.82106	61
W084/155	429035.4696	4004813.483	5.42232	4.60362	12.09374	11.31165	2.7226	36
W084/169	415090.0015	4006457.062	12.22164	5.88402	16.99628	18.70533	6.12462	60
W084/314	427608.2373	4012118.114	12.20532	5.86074	12.09172	18.39537	5.97692	55
W084/107	420316.3123	4014791.074	6.47904	5.40872	12.09778	16.379685	10.7399	51
W084/63	425108.1624	4005725.708	6.5382	5.21278	11.98062	17.644095	5.0218	46
W084/73	426110.0626	4012722.875	12.20736	5.95774	17.03264	18.749745	7.5467666	61
W084/72	427458.3538	4012168.624	12.21756	5.96938	12.04728	6.61689	8.92881	46
W084/196	420571.3764	4016390.353	20.38776	16.47642	17.00436	6.67548	15.07384	76
W084/91	420561.9592	4013390.213	17.31552	11.54882	16.99224	6.67926	10.49021	63
W084/140	431536.2784	4005055.731	12.189	5.83358	17.03264	18.069345	6.166475	59
W084/110	414063.2884	4013910.692	17.27472	11.5721	12.08768	6.63579	12.0762	60
W084/311	428982.9412	4004013.644	5.4162	3.29024	17.10334	15.92892	0.85666	43
W084/12	435487.7059	4005493.388	17.27472	5.84522	17.10334	6.65469	12.36108	59
W084/22	436938.4813	4005738.905	12.17676	5.74046	16.9983	18.17991	10.14206	63
W084/14	435504.9323	4004593.35	12.20736	5.31754	17.04274	6.61689	7.6171	49
W084/39	434557.1686	4011746.444	17.177616	5.99654	16.99628	6.62067	9.266416	56
W084/309	436354.0711	4010740.778	6.3954	5.56586	12.1099	16.0272	9.84666	50
W084/80	421948.414	4009035.742	6.2118	4.82672	12.10586	16.03665	3.3774	43
W084/92	420515.1371	4014390.449	17.32164	16.3639	12.11394	6.66603	12.389216	65
W084/08	435196.03	4006528.9	12.16248	5.55616	17.0185	17.92476	8.6932	61
W084/81	421252.251	4010287.965	6.1098	5.04982	12.1099	16.03854	5.4156	45
W084/310	429338.7329	4005862.569	12.07272	5.69196	12.11596	16.22376	4.92825	51
W084/93	422265.7948	4014584.958	20.37756	16.44344	17.04476	6.68493	13.6517	74
W084/185	430099.365	4009260.324	6.50148	5.72494	16.99628	16.04799	7.23483	53
W084/115	419748.48	400777.06	6.17712	4.67346	12.05536	16.03098	2.74722	42
W084/56	429402.38	4008596.96	6.23628	5.41842	12.04122	18.341505	5.0218	47
W084/182	417210.3	4011335.26	17.177616	5.99654	17.00638	18.857475	7.4483	66
W085/6	444746.5211	4008289.601	12.19104	5.6745	12.05334	18.415215	8.4189	57
W085/9	446287.0897	4005259.818	6.529632	5.52124	12.10788	16.124535	16.8237	57
W085/20	450298.34	4007181.87	12.14616	5.68226	17.01042	17.468325	9.45983	62

Tableau 9. Limites de la qualité d'aptitude des eaux à l'irrigation.

Restriction d'utilisation de l'eau	Recommandation Sol	Recommandation Plant
Aucune restriction (NR)	Peut être utilisé pour la majorité des sols avec une faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité, étant recommandé le lessivage dans les pratiques d'irrigation, sauf dans les sols avec une perméabilité extrêmement faible	Aucun risque de toxicité pour la plupart des plantes
Faible restriction (LR)	Recommandé pour une utilisation dans les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, étant recommandé pour la lixiviation du sel. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde, il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile	Évitez les plantes sensibles au sel
Restriction modérée (MR)	Peut être utilisé dans les sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant suggéré pour une lixiviation modérée des sels.	Les plantes ayant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées
Restriction élevée (HR)	Peut être utilisé dans des sols à haute perméabilité sans couches compactes. Un programme d'irrigation à haute fréquence doit être adopté pour les eaux dont la CE est supérieure à 2 000 dS m ⁻¹ et le SAR supérieur à 7,0.	Plantes avec une tolérance modérée à élever aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau avec de faibles valeurs de Na ⁺ , Cl ⁻ et HCO ₃ ⁻
	Il faut éviter son utilisation pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, peut être utilisé occasionnellement. L'eau avec de faibles niveaux de sel et un DAS élevé	Uniquement les plantes à haute tolérance au sel, à l'exception des eaux avec des valeurs extrêmement faibles de Na ⁺ , Cl ⁺ et HCO ₃

