

# THESE

## En vue de l'obtention du DOCTORAT

**Centre de Recherche :** Centre Eau, Ressources Naturelles et Développement Durable (CERNEDD)

**Structure de Recherche :** Spectroscopie, Modélisation Moléculaire, Matériaux, Nanomatériaux, Eau et Environnement (LS3MN2E)

**Discipline :** Chimie

**Spécialité :** Chimie de l'environnement

Présentée et soutenue le 26 / 11 /2022

Par : *LAHMAR M'bark*

**Etude de la qualité des sols et des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans le périmètre irrigué de Sidi Yahya, région du Gharb, Maroc**

### JURY

Souad EL HAJJAJI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences-Rabat	Présidente
Mohammed FEKHAOUI	PES, Université Mohammed V, Institut Scientifique-Rabat	Rapporteur/Examineur
Mohamadine EL MRABET	PES, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Rabat	Rapporteur/Examineur
Latifa MOUHIR	PES, Université Hassan II, Faculté des Sciences et Techniques	Rapporteur/Examineur
	Mohammedia	
Ahmed DOUAIK	Expert, Institut National de la Recherche Agronomique- Rabat	Examineur
Ahmed GHANIMI	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences-Rabat	Co-encadrant
Abdelmjid ZOUAHRI	Expert, Institut National de la Recherche Agronomique- Rabat	Co-encadrant
Abdelaziz SABBAR	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences-Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2022-2023

# Dédicace

*Je dédie cet Thèse*

*A ma Mère et mon Père qui m'a soutenu et encouragé  
durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage  
de ma profonde reconnaissance.*

*A mes frères, et mes sœurs et Ceux qui ont partagé avec  
moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce  
travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé  
tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de  
l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je  
souhaite plus de succès.*

*A tous ceux que j'aime.*

*Merci !*

# Act-propos

Ce manuscrit est le fruit d'un travail réalisé au Laboratoire de Physique Chimie des eaux et des sols à l'Institut National de la Recherche Agronomique de Rabat dirigé par **M. Abdelmjid ZOUAHRI**, en collaboration avec le laboratoire de Spectroscopie, Modélisation Moléculaire, Matériaux, Nanomatériaux, Eau et Environnement (LS3MN2E) sous la direction du **M. Abdelaziz SABBAR**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et du **M. Ahmed GHANIMI**, Professeur Habilité de la Faculté des Sciences - Rabat.

Je voudrai d'abord remercier M. **Mohamed MEKKAOUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur, pour avoir assuré l'encadrement de cette thèse jusqu'à son départ à la retraite. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils, sa bienveillance, la qualité de son encadrement et pour ses qualités humaines. Son aide, sa sympathie et ses directives, m'ont été d'une grande utilité pour arriver à ce stade. Qu'il me soit permis de lui exprimer mon profond respect et mes vifs remerciements.

Je remercie amplement M. **Abdelaziz SABBAR**, Professeur de l'Enseignement Supérieur, pour avoir accepté d'assurer la continuité de l'encadrement de la thèse. Sa valeur ajoutée pour la concrétisation de ce travail est incontestable. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, pour ses conseils et remarques pertinentes qui m'ont été d'un grand apport.

Je remercie également mon co-encadrant M. **Ahmed GHANIMI**, Professeur Habilité, pour l'intérêt et l'indulgence et la bienveillance qu'il a su montrer durant la réalisation de ce travail. Ses conseils éclairés ses remarques judicieuses, ainsi que son grand intérêt pour la recherche scientifique m'ont été d'une grande utilité.

L'élaboration de ce travail n'aurait pas été possible sans la coopération active et dévouée de mon co-encadrant à l'INRA-Rabat, M. **Abdelmjid ZOUAHRI**, Expert et Coordonnateur de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles à l'Institut National de la Recherche Agronomique de Rabat. Son intérêt pour la recherche scientifique, son dévouement, ainsi que ses qualités professionnelles sont exemplaires. Puisse-t-il trouver, dans ce travail, ma sincère gratitude, mon estime et mes remerciements.

J'adresse mes sincères remerciements à Mme. **Souad EL HAJJAJI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Vice doyen chargée de la recherche scientifique, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. Qu'il me soit permis de lui exprimer mon profond respect et mes vifs remerciements.

Mes remerciements s'adressent à M. **Mohammed FEKHAOUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Directeur de l'Institut Scientifique Rabat, d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur de thèse et examinateur.

Je remercie aussi M. **Mohamadine EL MRABET**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Rabat, d'avoir accepté d'évaluer ce travail en tant que rapporteur de thèse et examinateur.

Je tiens à remercier aussi Mme. **Latifa MOUHIR**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia, d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteur de thèse et examinateur.

Mes vifs remerciements s'adressent à M. **Ahmed DOUAIK**, Chercheur au département de l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles (INRA) de Rabat, et membre du Comité Scientifique de la revue *ALRM (Arid Land Research and Management)*, d'abord pour avoir été l'un des collaborateurs majeurs dans la réalisation de ce travail, pour le temps, l'intérêt et le suivi méticuleux qu'il a accordé à ce travail. Je le remercie aussi, pour l'honneur qu'il me fait en tant que membre du jury.

J'adresse mes sincères remerciements à M. **Rachid MOUSSADEK**, Docteur et Chercheur au Centre international pour la recherche agricole dans les zones arides (ICARDA) et à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Un grand Homme qui sait rester modeste et courtois dans toutes circonstances, ainsi que ses qualités professionnelles sont exemplaires, ma sincère gratitude et mes remerciements.

Mes remerciements vont également à tout le staff des laboratoires de l'URECRN pour leur soutien et appui. A cet égard, je tiens à remercier vivement Mme. **Dakak HOURIA**, Mr. **Iaich HAMZA** pour leur disponibilité et apports scientifiques dans la réalisation de ce travail.

Mes profonds remerciements au M. **Najib EL KHODRANI**, pour son dévouement, son implication, son suivi et ses encouragements.

Enfin, je ne remercierais jamais assez l'ensemble des professeurs, chercheurs et intervenants de différents domaines qui m'ont aidé durant mes années de recherche. Puisse Dieu les honorer à leurs justes valeurs.

# Résumé

La plaine du Gharb est la plus grande zone agricole du Maroc. Elle se caractérise par des sols fertiles et la disponibilité de l'eau de surface ou souterraine, ce qui a conduit à une intensification agricole menaçant la disponibilité et la qualité des eaux et des sols dans la région. L'objectif de ce travail de recherche consiste à étudier les différents paramètres physico-chimiques caractérisant la qualité des sols et des eaux souterraines dans la région afin d'évaluer leur degré de dégradation. L'étude a été réalisée sur le périmètre irrigué de Sidi Yahya (région du Gharb), sur la période 2018-2022. L'étude a porté sur 33 puits d'eau et 33 échantillons de sol, avec des analyses in situ et au laboratoire. Les paramètres étudiés pour les sols sont la texture, la matière organique, le pH, la salinité et l'alcalinité, ESP, CaCO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg ainsi que les oligoéléments. Pour les eaux, en plus de la profondeur de la nappe et du pH, un bilan ionique a été réalisé. Une étude hydrochimique a été réalisée pour mesurer la variabilité dans les faciès chimiques. A l'aide du Système d'Information Géographique (SIG), des cartes d'interpolation spatiale des différents paramètres des eaux souterraines et sols ont été éditées afin d'être intégrées dans les outils de diagnostic. En fin, une étude statistique par analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et des matrices de corrélation pour les propriétés du sol et des eaux des 6 zones étudiées ont été établies. Les résultats ont montré que la profondeur minimale et maximale de la nappe phréatique était respectivement de 6 et 96 m. Un peu plus de la moitié des puits (51,5 %) étaient inadéquats pour l'irrigation car ils étaient très salins à extrêmement salins. La région d'étude est caractérisée par une texture hétérogène des sols, avec une prédominance de la texture argileuse lourde (plus de 70 % des sols) dont plus de la moitié sont vertisols. Les sols sont principalement alcalins (70%), pauvres en matière organique (61%) et en phosphore (52%). Ils sont par ailleurs, très riches en potassium (70%) et non salins (88%).