Résultat et discussion

Restriction sévère (SR)	nécessite l'application de gypse. À haute teneur en sel, les sols aquatiques doivent avoir une perméabilité élevée et un excès d'eau doit être appliqué pour éviter l'accumulation de sel.	
Restriction d'utilisation de l'eau	Recommandation Sol	Recommandation Plant
Aucune restriction (NR)	Peut être utilisé pour la majorité des sols avec une faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité, étant recommandé le lessivage dans les pratiques d'irrigation, sauf dans les sols avec une perméabilité extrêmement faible	Aucun risque de toxicité pour la plupart des plantes
Faible restriction (LR)	Recommandé pour une utilisation dans les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, étant recommandé pour la lixiviation du sel. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde, il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile	Évitez les plantes sensibles au sel
Restriction modérée (MR)	Peut être utilisé dans les sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant suggéré pour une lixiviation modérée des sels.	Les plantes ayant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées
Restriction élevée (HR)	Peut être utilisé dans des sols à haute perméabilité sans couches compactes. Un programme d'irrigation à haute fréquence doit être adopté pour les eaux dont la CE est supérieure à 2 000 dS m ⁻¹ et le SAR supérieur à 7,0.	Plantes avec une tolérance modérée à élever aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau avec de faibles valeurs de Na ⁺ , Cl ⁻ et HCO ₃ ⁻
	Il faut éviter son utilisation	

Restriction sévère (SR)	pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, peut être utilisé occasionnellement. L'eau avec de faibles niveaux de sel et un DAS élevé nécessite l'application de gypse. À haute teneur en sel, les sols aquatiques doivent avoir une perméabilité élevée et un excès d'eau doit être appliqué pour éviter l'accumulation de sel.	Uniquement les plantes à haute tolérance au sel, à l'exception des eaux avec des valeurs extrêmement faibles de Na^+ , Cl^+ et HCO_3
-------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

IV.7 Réseau de neurones artificiels (ANN)

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) utilisent la structure de modélisation d'un réseau de neurones qui est une technique très puissante pour modéliser des relations non linéaires complexes dans des cas particuliers où la relation entre les variables n'est pas claire (Smith, 1994).

La structure d'un modèle ANN se compose généralement de trois couches. Il s'agit de la couche d'entrée où les données entrent dans le modèle et sa somme pondérée est calculée, la couche cachée intermédiaire où les données sont traitées et la couche de sortie où les résultats ANN sont générés (Fig. 4). Chaque couche est constituée d'un ou plusieurs éléments de base appelés neurone ou nœud. Chaque neurone représente une fonction algébrique à laquelle est affecté un paramètre avec des valeurs limites. (Dryfus, et al. 2002).

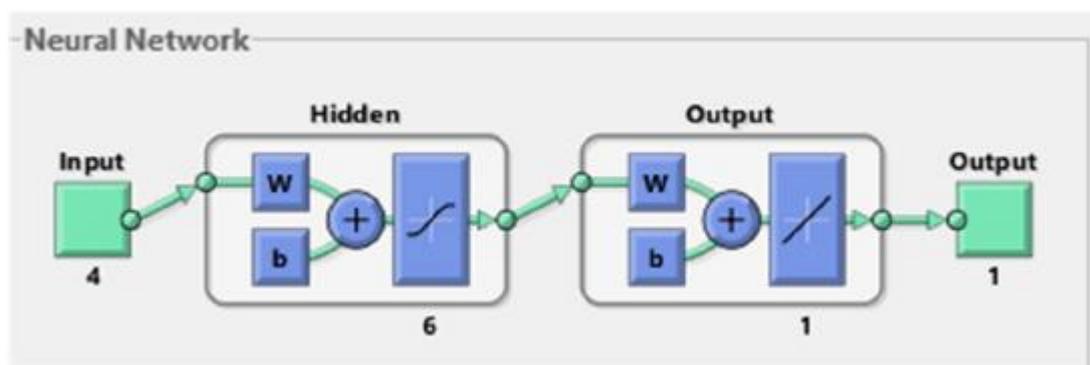


Figure 21 : Architecture ANNs

Dans cette étude, l'ANN a été utilisé pour l'estimation de l'IGWQI en utilisant LES paramètres SAR, KI, PI et Na% parmi les paramètres de qualité de l'eau d'irrigation (Figure 22).

Résultat et discussion

Le nombre optimal de neurones et les itérations d'entraînement dans la couche cachée sont des indicateurs importants dans la modélisation ANN. Aucun algorithme spécifique n'est disponible pour déterminer le nombre optimal de neurones dans la couche cachée, et cette valeur doit être déterminée sur une base d'essais et d'erreurs (Alizadeh & Kavianpour, 2015). Le nombre de couches cachées est déterminé en fonction de la complexité du problème, et dans la plupart des cas une seule couche cachée suffit pour modéliser un problème (Rezvan, et al. 2016).

L'application de l'ANN a été réalisée à l'aide d'un algorithme développé dans la plateforme MATLAB et R pour la sélection du nombre minimum de composants principaux utilisés comme entrée, en plus du nombre de neurones dans la couche cachée qui donne le modèle ANN optimal. La structure ANN proposée est illustrée à la **figure 22**.

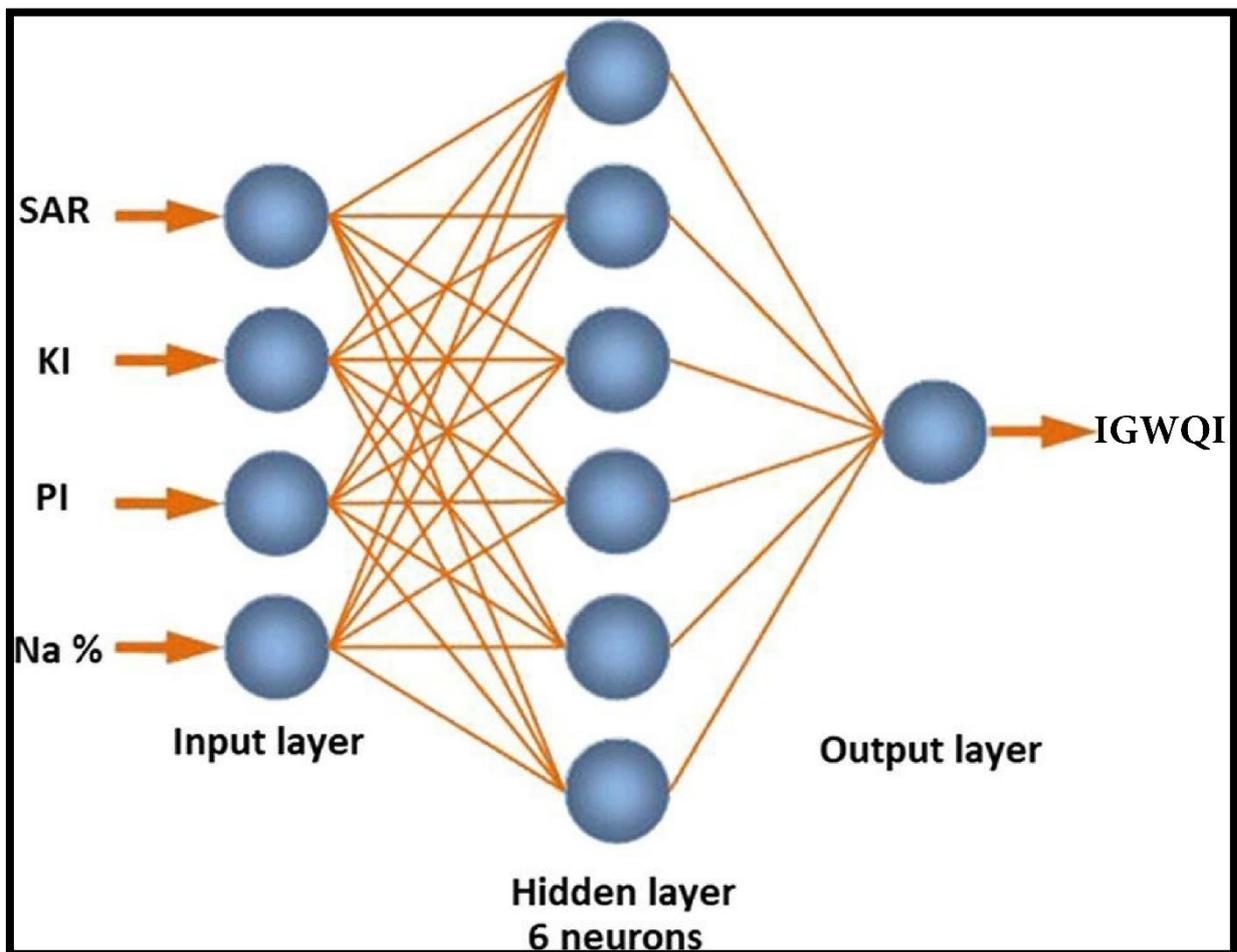


Figure 22 : structure du Model ANNs

Les données d'entraînement, de validation et de test du modèle ANN avec l'estimation optimale sont illustrées à la **Figure 23**. Les performances statistiques des modèles ont été évaluées à l'aide de paramètres statistiques tels que μ , SE, et R². De plus, RMSE et MAPE entre les données prédites ANN et les données réelles sont utilisés pour évaluer la qualité des

Résultat et discussion

modèles développés. Les performances statistiques sont données dans le **tableau 10**. RMSE, MAPE et R2 sont souvent utilisés comme critères dans les études de réseaux de neurones pour comparer et évaluer les erreurs et les données reçues (Alves, et al. 2018). RMSE et MAPE sont calculés à l'aide des équations :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - z_i)^2}$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(t_i - z_i)|}{z_i} \times 100$$

Où "ti" et "zi" sont la sortie prédite et réelle, et "n" est le nombre de points dans l'ensemble de données.

Tableau 10. Performances statistiques des modèles ANNs.

Modèle	Structure	R ²	σ	SE	μ	RMSE	MAPE
I	4-3-1-1	0.722	0.093	5.265	1.020	5.653	5.85
II	4-4-1-1	0.856	0.067	3.632	0.973	3.897	2.97
III	4-5-1-1	0.836	0.072	4.263	1.063	3.365	4.78
IV	4-6-1-1	0.921	0.053	3.156	1.017	1.223	2.92

Comme le montre le **tableau 10**, une relation significative est évidente entre les valeurs observées dans les modèles construits. Cependant, 4-6-1-1 s'impose comme le meilleur modèle en termes de R2 et SE.