En fin, des cartes thématiques de la qualité des différents paramètres des eaux souterraines et sols ont été éditées à l'aide de logiciel de SIG. Une étude statistique par analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et des matrices de corrélation pour les propriétés du sol et des eaux ont été établies.

**Mots clés :** Eaux souterraines, Périmètre de Sidi Yahya, Plaine du Gharb, Qualité, Sols agricoles, SIG.

# Abstract

The Gharb plain is the largest agricultural area in Morocco. It is characterized by fertile soils and the availability of surface or underground water, which has allowed intensive agriculture threatening the water and soil potentials in the region. The objective of this research work is to study physico-chemical parameters characterizing the quality of soils and groundwater in the region in order to assess their degradation level. The study was carried out of the irrigated perimeter of Sidi Yahya (region of Gharb), over the period 2018-2022. The study involved 33 water wells and 33 soil samples, with in situ and laboratory analyses. The parameters studied for the soils are texture, organic matter, pH, salinity and alkalinity, ESP, CaCO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg as well as trace elements. For the waters, in addition to the depth of the water table and the pH, an ion balance and nitrate pollution was carried out. A hydrochemical study was carried out to assess the variability in the chemical facies. Using the GIS, spatial interpolation maps of the various groundwater and soil parameters have been edited in order to be integrated into the diagnostic tools. Finally, a statistical study by analysis of variance (ANOVA) was carried out and correlation matrices for the properties of the soil and water of the 6 zones studied were established. The results showed that the minimum and maximum water table depth were 6 and 96 m respectively. In addition, just over half of the wells (51.5%) were unsuitable for irrigation because they were either very saline or extremely saline. The study area is characterized by a heterogeneous soil texture, with a predominance of heavy clay texture (more than 70% of the soils), more than half of which are vertisols. The soils are mainly alkaline (70%), poor in organic matter (61%) and phosphorus (52%). They are also very rich in potassium (70%) and non-saline (88%).

Finally, thematic maps of the quality of the various parameters of groundwater and soils of the perimeter of Sidi Yahya Gharb were edited using Geographic Information System (GIS) software. A statistical study by analysis of variance (ANOVA) was carried out and correlation matrices for the properties of the soil and water were established.

**Keywords :** Quality, Agricultural soils, Groundwater, GIS, Gharb plain, Sidi Yahya perimeter.

## ملخص

يعتبر سهل الغرب أكبر منطقة زراعية في المغرب. وتتميز هذه المنطقة بخصوبة التربة وتوافر المياه السطحية والجوفية مما أدى إلى نشاط زراعي مكثف يهدد توافر وجودة المياه والتربة في المنطقة. ويهدف هذا البحث إلى دراسة مختلف الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تميز جودة التربة والمياه الجوفية في المنطقة من أجل تقييم درجة تدهورها. وقد أجريت الدراسة للمحيط السقوي سيدي يحيى (منطقة الغرب)، خلال الفترة الممتدة بين 2018-2022. واشتملت الدراسة على 33 بئر ماء و33 عينة تربة، من خلال تحليلات في الموقع وبالمختبر. وقد همت العوامل التي تمت دراستها بالنسبة للتربة قوام التربة، والمادة العضوية، ودرجة الحموضة والملوحة، ونسبة الصوديوم القابلة للاستبدال، بالإضافة إلى كربونات الكالسيوم، والفوسفور، والبوتاسيوم، والكالسيوم، والمغنيسيوم وكذلك المعادن النادرة. أما بالنسبة للمياه، وبالإضافة إلى عمق منسوب المياه الجوفية ودرجة الحموضة، فقد تم إجراء الحصيصة الأيونية للمياه. كما تم إجراء دراسة هيدروكيميائية لقياس التباين في الوجود الكيميائي. وباستخدام النظام المعلوماتي الجغرافي، تم استخلاص خرائط الاستيفاء المكاني لمختلف خصائص المياه الجوفية والتربة من أجل دمجها في نظام التشخيص. وأخيراً، أجرت دراسة إحصائية عن طريق مصفوفات الارتباط (ANOVA) لخصائص التربة والمياه للمناطق الست المدروسة. وقد أظهرت نتائج البحث أن الحد الأدنى والحد الأقصى لعمق المياه الجوفية كان 6 و96 م على التوالي. بالإضافة إلى ذلك، فإن ما يزيد عن نصف الآبار (51.5%) غير صالحة للري بسبب شديدة الملوحة. في حين أن 70% من التربة تحتوي على قوام طيني ثقيل حيث يشكل الترس أكثر من نصف هذه التربة. وعلاوة على ذلك، فإن تربة المنطقة قاعدية بشكل أساسي (70%)، فقيرة بالمواد العضوية (61%) والفوسفور (52%). غير أنها غنية جداً بالبوتاسيوم (70%) وغير مالحة (88%).

وأخيراً، فقد تم طبع الخرائط الموضوعية لجودة مختلف خصائص للمياه الجوفية والتربة لمحيط سيدي يحيى غرب باستخدام برنامج النظام المعلوماتي الجغرافي (GIS) علاوة على دراسة إحصائية عن طريق مصفوفات الارتباط (ANOVA) لخصائص التربة والمياه.

**الكلمات الرئيسية:** المياه الجوفية، منطقة سيدي يحيى، سهل الغرب جودة التربة و المياه، النظام المعلوماتي الجغرافي

Ce travail a fait l'objet de trois publications, cinq communications orales internationales et deux communication par affiche internationale et nationale ci-après :

## ❖ Liste des Publications

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** and A. Zouahri (2019): Assesment of the Physico-Chemical Quality of Groundwater in the SidiYahya Region, Gharb, Morocco . Mor. J. Chem. Vol 7, N°3, p 424-430.

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, R. Moussadek, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** et A. Zouahri (2020) : Assessment of the Quality of Soil and Groundwater of the Agricultural Area of Sidi Yahya Region, Morocco. E3S Web of Conferences 150, 01001.

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, H. Yachou, A. Ghanimi, R. Moussadek, **M. Mekkaoui**, et A. Zouahri (2021): GIS and Statistical Evaluation Of Soil Quality Of Sidi Yahya, Gharb Plain (MOROCCO), Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences. Vol 9, N°6, p 2320 – 8694.

S. Omrania, N. El Khodrani, A. Zouahri , A. Douaik, H. Iaaich, **M. Lahmar**, et S. ELHajjaji (2019) : Evaluation of the Groundwater Quality of the M'nasra, Kenitra (Morocco) . Materials Today: Proceeding 13, 1092-1101.

S. Omrania, N. El Khodrani, A. Zouahri , A. Douaik, H. Iaaich, **M. Lahmar**, et S. ELHajjaji (2019) : Physico-Chemical Characterization of Water and Soil of the M'nasra region in the Gharb plain (Northwest Morocco). Moroccan Journal of Chemistry. Vol 7, N°3, p 482-492.

N. El Khodrani, S. Omrania, A. Nouayti, A. Zouahri, A. Douaik, H. Iaaich, **M. Lahmar** et M. Fekhaoui (2020): Comparative Study of Groundwater Pollution of M'nasra and Sfafa zones (Gharb, Morocco) by Nitrates . E3S Web of Conferences 150: 01006.

S. Omrania, N. El Khodrani, **M. Lahmar**, A. Douaik, H. Iaaich, S. El Hajjaji, A. Zouahri (2021): Seasonal Variation of Heavy Metal Pollution of Groundwater and Soil in the M'nasra region (Gharb, Morocco)ll. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, Vol 9, N°6, p 813 – 822.