De plus, une valeur RMSE faible indique une bonne performance du modèle. La valeur MAPE est une valeur statistique non biaisée utilisée pour mesurer la capacité d'estimation d'un modèle. La valeur MAPE la plus basse indique la meilleure performance du modèle.

La corrélation entre les résultats d'estimation du modèle ANN conçu et les résultats calculés indiciellement a été utilisée pour évaluer les performances de modélisation ANN qui sont utilisées comme un moyen efficace. Le graphique des valeurs IWQI calculées par rapport à celles estimées avec ANN est illustré à la **figure 23**.

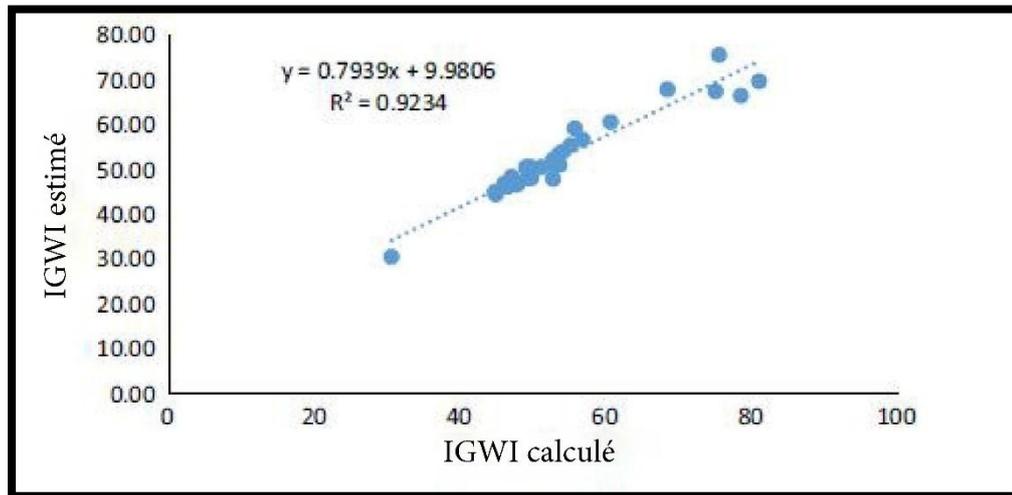


Figure 23 : les données d'entraînement, de validation et de test.

Comme indiqué, les résultats estimés du modèle ANN conçu ont été comparés aux données calculées et ils se sont avérés être en bon accord. ANN a prouvé être une méthode efficace pour la modélisation IGWQI (Irrigation Groundwater Quality Index) avec des valeurs élevées de R^2 (R^2 = formation (0,99), test (0,98) et validation (0,95)). L'efficacité du modèle ANN est déterminée sur la base de la maximisation de R^2 et de la minimisation de la valeur MSE de l'ensemble de test (les neurones 1 à 20 correspondent à la couche cachée). Pour les modèles ANN optimaux dans le graphique d'erreur quadratique moyenne minimale (MSE).