## ❖ Communications orales (publiées dans les actes des conférences)

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, M. Mekkaoui et A. Zouahri (2019). Evaluation de la Qualité Physico-Chimique des Eaux Souterraines de la Région de Sidi Yahia ,Gharb, Maroc. Communication Oral : Congrès international :« Eau , Recyclage et Valorisation des Déchets ERVD’6”

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** et A. Zouahri (2019). Apport du SIG dans l’Evaluation de la Qualité des Sols du Périmètre de Sidi Yahya Plaine de Ghrab- Maroc. Communication Oral : Congrès International Valorisation des Ressources Naturelles : De la Recherche Scientifique à la Faisabilité Socio-économique -VARENA 2019-

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** et A. Zouahri (2019). Study of the Physico-Chemical Quality of Groundwater in the Sidi Yahya Region, Gharb, Morocco. Communication Oral : conférence interrégionale CIGR sur "Les défis de la mobilisation de l'eau et de la conservation des sols pour une meilleure adaptation aux changements climatiques"

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** et A. Zouahri (2019): Apport du SIG dans l’Evaluation de la Qualité des Sols du Périmètre de Sidi Yahya Plaine de Ghrab- Maroc. communication Oral : " La deuxieme edition du congres international des etudes sur l’eau et l’environnement.

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, **M. Mekkaoui** et A. Zouahri (2019). Contribution of Geographical Information Systems to the soil fertility in the Sidi Yahya Region, Gharb, Morocco. communication affichée: 6<sup>th</sup> International symposium on Environment and Sustainable Development.

S. Omrania , N. El Khodrani, A. Zouahri, A. Douaik, H. Iaaich, **M. Lahmar**, et S.El Hajjaji. —Evaluation of the Groundwater Quality of the M’nasra, Kenitra (Morocco). 2nd International Conference on Materials and Environmental Science «ICMES 2018 », 26-28 Avril 2018, Saidia Morocco.

## ❖ Communications affichées

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, M. Mekkaoui et A. Zouahri (2019). Mapping of the Physico-Chemical Quality of the Soil in the Sidi Yahya Region, Gharb, Morocco. Communication affichée: the 1st EU/North-African Conference on Organic Agriculture (EU-NACOA).

**M. Lahmar**, N. El Khodrani, S. Omrania, H. Dakak, A. Douaik, H. Iaaich, M. El Azzouzi, M. Mekkaoui et A. Zouahri (2019). Contribution of Geographical Information Systems to the soil fertility in the Sidi Yahya Region, Gharb, Morocco. communication affichée: 6<sup>th</sup> International symposium on Environment and Sustainable Development.

## **Liste des abréviations**

<b>ABHS</b>	Agence du Bassin Hydraulique de Sebou
<b>ACP</b>	Analyse en Composantes Principale
<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>AIS</b>	Année Internationale des Sols
<b>CE</b>	Conductivité Electrique
<b>CEC</b>	Capacité d'Echange Cationique
<b>DAP</b>	Phosphate Di-ammonique
<b>DBO</b>	Demande Biochimique en Oxygène
<b>DCO</b>	Demande Chimique en Oxygène
<b>DRA</b>	Direction Régionale de l'Agriculture
<b>DTPA</b>	DiéthylèneTriamine-PentaAcétique
<b>EDTA</b>	Acide Ethylène Diamine Tétra-acétique
<b>EIE</b>	Etudes d'Impact sur l'Environnement
<b>ESP</b>	Exchangeable Sodium Percentage (Pourcentage de Sodium Echangeable)
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organisation (L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
<b>HCP</b>	Haut-Commissariat au Plan
<b>IFA</b>	Association Internationale des Fertilisants
<b>IPTRID</b>	Programme International de Technologie et de Recherche en Irrigation et Drainage
<b>MAP</b>	Phosphate Mono-ammonique
<b>MAPM</b>	Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime
<b>MAPMDREF</b>	Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts
<b>MDMEMEE</b>	Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement chargé de l'Eau
<b>MO</b>	Matière Organique
<b>OD</b>	Oxygène Dissous
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>ORMVA</b>	Office Régional de Mise en Valeur Agricole
<b>ORVMAG</b>	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb
<b>PEOI</b>	Pollution de l'Eau d'Origine Industrielle
<b>PIB</b>	Produit Intérieur Brut

<b>RSC</b>	Carbonate de Sodium Résiduel
<b>SAA</b>	Spectrophotomètre d’Absorption Atomique
<b>SAR</b>	Sodium Adsorption Ration (Rapport d’Adsorption du Sodium)
<b>SAU</b>	Superficie Agricole Utile
<b>SIG</b>	Système d’Information Géographique
<b>STI</b>	Seconde Tranche d’Irrigation
<b>TH</b>	Dureté totale
<b>TTI</b>	Troisième Tranche d’Irrigation
<b>USDA</b>	United States-Department of Agriculture

## **Liste des figures**

<b>N° Figure</b>	<b>Désignation</b>	<b>Pages</b>
<b>Figure 1</b>	Carte de la qualité de l'eau des principales nappes d'eaux souterraines ( <b>SEE,2009</b> )	9
<b>Figure 2</b>	Carte de la qualité globale des eaux superficielles ( <b>SEE ,2009</b> )	9
<b>Figure 3</b>	Qualité des principales nappes d'eaux souterraines à l'échelle nationale ( <b>Etat de la Qualité des Ressources en Eau au Maroc 2011-2012</b> )	12
<b>Figure 4</b>	Les principaux mécanismes de salinisation des eaux souterraines ( <b>Commission européenne, 2003</b> )	19
<b>Figure 5</b>	Diagramme triangulaire des classes texturales de sol d'après les dimensions des particules USDA ( <b>Richer de Forges, 2008</b> )	36
<b>Figure 6</b>	Classification des éléments nutritifs essentiels ( <b>Campbell, 1978</b> )	38
<b>Figure 7</b>	Cycle d'azote dans le sol ( <b>El Khodrani, 2018</b> )	40
<b>Figure 8</b>	Cycle du phosphore dans le sol ( <b>El Khodrani, 2018</b> )	43
<b>Figure 9</b>	Cycle du potassium dans le sol ( <b>El Khodrani, 2018</b> )	46
<b>Figure 10</b>	Schéma de l'aménagement hydraulique du bassin du Sebou ( <b>ABHS, 2019</b> )	61
<b>Figure 11</b>	Précipitation annuelle moyenne de la plaine du Gharb ( <b>ABHS, 2019</b> )	62
<b>Figure 12</b>	Répartition des sols dans la région du Gharb ( <b>Zeraouli et Mrini, 2004</b> )	63
<b>Figure 13</b>	Carte piézométrique de la nappe superficielle du Gharb ( <b>Amharref et al., 2007</b> )	64
<b>Figure 14</b>	Carte de différentes tranches d'aménagement du périmètre du Gharb ( <b>ORMVAG. 2008</b> )	65
<b>Figure 15</b>	Carte de situation de la zone d'étude	68
<b>Figure 16</b>	Coupe géologique NO-SE de la plaine du Gharb ( <b>Bouya et al., 2011</b> )	70
<b>Figure 17</b>	Carte hydrographique de bassin du Sebou ( <b>ABHS, 2019</b> )	71
<b>Figure 18</b>	Carte de système d'irrigation du périmètre de Gharb ( <b>Taky, 2015</b> )	73
<b>Figure 19</b>	Présentation de la zone d'étude et des échantillons prospectés	75
<b>Figure 20</b>	Diagramme de classification détaillée des textures ( <b>USDA, 1995</b> )	77
<b>Figure 21</b>	Photo du Spectrophotomètre d'Absorption Atomique VARIAN, 220	83
<b>Figure 22</b>	Diagramme de Piper ( <b>Boutaleb et al., 2000</b> )	91
<b>Figure 23</b>	Diagramme de la teneur en calcaire total des sites étudiés en fonction des normes agronomiques ( <b>BAIZE, 2000</b> )	99
<b>Figure 24</b>	Carte d'interpolation spatiale du calcaire total des sols du périmètre de Sidi Yahya Gharb	100
<b>Figure 25</b>	Diagramme du pH des sols étudiés horizon (0-20cm)	102
<b>Figure 26</b>	Diagramme du pH des sols étudiés horizon (20-40cm)	102
<b>Figure 27</b>	Carte d'interpolation spatiale du pH des sols du périmètre de Sidi Yahya Gharb	103
<b>Figure 28</b>	Diagramme de la salinité des sols étudiés (0-20cm)	105
<b>Figure 29</b>	Diagramme de la salinité des sols étudiés (20-40cm)	105