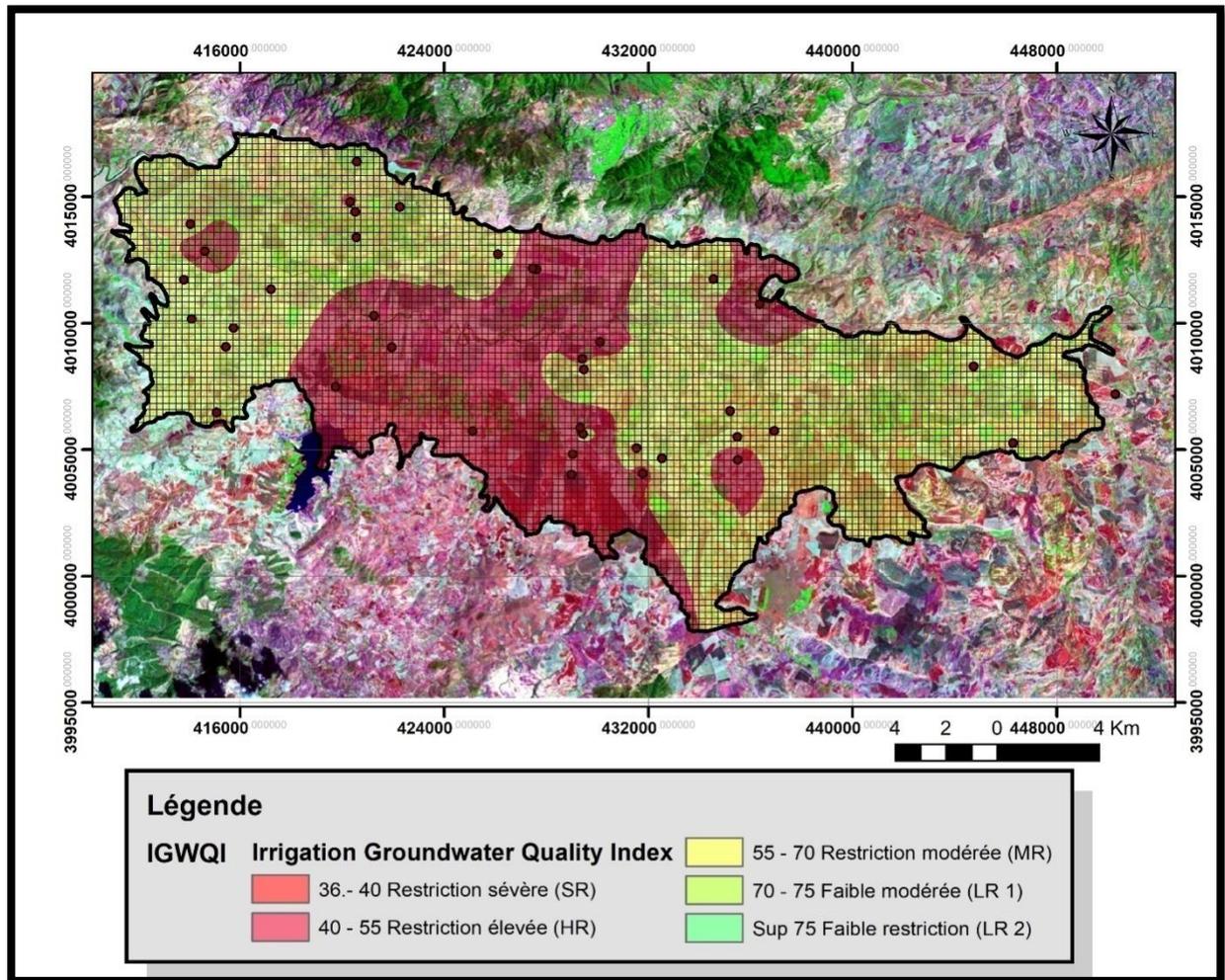


Figure 24 : Carte de la répartition spatiale de l'indice d'irrigation des eaux souterraines.

IV.8 Analyse de régression multiple (ARM)

L'analyse de régression multiple définit deux ou plusieurs variables indépendantes pour décrire les variations d'une variable dépendante. Dans cette recherche, SAR, KI, Na% et PI ont été utilisés comme variables indépendantes et IGWQI a été utilisé comme variable dépendante. Une analyse de régression multiple a été effectuée pour définir la relation entre l'IGWQI et quatre variables indépendantes. Les variables statistiques étudiées sont présentées dans le **tableau 11**.

Tableau 11. Statistiques des variables étudiées.

	SAR	KI	Na%	PI	IGWQI
Max	6.47652	1.0109	50.1223	56.989	75.9916
Min	1.09907	0.200109	16.5175	27.0427	36.0386
Standard déviation	1.7365	0.3654	11.2365	9.3265	10.3265
Skewness	3.2654	2.8973	1.6325	-0.4532	1.0365
Kurtosis	15.365	10.02356	2.4565	- 0.4265	1.3256

Résultat et discussion

La confirmation du modèle a été faite en tenant compte du test (F), du test (t) et des coefficients de corrélation. Les résultats statistiques sont donnés dans le **tableau 12**. La signification de la valeur R^2 peut être déterminée via le test t en supposant que toutes les variables présentent une distribution normale et que les observations sont sélectionnées au hasard. Le test compare la valeur t calculée avec l'hypothèse nulle et la valeur t tabulée. La valeur critique de (t) a été obtenue à $\pm 1,57$, car le niveau de fiabilité a été choisi à **95 %**. Si la valeur t calculée est supérieure à

Tableau 12. Résultats statistiques.

Valeur indépendante	Valeur dépendante	R^2	R^2 Ajusté	Coeff non standardisé	Standard error	F calculé	F tabulé	Sign
SAR	IGWQI	0.65	0.596	-5.3564	5.4567	10.23	0.59	0.000
KI				-37.235	43.2354			
PI				1.7896	0.6354			
Na%				-0.1315	0.1632			

Valeur indépendante	T calculé	Valeur t tabulée	Sig
SAR	-0.96987	+/- 15.7	0.313265
KI	-0.85645		0.468972
PI	2.365456		0.012354
Na%	-0.75698		0.356987

La valeur t tabulée, l'hypothèse nulle est alors rejetée. Cela indique que R est significatif. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée dans les cas où la valeur t calculée est inférieure à la valeur t tabulée. Dans de tels cas, R est considéré comme non significatif

Comme indiqué dans le tableau 5, les valeurs (t) calculées sont supérieures aux valeurs t tabulées; ainsi, R est considéré comme significatif. R^2 est déterminé à 0,65, et il existe un niveau de signification moyen (**p 0,05**). De plus, la valeur F calculée est supérieure à la valeur F tabulée. En conséquence, l'hypothèse nulle est rejetée ; ainsi, on peut en déduire qu'il existe une relation réelle entre les variables dépendantes et indépendantes.