<b>Figure 30</b>	Carte d'interpolation spatiale de la salinité du sol (CEps) dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	106
<b>Figure 31</b>	Diagramme des teneurs de la matière organique des sols étudiés Horizon (0-20cm)	108
<b>Figure 32</b>	Diagramme des teneurs de la matière organique des sols étudiés Horizon (20-40cm)	108
<b>Figure 33</b>	Carte d'interpolation spatiale de la teneur en matière organique des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	109
<b>Figure 34</b>	Diagramme des teneurs en phosphore assimilable des sols étudiés (0-20cm) et (20-40cm)	111
<b>Figure 35</b>	Carte d'interpolation spatiale du phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	112
<b>Figure 36</b>	Diagramme des teneurs en potassium échangeable des sols étudiés (0-20cm) et (20-40cm)	114
<b>Figure 37</b>	Carte d'interpolation spatiale du potassium ( $K_2O$ ) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	115
<b>Figure 38</b>	Diagramme d'alcalinité des sols étudiés Horizon (0-20cm)	117
<b>Figure 39</b>	Diagramme d'alcalinité des sols étudiés Horizon (20-40cm)	117
<b>Figure 40</b>	Carte d'interpolation spatiale du pourcentage du sodium échangeable (ESP) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	118
<b>Figure 41</b>	Diagramme de la teneur en calcium échangeable de sols étudiés (0-20cm) (20-40cm)	119
<b>Figure 42</b>	Carte d'interpolation spatiale de la teneur du sol en calcium dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	120
<b>Figure 43</b>	Diagramme de la teneur en magnésium échangeable de sols étudiés (0-20cm) (20-40cm)	121
<b>Figure 44</b>	Carte d'interpolation spatiale du pourcentage du magnésium des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	122
<b>Figure 45</b>	Diagramme des teneurs en cuivre assimilable des sols étudiés	123
<b>Figure 46</b>	Diagramme des teneurs en fer assimilable des sols étudiés	125
<b>Figure 47</b>	Diagramme des teneurs en zinc assimilable des sols étudiés	126
<b>Figure 48</b>	Diagramme des teneurs en manganèse assimilable des sols étudiés	127
<b>Figure 49</b>	Présentation de 6 zones d'étude	129
<b>Figure 50</b>	Répartition des moyennes de $CaCO_3$ en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	131
<b>Figure 51</b>	Répartition du pH des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	132
<b>Figure 52</b>	Répartition de la MO des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	133
<b>Figure 53</b>	Répartition de l'ESP des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les	134

	écarts-types	
<b>Figure 54</b>	Graphique de chargement pour l'analyse en composantes principales : Plans PC1-PC2 (gauche) et PC1-PC3 (droite)	138
<b>Figure 55</b>	Tracé des scores pour les échantillons de sol dans les plans PC1-PC2 Gauche) et PC1-PC3 (à droite)	139
<b>Figure 56</b>	Diagramme de pH des eaux souterraines de la zone d'étude	143
<b>Figure 57</b>	Carte d'interpolation spatiale du pH des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	144
<b>Figure 58</b>	Diagramme de la profondeur des eaux de puits de Sidi Yahya Gharb	145
<b>Figure 59</b>	Diagramme de la salinité des eaux d'irrigation de la zone d'étude	147
<b>Figure 60</b>	Carte d'interpolation de la salinité des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb	147
<b>Figure 61</b>	Diagramme de la teneur des ions chlorures des eaux souterraines de la zone d'étude	149
<b>Figure 62</b>	Carte d'interpolation spatiale de chlorure des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	150
<b>Figure 63</b>	Courbe de corrélation entre les concentrations des chlorures et du sodium des eaux souterraines	151
<b>Figure 64</b>	Diagramme du RSC des eaux des eaux souterraines de la zone d'étude	153
<b>Figure 65</b>	Carte d'interpolation spatiale du RSC des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	153
<b>Figure 66</b>	Diagramme du TH des eaux souterraines de la zone d'étude	155
<b>Figure 67</b>	Carte d'interpolation spatiale de la dureté des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	156
<b>Figure 68</b>	Diagramme des teneurs en nitrate des eaux souterraines de la zone d'étude	157
<b>Figure 69</b>	Carte d'interpolation spatiale des nitrates des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	158
<b>Figure 70</b>	Diagramme des teneurs d'ammonium des eaux souterraines de la zone d'étude	160
<b>Figure 71</b>	Carte d'interpolation spatiale des teneurs en ammonium des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	161
<b>Figure 72</b>	Diagramme du SAR des eaux souterraines de la zone d'étude	162
<b>Figure 73</b>	Diagramme de l'alcalinité (SAR) et de la salinité des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	164
<b>Figure 74</b>	Carte d'interpolation spatiale du SAR des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	165
<b>Figure 75</b>	Diagramme de Piper des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb	166
<b>Figure 76</b>	Répartition des moyennes de la CE en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	169

<b>Figure 77</b>	Répartition des moyennes de pH en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	171
<b>Figure 78</b>	Répartition des moyennes de calcium en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	172
<b>Figure 79</b>	Répartition des moyennes des nitrates en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types	173
<b>Figure 80</b>	Graphique de chargement pour l'analyse en composantes principales : Plans CP1-CP2 (gauche) et CP1-CP3 (droite)	178
<b>Figure 81</b>	Tracé des scores pour les échantillons des eaux dans les plans CP1-CP2 (à gauche) et CP1-CP3 (à droite).	178

## **Liste des tableaux**

<b>N° Tableau</b>	<b>Désignation</b>	<b>Pages</b>
<b>Tableau 1</b>	Sources de la pollution des eaux souterraines ( <b>PEOI, 2008</b> )	15
<b>Tableau 2</b>	Sols affectés par la salinité dans les périmètres irrigués au Maroc ( <b>Badraoui et al., 2000</b> ).	26
<b>Tableau 3</b>	Différents types de sols ( <b>Essington, 2004</b> ).	28
<b>Tableau 4</b>	Niveau critique de conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée Caractéristique de quelques espèces ( <b>Herrero et al., 2003</b> ).	32
<b>Tableau 5</b>	Présentation des états et des formes de l'azote ( <b>El Alaoui, 2007</b> )	39
<b>Tableau 6</b>	États et formes du phosphore dans le sol ( <b>El Alaoui, 2007</b> )	42
<b>Tableau 7</b>	Les principales fonctions physiologiques des oligoéléments ( <b>Price et al., 1972</b> )	53
<b>Tableau 8</b>	Participation du Gharb dans la production nationale agricole ( <b>DRA, 2020</b> )	66
<b>Tableau 9</b>	Culture, production et quantité d'engrais utilisée dans la région du Gharb ( <b>Harbouze et al., 2019</b> )	72
<b>Tableau 10</b>	Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol ( <b>Baize, 2000</b> )	78
<b>Tableau 11</b>	Répartition des classes de pH des sols selon les normes marocaines ( <b>DIAEA /DRHA /SEEN 2008</b> )	79
<b>Tableau 12</b>	Echelle de salure ( <b>FAO, 1988</b> )	79
<b>Tableau 13</b>	Normes d'interprétation de la matière organique selon les normes marocaines ( <b>DIAEA/DRHA/SEEN 2008</b> )	80
<b>Tableau 14</b>	Normes d'interprétation de phosphore assimilable ( <b>Delaunois et al, 2008</b> )	81
<b>Tableau 15</b>	Normes d'interprétation potassium échangeable ( <b>Delaunois et al, 2008</b> )	81
<b>Tableau 16</b>	Normes d'interprétation du calcium et du magnésium ( <b>Horneck et al, 2011</b> )	82
<b>Tableau 17</b>	Préparation de la DTPA ( <b>Lindsay et Norwell,1978</b> )	83
<b>Tableau 18</b>	Normes d'interprétation des oligo-élément du sol	84
<b>Tableau 19</b>	Classement du pH des eaux d'irrigation ( <b>Baize et Girard, 2001</b> )	84
<b>Tableau 20</b>	Classification de l'eau ( <b>Maillard, 2001</b> )	86
<b>Tableau 21</b>	Répartition de la teneur des ions chlorures dans les eaux des irrigation ( <b>MDMEMEE,2014</b> )	86
<b>Tableau 22</b>	Classification de l'eau d'irrigation selon RSC ( <b>DURAND, 1983</b> )	87
<b>Tableau 23</b>	Classification de l'eau d'irrigation selon TH ( <b>O.M.S, 2008</b> )	88
<b>Tableau 24</b>	Répartition de la teneur des ions nitrate dans les eaux d'irrigation ( <b>MDMEMEE,2014</b> )	89
<b>Tableau 25</b>	Répartition de la teneur des ions d'ammonium dans les eaux d'irrigation ( <b>MDMEMEE, 2014</b> ).	89
<b>Tableau 26</b>	SAR et degrés d'alcalinisation des eaux d'irrigation ( <b>DIAEA/DRHA/SEEN, 2010</b> )	90

<b>Tableau 27</b>	Distribution des cinq fractions de texture des sols	97
<b>Tableau 28</b>	Répartition des classes de calcaire total des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon ( <b>Baize, 2000</b> )	99
<b>Tableau 29</b>	Répartition des classes de pH des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines ( <b>DIAEA /DRHA /SEEN, 2008</b> )	101
<b>Tableau 30</b>	Répartition des classes de salinité des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes américaines ( <b>Richards, 1954</b> )	104
<b>Tableau 31</b>	Répartition des classes de la matière organique (MO) des sols dans le périmètre Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines ( <b>DIAEA /DRHA /SEEN, 2008</b> )	107
<b>Tableau 32</b>	Répartition des classes de phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Delaunoi, 2008</b> )	110
<b>Tableau 33</b>	Répartition des classes potassium échangeable ( $K_2O$ ) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines ( <b>DIAEA/DRHA /SEEN, 2008</b> )	113
<b>Tableau 34</b>	Répartition des classes d'alcalinité des sols du périmètre de Sidi Yahya ( <b>FAO, 1988</b> )	116
<b>Tableau 35</b>	Répartition des classes de calcium échangeable (Ca) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Horneck et al., 2011</b> )	119
<b>Tableau 36</b>	Répartition des classes du magnésium échangeable (Mg) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Horneck et al. 2011</b> )	121
<b>Tableau 37</b>	Moyennes $\pm$ écarts-types et résultats de l'ANOVA pour les paramètres physiques et chimiques du sol pour les 6 zones	130
<b>Tableau 38</b>	Résultats de comparaison de moyennes de $CaCO_3$ en fonction des zones	132
<b>Tableau 39</b>	Résultats de comparaison de moyennes de pH du sol en fonction des zones	133
<b>Tableau 40</b>	Résultats de comparaison de moyennes de l'ESP en fonction des zones	135
<b>Tableau 41</b>	Matrice de corrélation pour les propriétés du sol	136
<b>Tableau 42</b>	Valeurs propres, variances, et variances cumulées des composantes principales	137
<b>Tableau 43</b>	Chargements des propriétés physico-chimiques du sol sur les composantes principales	138
<b>Tableau 44</b>	Répartition des classes de pH des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Baize et Girard, 2001</b> )	143
<b>Tableau 45</b>	Répartition de la salinité des eaux d'irrigation du périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Maillard, 2001</b> )	146
<b>Tableau 46</b>	Répartition de la teneur des ions chlorures des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines ( <b>MDMEMEE,2014</b> )	149
<b>Tableau 47</b>	Répartition des classes du RSC des eaux souterraines de périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>Durand, 1983</b> )	152
<b>Tableau 48</b>	Répartition de la dureté des eaux souterraines de périmètre de Sidi Yahya Gharb ( <b>O.M.S, 2008</b> )	155
<b>Tableau 49</b>	Répartition de la teneur des nitrates des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme marocaines ( <b>MDMEMEE, 2014</b> )	157

<b>Tableau 50</b>	Répartition de la teneur des ammonium des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme marocaines (MDMEMEE, 2014)	159
<b>Tableau 51</b>	Répartition des classes de salinité et d'alcalinité des eaux d'irrigation de périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme américaines (Richards, 1954)	163
<b>Tableau 52</b>	ANOVA des paramètres physico-chimiques en fonction des zones étudiées	168
<b>Tableau 53</b>	Résultats de comparaison de moyennes de la CE en fonction des zones	170
<b>Tableau 54</b>	Résultats de comparaison de moyennes de pH en fonction des zones	171
<b>Tableau 55</b>	Résultats de comparaison de moyennes de Ca en fonction des zones	172
<b>Tableau 56</b>	Résultats de comparaison de moyennes de NO <sub>3</sub> en fonction des zones	174
<b>Tableau 57</b>	Matrice de corrélation pour les propriétés des eaux souterraines	176
<b>Tableau 58</b>	Valeurs propres, variances, et variances cumulées des composantes principales	177
<b>Tableau 59</b>	Chargements des propriétés physico-chimiques des eaux souterraines sur les composantes principales.	177

# Table des matières

Dédicaces.....	i
Avant-propos.....	ii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des publications.....	vii
Liste des abréviations.....	x
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xix
Introduction Générale.....	1
Partie I : Synthèse Bibliographie.....	3
Chapitre I : Paramètres de la qualité des eaux.....	4
Introduction.....	5
1. Salinité de l'eau.....	5
1.1. Origine de la salinisation des eaux.....	5
1.2. Teneur en sels dans les eaux d'irrigation.....	5
1.3. Evaluation des risques liés à la salinité.....	5
1.3.1. Effet de la salinité sur le sol.....	6
1.3.2. Effet de la salinité sur les plantes.....	6
1.3.3. Etude de la relation salinité sol-eau.....	7
1.3.4. Rapport entre la salinité du sol et celle de l'eau d'irrigation.....	8
2. Etat général de la dégradation des eaux au Maroc.....	8
2.1. Dégradation de la qualité des eaux.....	8
2.2. Principales causes de la dégradation de la qualité des eaux.....	10
2.3. Impact de la mise en valeur intensive sous irrigation sur la qualité des eaux.....	10
3. Ressources en eau souterraines.....	11
3.1. Evaluation de la qualité des eaux souterraines au niveau national.....	11
3.2. Caractéristiques générales des eaux souterraines.....	12
3.3. Pollution des ressources en eau.....	14

3.3.1. Définition.....	14
3.3.2. Types des pollutions des eaux.....	14
3.3.3. Sources des pollutions des eaux souterraines.....	15
3.3.4. Protection des eaux souterraines.....	15
3.4. Indicateurs de l'altération de la qualité des eaux souterraines en zones irriguées.....	16
3.4.1. Toxicités des pesticides.....	16
3.4.2. Risques sur l'environnement.....	16
3.4.3. Pollution par nitrates.....	17
3.4.4. Effet sur l'environnement.....	18
4. Caractéristiques physico-chimique des eaux d'irrigation.....	18
4.1. Salinité des eaux.....	18
4.2. Sodium dans l'eau.....	19
4.3. Alcalinité.....	21
4.4. Turbidité.....	21
4.5. Dureté.....	21
5. Composition ionique des eaux.....	22
5.1. Ammoniac.....	22
5.2. Sulfate.....	22
5.3. Potassium.....	23
5.4. Calcium et Magnésium.....	23
5.5. Bicarbonate.....	23
5.6. Chlorures.....	23
Chapitre II : Paramètres de la qualité des sols.....	24
1. Qualité des sols.....	25
1.1. Salinité des sols.....	25
1.2. Définition de la salinisation des sols.....	26
1.3. Critères de la salinité des sols.....	28
1.4. Causes de la salinisation des sols.....	29
1.5. Conséquences de la salinisation.....	30
1.6. Méthodes de mesure de la salinité des sols.....	31
1.7. Moyens technique de lutte contre la salinisation.....	31
2. Fertilité des sols.....	33
2.1. Evolution historique du concept de la fertilité du sol.....	33
2.2. Définitions de la fertilité.....	34
2.3. Types de la fertilité.....	34
2.3.1. Fertilité physique des sols.....	34
2.3.2. Fertilité biologique.....	37
2.3.3. Fertilité chimique.....	38
2.4. Interactions entre la fertilité physique, chimique et biologique.....	55
2.5. Mécanisme de dégradations de la fertilité chimique des sols.....	55
2.5.1. Carences.....	55
2.5.2. Toxicité chimique et salinisation des sols.....	56
2.5.3. Pollution.....	56
Conclusion.....	57