IV.9 Analyse de la carte d'IWQI

L'analyse de la carte de répartition spatiales de l'indice d'irrigation des eaux souterraine de la plaine alluviale de Khemis Miliana (**Figure 24**) a été réalisée à partir d'une base de données de différentes valeurs telle que SAR, KR, PI et Na%, et prédite par l'ANN a montré que :

L'analyse de la carte finale a montré que la majorité des eaux souterraines de la zone étudiée est caractérisée par une bonne aptitude à l'irrigation, la partie amont et la partie centrale- présente une très bonne qualité presque sur toute la superficie, sauf la partie sud-est de Bir Oueld Khelifa et la partie Nord-est de la ville de Khemis Miliana qui présente une mauvaise qualité d'irrigation. La partie centrale de la plaine présente une qualité d'aptitude mauvaise à très mauvaise. Tandis que la partie aval de l'Oued Cheliff (Ain Defla et Arib) est caractérisée par des eaux de bonne à excellente aptitude.

Conclusion générale

Cette étude vise à déterminer l'aptitude des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana à l'irrigation à l'aide des indices paramétriques en estimant un indice global l'IGWQI à l'aide de méthodes ANN et de régression multiple.

Les indices paramétriques SAR, Na%, KI, PI et IGWQI ont été évalués, cartographiés et analysés. Du point de vue hydrogéochimique, l'application de la méthode de Kurlov's nous a permis d'identifier un faciès dominant chloruré sulfaté calcique-sodique et un faciès magnésien occupant la partie amont et aval de la plaine. Les indices paramétriques d'aptitude des eaux à l'irrigation tels que (SAR), (MAR), (PI), (Na%), (KR), (CAI) et (IGWQI global) ont été proposés pour classer l'eau en fonction de son aptitude à être utilisée pour l'irrigation. C'est l'indice (SAR MAR PI Na% KR CAI) qui a été formulé à base de données de 8 éléments chimiques analysés dans 39 échantillons pour les années (2002-2016) l'IGWQI a été établie à l'aide d'une base de données de Na⁺ HCO₃⁻, Cl⁻, SAR et EC.

L'analyse de la carte finale a montré que la majorité des eaux souterraines de la zone étudiée est caractérisée par une bonne aptitude à l'irrigation, la partie amont et la partie centrale- présente une très bonne qualité presque sur toute la superficie, sauf la partie sud-est de Bir Oued Khelifa et la partie Nord-est de la ville de Khemis Miliana qui présente une mauvaise qualité d'irrigation. La partie centrale de la plaine présente une qualité d'aptitude mauvaise à très mauvaise. Tandis que la partie aval de l'Oued Cheliff (Ain Defla et Arib) est caractérisée par des eaux de bonne à excellente aptitude.

Il a été conclu à la suite de cette recherche que, l'estimation de la valeur IGWQI sur la base de différents paramètres de qualité de l'eau est possible grâce à l'utilisation de l'ANN et de l'analyse de régression multiple. R² a été trouvé à 0,6 par régression multiple, et le R² optimal a été trouvé à 0,92 par le modèle ANN. De plus, la valeur F calculée s'est avérée supérieure à la valeur F tabulée; ainsi, l'hypothèse nulle est rejetée et une relation réelle entre les variables dépendantes et indépendantes est déduite. Les valeurs estimées à l'aide du modèle ANN avec des paramètres statistiques et les valeurs IGWQI calculées se sont avérées cohérentes.

Cette étude a prouvé que le réseau neuronal est plus efficace pour la prédiction de la qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation, il est aussi applicable pour mesurer plus facilement l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, et peut être envisagé par les autorités locales pour une meilleure gestion des ressources en eaux.

Références Bibliographiques

- ABBASNIA, Abbas, RADFARD, Majid, MAHVI, Amir Hossein, *et al.* Groundwater quality assessment for irrigation purposes based on irrigation water quality index and its zoning with GIS in the villages of Chabahar, Sistan and Baluchistan, Iran. *Data in brief*, 2018, vol. 19, p. 623-631.
- Achraf, HENTATI. Modélisation de la qualité des eaux de Sidi Salem. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondie En « Modélisation en Hydraulique et Environnement ». Ecole National D'ingénieurs de Tunis 2003.
- Adimalla, N., Li, P., & Venkatayogi, S. (2018). Hydro geochemical evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and integrated interpretation with water quality index studies. *Environmental Processes*, 5(2), 363-383
- Aissa, Hadj Kaddour. *Évaluation des performances des techniques RNA et ELM utilisées dans le développement des capteurs logiciels pour la surveillance de la qualité de l'eau*. Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2017.
- Alizadeh, M. J., & Kavianpour, M. R. (2015). Development of wavelet-ANN models to predict water quality parameters in Hilo Bay, Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1–2), 171–178.
- AMINA, Mir et KHAOULA, Retima. Estimation de la réserve d'eau souterraine de l'aquifère alluvial de Khemis Miliana à l'aide les techniques de géomodélisation. 2019.
- Antonopoulos VZ, Gianniou SK, Antonopoulos AV (2016) artificial neural networks and empirical equations to estimate daily evaporation: application to lake Vegoritis, Greece. *Hydrol Sci J* 61:2590– 2599
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bernardo S (1995) *Manual de irrigacao*, 4th edition, Vicosa: UFV, 488 p
- Bong, N., & Meziani, S. (2013). Application des SIG et de technique de spatialisation pour l'identification, l'évaluation et le développement des ressources, en eau souterraine de la plaine de Khemis Miliana. (Mémoire de Master université, de Khemis Miliana).
- BOUABDELLAH, Labdi et ABDELFETTAH, Bourekiza. Evaluation des zones potentielles d'eaux souterraines, en utilisant l'analyse spatiale, SIG et les Techniques MCDA, plaine de khemis Miliana. 2018.
- BOUAROU DJ, Sara. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation. 2012.

- Bouderbala, A. (2017). Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain, Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, 90(3), 347- 356. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0723-7>.
- Bouderbala, A., & Gharbi, B. Y. (2017). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 76(21), 744.
- BOUDJENANE I ET MAAROUF N., (2014) « Utilisation du système d'information géographique et l'indice de qualité des eaux (IQE) pour évaluer la qualité des eaux
- Perrodon, A. (1957). Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale.
- BOULARAS, Noura et DJALAB, Charifa. *Système de la prévision mensuelle de la consommation d'énergie électrique basée sur les réseaux de neurones artificielle- Etude cas la ville de M'sila*. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila.
- CHERIFA, Aberkane et RADHIA, Ben Zahra. Evaluation des ressources en eau et en sol du bassin versant du Haut Cheliff. 2018.
- C. Touzet, "Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme, cours, exercices et travaux pratiques", Juillet 1992.
- COPPOLA, Emery, POULTON, Mary, CHARLES, Emmanuel, *et al.* Application of artificial neural networks to complex groundwater management problems. *Natural resources research*, 2003, vol. 12, no 4, p. 303-320.
- CORDOBA, Eduardo Beamonte, MARTINEZ, Alejandro Casino, et FERRER, Ernesto Veres. Water quality indicators: Comparison of a probabilistic index and a general quality index. The case of the Confederación Hidrográfica del Júcar (Spain). *Ecological Indicators*, 2010, vol. 10, no 5, p. 1049-1054.
- COUTURE, Isabelle et MONTÉRÉGIE-EST, MAPAQ. Analyse d'eau pour fin d'irrigation. *AGRI. VISION*. 8p, 2004.
- DAVIDSON, Brian et WEI, Yong Ping. Assessing the 'wicked problems' associated with the quality of groundwater used in irrigation: a case study from the North China Plain. *Hydrogeology journal*, 2012, vol. 20, no 5, p. 973-984.
- Dekkiche, I, & Mezaour, A. (2019). Etude comparative de trois méthodes pour la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère alluviale à la pollution, plaine alluviale de Khemis Miliana (Mémoire de Master université Khemis Miliana).
- DREYFUS, Gérard, MARTINEZ, J. M., SAMUELIDES, M., *et al.* *Réseaux de neurones*. Paris : Eyrolles, 2002.

- Dryfus, G., Martinez, J. M., Samuelides, M., Gordon, M. B., Badran, F., Thiria, S., et al. (2002). *Reseaux de Neurones: Methodologie et Applications*. Paris: Editions Eyrolles.
- GADDA, Abdelkrim. *Evaluation des caractéristiques d'un résonateur micro ruban à film mince supraconducteur par la méthode des deux fluides et les réseaux de neurones artificiels*. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- Ghazaryan, K., & Chen, Y. (2016). Hydro chemical assessment of surface water for irrigation purposes and its influence on soil salinity in Tikanlik oasis, China. *Environnemental Earth Sciences*, 75(5), 383.
- González-Acevedo, Z. I., Padilla-Reyes, D. A., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Quality assessment of irrigation water related to soil salinization in Tierra Nueva, San Luis Potosí, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(3), 271–285.
- Haykin, S. (1994). *Neural networks: a comprehensive foundation*. Mac-Millan, New York.
- Holanda JS, Amorim JA (1997) Management and control salinity and irrigated agriculture water In: Congresso Brasileiro de Engenharia setting. Campina Grande 26:137–169
- Hossain, M., Patra, P. K., Begum, S. N., & Rahaman, C. H. (2020). Spatial and sensitivity analysis of integrated groundwater quality index towards irrigational suitability investigation. *Applied Geochemistry*, 123, 104782.
- Ishaku, J. M., Ahmed, A. S., & Abubakar, M. A. (2011). Assessment of groundwater quality using chemical indices and GIS mapping in Jada area, Northeastern Nigeria. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 1(1), 35–60.
- Joshi, D. M., Kumar, A., & Agrawal, N. (2009). Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar district. *Rasayan J Chem*, 2(2), 285-292.
- Karakuş, C. B., & Yıldız, S. (2020). Evaluation for irrigation water purposes of groundwater quality in the vicinity of Sivas City Centre (Turkey) by using GIS and an irrigation water quality index. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 121-137.
- Kelley, W. P. (1951). *Alkali soils; their formation, properties, and reclamation* (No. 04; RMD, S595 K4).
- Khan, G. M. (2018). Artificial neural network (ANNs). In *Evolution of Artificial Neural Development* (pp. 39-55). Springer, Cham.