<b>Partie II : Matériel et Méthodes.....</b>	<b>58</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>58</b>
<b>Chapitre I : Présentation de la zone et le périmètre étudiés.....</b>	<b>60</b>
<b>1. Présentation générale de la région du Gharb.....</b>	<b>61</b>
1.1. Situation géographique générale.....	61
1.2. Climatologie.....	62
1.3. Types de sol.....	62
1.4. Hydrogéologie.....	63
1.4.1. Eau de surface.....	64
1.4.2. Aménagement hydro-agricole.....	64
1.5. Production agricole.....	66
1.6. Activité économique.....	67
<b>2. Présentation de périmètre Sidi Yahya Gharb.....</b>	<b>68</b>
2.1. Situation géographique.....	68
2.2. Choix du périmètre Sidi Yahya Gharb.....	68
2.3. Le contexte géologique.....	69
2.4. Le contexte hydrologie.....	71
2.5. Agriculture dans le périmètre.....	71
2.6. Système d'irrigation.....	72
<b>Chapitre II : Outils et Méthodologie.....</b>	<b>74</b>
<b>1. Sites de prélèvements.....</b>	<b>75</b>
<b>2. Echantillonnage.....</b>	<b>76</b>
2.1. Prélèvement du sol.....	76
2.2. Prélèvement d'eau.....	76
<b>3. Analyse au laboratoire.....</b>	<b>76</b>
3.1. Préparation des échantillon.....	76
3.2. Analyse des sols.....	76
3.2.1. Paramètre physique.....	76
3.2.2. Paramètre chimiques.....	78
3.3. Analyse des eaux.....	84
3.3.1. Sur terrain.....	84
3.3.2. Analyse au laboratoire.....	85
3.4. Analyse statistique.....	92
3.5. Système d'information géographique (SIG).....	92
<b>Partie III : Résultats et Discussion.....</b>	<b>94</b>
<b>Chapitre I : Etude de la qualité physico-chimique des sols de Sidi Yahya Gharb.....</b>	<b>95</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>96</b>
<b>1. Texture du sol.....</b>	<b>96</b>

2. Calcaire Total.....	98
3. pH du sol.....	101
4. pHKCl.....	104
5. Salinité.....	104
6. Matière organique.....	107
7. Phosphore assimilable.....	110
8. Potassium assimilable.....	113
9. Alcalinité du sol.....	116
10. Calcium échangeable.....	119
11. Magnésium échangeable.....	121
12. Les oligoéléments des sols.....	123
12.1. Cuivre.....	123
12.2. Fer.....	124
12.3. Zinc.....	126
12.4. Manganèse.....	127
13. Les études statistique.....	128
13.1. Analyse de variance (ANOVA).....	128
13.2. Analyse en composantes principales.....	135
Conclusion.....	141
<b>Chapitre II : Etude de la qualité physicochimie des eaux d'irrigation de Sidi Yahya</b>	
Gharb.....	142
Introduction.....	143
1. pH des eaux.....	143
2. Profondeur de la nappe.....	145
3. Salinité.....	145
4. Risque lié aux chlorures.....	148
5. Chlorure et sodium.....	151
6. Risque lié aux bicarbonate.....	152
7. Dureté de l'eau.....	154
8. Risque lié aux Nitrate.....	157
9. Risque lié à l'ion d'ammonium.....	159
10. Alcalinité des eaux.....	162
11. Hydrochimie.....	166
12. Les études statistique.....	167
12.1. Analyse de variance (ANOVA).....	167
12.2. Matrices de corrélations et Analyse composante principale.....	174
Conclusion.....	180
Conclusion Générale.....	181
Référence bibliographie.....	184



# Introduction Générale

Le Royaume du Maroc, pays au stress hydrique élevé, se trouve aujourd'hui face à une situation où la demande en eau est supérieure à la quantité disponible et le problème de l'eau touche directement le secteur agricole avec la sécurité alimentaire en toile de fond. De fait, un Programme national prioritaire de l'eau 2022-2027 a été mis en place à cet effet. Pour faire face, SMA le Roi du Maroc, dans son discours d'ouverture de la session parlementaire d'automne 2022, a tracé les contours de la feuille de route, qui se décline en trois axes : le premier porte sur « *le recours aux innovations et technologies nouvelles pour l'économie de l'eau* » ; le deuxième consiste à « *accorder une attention particulière à l'exploitation rationnelle des eaux souterraines et à la préservation des nappes phréatiques* » et le troisième consiste à « *garder à l'esprit que la question de l'eau n'est pas l'affaire exclusive d'une politique sectorielle isolée mais qu'elle constitue une préoccupation commune à de nombreux secteurs* ».

Au Maroc, les eaux souterraines constituent une part très importante du patrimoine hydraulique. Elles présentent, par rapport aux eaux de surface, des avantages certains sur le plan de la couverture des besoins. On dénombre près de 32 nappes profondes et plus de 46 nappes superficielles et les ressources en eaux souterraines mobilisables sont estimées à 4 milliards de m<sup>3</sup>, réparties inégalement dans les différentes régions du royaume (**Omrania, 2022**).

Par ailleurs, le sol est une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine, et il doit être préservé notamment pour la durabilité des systèmes de production agricole. Or, il est souvent constaté que le sol subit une dégradation importante de sa qualité suite à l'intensification agricole sous irrigation ainsi que effets climatiques. De plus, un sol évolue naturellement mais aussi, plus rapidement, sous l'effet d'actions humaines. Cette transformation peut modifier souvent son aptitude à assurer durablement certaines fonctions essentielles. Il est alors primordial de savoir apprécier la capacité de chaque type de sol à assurer durablement une ou plusieurs de ces fonctions. La mise en place « d'observatoires » de la qualité des sols et des eaux dans les zones irriguées est nécessaire pour assurer la durabilité du système de production.

La zone de Sidi Yahya Gharb, située dans la préfecture de Kénitra, région de Rabat Salé Kénitra, est une zone fortement dominée par les activités d'agro-élevages. Les activités agricoles sont parmi les activités humaines, qui influent le plus fortement les paysages et les écosystèmes naturels. Par ailleurs, depuis plus d'un demi-siècle, l'agriculture utilise des quantités importantes de pesticides et d'engrais chimiques, dans le but d'améliorer le rendement de la production agricole

d'une façon importante. Ces produits chimiques (pesticides et engrais) peuvent contenir des polluants, notamment des métaux lourds, qui contaminent l'environnement. Par conséquent, ces derniers représentent un danger significatif pour l'environnement en général et engendrent à la fois des risques écologiques et des dangers pour la santé humaine et animale.

Face à cette situation et afin d'assurer la qualité et la durabilité des ressources en eau et en sols agricoles ainsi que pour aboutir à des stratégies de leur utilisation pour un développement agricole durable, il est nécessaire de surveiller ces ressources à travers des analyses et contrôles réguliers. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche qui a pour objectif l'évaluation de la qualité des sols et des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et de prévenir les risques éventuels de dégradation de ces ressources et ce à travers une étude hydrochimique et statistique ainsi que par l'établissement de cartes thématiques des paramètres des eaux et des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

Le présent manuscrit s'articule autour de trois parties :

- Une **première partie** qui présente une revue bibliographique sur le problème de la salinité et les méthodes adoptées pour l'évaluation des risques de salinisation. Cette partie aborde également des définitions et des notions de base de la fertilité des sols, des généralités sur les microéléments ainsi que des généralités sur les ressources en eaux et leur qualité physico-chimique.
- La **deuxième partie** décrit les différents matériels et méthodes mis en œuvre pour la réalisation de ce travail ainsi que la présentation de la zone d'étude.
- Dans la **troisième et dernière partie**, sont présentés et discutés les principaux résultats obtenus au niveau de la caractérisation physico-chimique des eaux et des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb et l'établissement des cartes thématiques illustrant la répartition spatiale des paramètres étudiés ainsi que l'étude statistique.