- LACHACHE A. BOUDJENAH-HAROUN S. ETUDE DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX D'IRRIGATION : CAS DE LA REGION DE OUARGLA. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- LAKHDAR, K. et MOHAMED, NEMISSI. Mémoire de fin d'études. *Université de Ouargla*, 2013.
- Mattauer, M. (1958). Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie).
- Meireles, A., Andrade, E. M., Chaves, L., Frischkorn, H., & Crisostomo, L. A. (2010). A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciencia Agronomica*, 413, 349–357.
- Mohamed, M., & Abdessalam, B. (2011). L'action de pluie sur l'évolution du sol à l'échelle d'une parcelle dans la plaine du haut Chélif (Khemis Miliana)
- Omran, E. S. E. (2012). A proposed model to assess and map irrigation water well suitability using geospatial analysis. *Water*, 4, 545–567.
- PALANI, Sundarambal, LIONG, Shie-Yui, et TKALICH, Pavel. An ANN application for water quality forecasting. *Marine pollution bulletin*, 2008, vol. 56, no 9, p. 1586-1597.
- PARIZEAU, Marc. Réseaux de neurones. *GIF-21140 et GIF-64326*, 2004, vol. 124.
- Personnaz, L. Rivals, I., "Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la commande et la classification ", CNRS édition, Paris, 2003
- PETIT, Olivier. La surexploitation des eaux souterraines: enjeux et gouvernance. *Natures sciences sociétés*, 2004, vol. 12, no 2, p. 146-156.
- Ramesh, K., Elango, L. Groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in Tondiar river basin, Tamil Nadu, India. *Environ Monit Assess* **184**, 3887–3899 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2231-3>
- Rawat, K.S., Singh, S.K. & Gautam, S.K. Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study. *Appl Water Sci* **8**, 233 (2018) <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0866-8>
- Rezvan, K., Fakhri, Y., Mehrorang, G., & Kheibar, D. (2016). Back propagation artificial neural network and central composite design modeling of operational parameter impact for sunset yellow and azur (II) adsorption onto MWCNT and MWCNT-Pd-NPs: Isotherm and kinetic study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 159, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.chemo lab.2016.10.012>.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils* (p. 60). Washington: US Department of Agriculture Hand Book.

- Sahoo, S., & Jha, M. K. (2013). Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment. *Hydrogeology Journal*, 21(8), 1865-1887.
- SAHRAOUI N. (2015) Étude de la cohérence entre la vulnérabilité à la pollution et la qualité des eaux souterraines. Mémoire de master plaine de Khemis Miliana. ALGERIE ; UDBKM. Algérie.
- Seth, R., Mohan, M., Singh, P., et al. (2015). Assessment of seasonal variations in surface water quality of Bageshwar District, Uttarakhand, India for drinking and irrigation purposes. *The Proceedings of the National Academy of Sciences, India, Section A: Physical Sciences*, 85(2), 283–293.
- Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2015). Use of geographic information system and water quality index to assess groundwater quality in Rawalpindi and Islamabad. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(7), 2033–2047.
- Sheikhy Narany, T., Ramli, M.F., Aris, A.Z. et al. Groundwater irrigation quality mapping using geostatistical techniques in Amol–Babol Plain, Iran. *Arab J Geosci* 8, 961–976 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1271-8>.
- Smith, M. (1994). *Neural networks for statistical modelling* (p. 235). NY: Van Nostrand Reinhold.
- Touaibia, W., & Harkat, I. (2019). Etude et utilisation du stress hydrique comme pratique agro-écologique sur la culture de courgette dans la plaine de Khemis Miliana. (Mémoire de Master université Khemis-Miliana).
- TRABELSI, Rouaida, ZAIRI, Moncef, et DHIA, Hamed Ben. Groundwater salinization of the Sfax superficial aquifer, Tunisia. *Hydrogeology Journal*, 2007, vol. 15, no 7, p. 1341-1355...
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Gantha, R. R., Vijayaraghavan, K., & Sarma, V. S. (2010). Characterization and quality assessment of groundwater with special emphasis on irrigation utility: Thirumanimuttar sub-basin, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(2), 245–258.
- Wagh, V. M., Panaskar, D. B., Muley, A. A., Mukate, S. V., Lolage, Y. P., & Aamalawar, M. L. (2016). Prediction of groundwater suitability for irrigation using artificial neural network model: a case study of Nanded tehsil, Maharashtra, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), 1-10.
- Zahedi, S. (2017). Modification of expected conflicts between drinking water quality index and irrigation water quality index in water quality ranking of shared extraction wells using multi criteria decision making techniques. *Ecological Indicators*, 83, 368–379.

Référence bibliographique

- ZHOU, Yu, ZWAHLEN, François, WANG, Yanxin, *et al.* Impact of climate change on irrigation requirements in terms of groundwater resources. *Hydrogeology journal*, 2010, vol. 18, no 7, p. 1571-1582.
- Zouahri, A., Dakak, H., Douaik, A., El Khadir, M., & Moussadek, R. (2015). Evaluation of groundwater suitability for irrigation in the Skhirat region, Northwest of Morocco. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 1-15.