Enfin une conclusion générale et quelques recommandations sont émises dans la perspective d'une stratégie pour la conservation des ressources naturelles en eaux souterraines et sols agricoles.

**PARTIE I :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQU**

**CHAPITRE I :**  
**PARAMETRES DE LA QUALITE DES EAUX**

## **Introduction**

Au Maroc, l'intensification agricole des sols en zones irriguées, arides et semi arides, s'est énormément prononcée ces dernières décennies. Elle a généré une dégradation des ressources en eau et en sol. Les processus les plus connus résident, notamment, dans la salinisation des eaux et des terres et une perte incontestable des stocks organiques des sols (**Dakak et al., 2011 ; Debbagh et Badroui, 2007 ; Lahlou, 2002**).

### **1. Salinité de l'eau**

Les sels qui contribuent à créer un problème de salinité sont solubles et facilement transportables par l'eau. Ces sels se présentent comme des combinaisons de trois cations : sodium  $\text{Na}^+$ , magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  et calcium  $\text{Ca}^{2+}$ , avec quatre anions chlorure  $\text{Cl}^-$  sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  :

- ✓ Les chlorures de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ , ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ).
- ✓ Les sulfates de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ).
- ✓ Les bicarbonates de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{MgH}_2(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ ).
- ✓ Les carbonates de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ).

#### **1.1. Origine de la salinisation des eaux**

L'eau est très susceptible à la pollution et l'altération de sa qualité (**Gouaidia et al., 2011**). La salinité de l'eau d'irrigation est définie par ses teneurs en éléments solubles, notamment la composition totale en sels, la constitution ionique et la proportion d'oligo-éléments. La quantité totale en sels, traduite généralement en dS/m, procure une corrélation entre la qualité de l'eau et le risque de salinité (**Gouaidia et al., 2012**).

#### **1.2. Teneur en sel dans les eaux d'irrigation**

L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux des eaux d'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines. L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs à savoir, la tolérance en sels de la plante, les caractéristiques du sol sous l'irrigation, les conditions climatiques et les procédures de gestion des sols et de l'eau (**Cetin et Kirda, 2003**).

#### **1.3. Evaluation des risques liés à la salinité de l'eau**

La teneur totale en sels est le seul critère le plus important pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. Cette teneur, qui peut être exprimée en termes de conductivité électrique ou en ppm

ou meq/l, doit être aussi faible que possible afin de pallier aux problèmes de salinisation des sols. Généralement, une augmentation de la teneur en sels dans l'eau d'irrigation résultera en une augmentation de la salinité de la solution du sol. La vitesse et le degré de cette augmentation dépendront de **(Li et al., 2007)** :

- ✓ La composition ionique de l'eau d'irrigation et la tendance de quelques ions, tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , à précipiter après l'extraction de l'eau du sol ;
- ✓ Le lessivage, c'est à dire la quantité d'eau apportée par irrigation ou par des pluies en excès des besoins de la culture et l'efficacité du lessivage ;
- ✓ Les propriétés physiques du sol telles que l'infiltration, les caractéristiques hydriques et le drainage.

### **1.3.1. Effet de la salinité sur les sols**

Les eaux faiblement salines peuvent être utilisées pour la plupart des cultures sur pratiquement tous les sols, mais quand la salinité croît, l'eau devient moins appropriée pour les plantes sensibles au sel et pour l'utilisation sur sols peu perméables. Les eaux à forte salinité ne peuvent être utilisées que pour les plantes très tolérantes au sel, avec des techniques d'aménagement particulières sur sols perméables bien drainés. L'excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions provoquent une sécheresse physiologique. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plants flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par évapotranspiration **(Hassan et al., 2007)**.

### **1.3.2. Effet de la salinité sur les plantes**

La salinité du sol ou de l'eau est causée par la présence d'une quantité excessive de sels. Généralement un taux élevé de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  cause le stress salin. Le stress salin a un triple effet: il réduit le potentiel hydrique, cause un déséquilibre ionique ou des perturbations en homéostasie ionique et provoque une toxicité ionique. Cet état hydrique altéré conduit à une croissance réduite et limitation de la productivité végétale. Depuis que le stress salin implique aussi bien le stress osmotique qu'ionique **(Masmoudi, 2011)**, l'arrêt de la croissance est directement relié à la concentration des sels solubles ou au potentiel osmotique de l'eau du sol. La salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité **(Ben Khaled et al., 2003)**.

Durant le début et le développement du stress salin à l'intérieur de la plante, tous les processus majeurs tels que la photosynthèse, la synthèse des protéines, le métabolisme énergétique... sont affectés. La première réponse est la réduction de la vitesse d'extension de la surface foliaire, suivie par l'arrêt de l'extension avec l'intensification du stress (**Masmoudi, 2003**).

L'excès de sels dans le sol se traduit, en général, par des effets néfastes sur les cultures en entravant le développement normal de la plante. En effet, la présence des sels provoque les effets suivants :

- ✓ Effet soif : la salinité diminue la disponibilité de l'eau pour la plante en augmentant la pression osmotique de la solution du sol, s'opposant ainsi à l'absorption de l'eau (stress hydrique).
- ✓ Effet faim : dans un sol salin, ont lieu des perturbations du régime nutritionnel de la plante (**Parida et Das, 2005**) et ce, suite à une réduction de la solubilité de certains ions qui contrôlent les concentrations des éléments nutritifs du sol (stress nutritif).
- ✓ Toxicité : l'excès en une espèce chimique donnée (sodium, chlorures, etc.) se manifeste par une absorption déséquilibrée des ions qui pourraient conduire à l'intoxication de la plante.

La complexité du stress salin peut être expliquée par le fait qu'en réalité la plante dans les conditions salines est confrontée à trois contraintes différentes plus ou moins liées entre elles :

- Une contrainte hydrique ;
- Une toxicité causée par le sel ;
- Une perturbation de la nutrition.

La diminution de la croissance et de la productivité des plantes en conditions de contrainte saline a été reliée à deux origines possibles (**Arbaoui et al., 2000**) :

- ◆ La présence de sels dans le milieu de culture perturbe l'alimentation de la plante en eau et en éléments nutritifs essentiels.
- ◆ L'accumulation excessive des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  au niveau des tissus de la plante.

### **1.3.3. Etude de la relation salinité sol-eau**

En vue de l'étude des relations entre nappe phréatique et salinité du sol, quatre sortes de renseignements sont utiles :

- ✓ La profondeur de l'eau souterraine par rapport à la surface du sol.

- ✓ Le taux d'évaporation (climat).
- ✓ La conductivité hydraulique du sol (type du sol).
- ✓ La salure de l'eau souterraine (salinité).

- En général le taux d'évaporation des eaux phréatiques décroît sensiblement quand le niveau de la nappe phréatique descend. Dans le cas contraire le taux d'évaporation croît.

- En climat aride et semi-aride le taux d'évaporation des eaux phréatiques est supérieur à celui des climats humides et subhumides.

- Dans une même région et sous le même climat la profondeur critique d'une nappe d'eau douce en mouvement est supérieure à celle d'une nappe phréatique saumâtre (**Rahmoune et al., 2001**).

- La présence d'une nappe superficielle fonctionne comme une source supplémentaire de salinité, modifie généralement la répartition des sols dans la zone racinaire, la salinité, au lieu de croître avec la profondeur, sera souvent maximale près de la surface (**Wang et Nil, 2000**).

#### **1.3.4. Rapport entre la salinité du sol et celle de l'eau d'irrigation**

Des études pédologiques ont montré que la plupart des sols irrigués sont affectés par la salinité. Cette dernière est liée à la salinité de l'eau d'irrigation. La salinité développée au niveau du sol va de paire avec celle de l'eau d'irrigation. Plus la conductivité électrolytique de l'eau d'irrigation est forte plus la teneur en Na augmente, provoquant ainsi un enrichissement net en sodium soluble. Lorsque la conductivité croît, le faciès chimique passe du type (Ca, Cl) au type (Na, Cl). Les résultats ont montré que la salinisation était la conséquence d'une irrigation avec des eaux assez concentrées en sel. Bien que dans certains endroits, les eaux ne soient pas très salées, ce sont pourtant elles qui ont donné naissance aux différentes manifestations de salinisation à cause des caractéristiques spécifiques des sols (sols argileux) (**Morsli, 2007**).

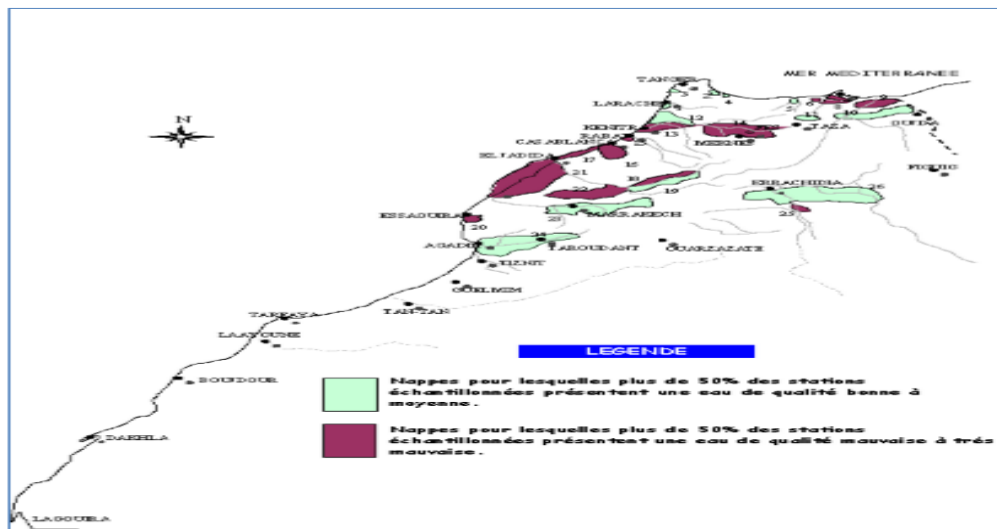
### **2. Etat général de la dégradation des eaux au Maroc**

#### **2.1. Dégradation de la qualité des eaux**

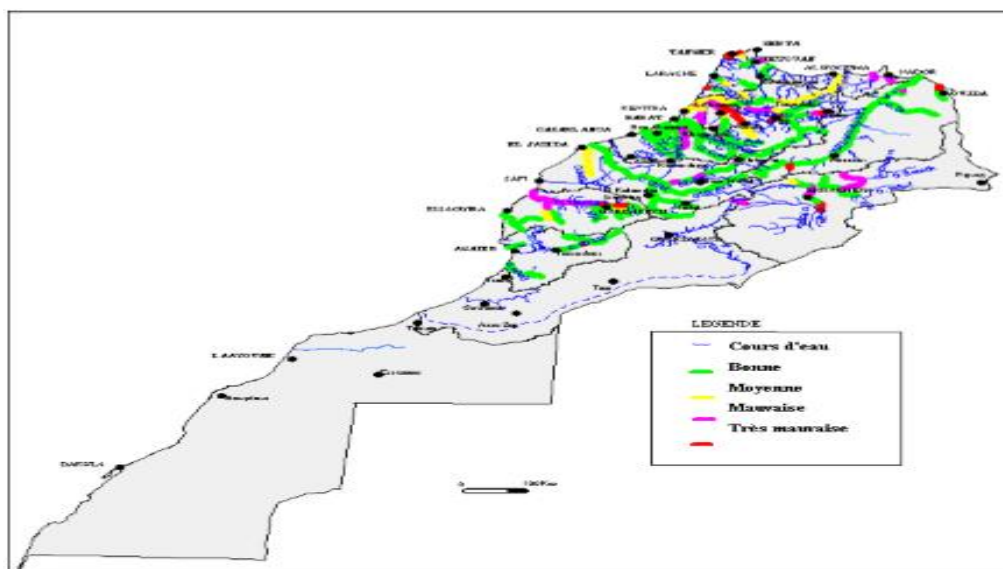
Au Maroc, entre 1950 et 1980, la qualité des eaux était moyenne à excellente indépendamment de l'hydraulicité (**Agoumi et Debbarh, 2006**), puis s'est fortement dégradée en raison des principales sources de pollution, qui sont les pollution domestique, industrielle et agricole (Figures 1 et 2). Par exemple durant l'année 1998-1999 la qualité des eaux, a été jugée dégradée, par la Direction Générale de l'Hydraulique, dans 37 % des stations échantillonnées et

bonne dans 53 %. En revanche, en 1999-2000 elle a été jugée dégradée dans plus de 50 % des stations . Des niveaux de pollution critiques sont observés dans plusieurs tronçons de cours d'eau.

Les eaux souterraines sont de meilleure qualité à l'exception de certaines nappes importantes sur la côte atlantique . La dégradation de la qualité des ressources en eau est observée au niveau de l'ensemble des bassins hydrauliques et plus particulièrement au niveau du bassin du Sebou qui a atteint des seuils de pollution alarmants en aval des grands rejets d'eaux usées domestiques et industrielles (SEE, 2009).



**Figure 1** : Carte de la qualité de l'eau des principales nappes d'eaux souterraines (SEE, 2009) .



**Figure 2** : Carte de la qualité globale des eaux superficielles (SEE, 2009).

## **2.2. Principales causes de la dégradation de la qualité des eaux**

Les principales causes de la dégradation de la qualité des eaux au Maroc sont :

- ✓ L'intrusion des eaux marines générée par le pompage excessif en zones littorales ;
- ✓ Le retard important dans le domaine de l'assainissement et de l'épuration des eaux usées domestiques ;
- ✓ Le retard dans le domaine de la dépollution industrielle et domestique ;
- ✓ L'utilisation non rationnelle des engrais , surtout les nitrates dans les périmètres irrigués :Tadla, Berrechid ,Triffa, Doukkala,etc. La répartition de la consommation des engrais selon les cultures montre qu'environ 32% des engrais sont utilisés dans les agrumes, les cultures sucrières et les cultures maraichères qui n'occupent que cinq pour cent de la superficie cultivée et qui se font essentiellement en irrigué (58% du tonnage ).Quant aux cultures céréalières, qui occupent 63% des superficies cultivées, elles ne mobilisent qu'environ 43% des tonnages globaux (Agoumi et Debbarh, 2008). Le niveau de pollution agricole par les phosphates et nitrates a été estimé à 10.000 tonnes/an en 1994. Pour plusieurs nappes phréatiques les teneurs en nitrates ont atteint des seuils limites dépassant les 50 mg/l qui sont fixés par l'OMS pour la potabilité des eaux ;
- ✓ L'utilisation non rationnelle des pesticides dans le domaine agricole. Environ 1 million d'hectares sont annuellement traitées avec les pesticides dont 60% en zones irriguées, alors que les zones bour et semi-arides sont faiblement traitées en raison de la faiblesse et l'irrégularité des pluies . Les quantités de pesticides utilisées par les agriculteurs sont jugés faibles et estimées à près 9.400 tonnes . Cependant les niveaux et types de pollution des eaux et des sols par les pesticides sont aussi mal connus et on estime que 0,5 à 1 % de ces produits se retrouvent dans les cours d'eaux .

Ces causes sont aggravées par le contexte de la rareté et l'irrégularité des précipitations et la faiblesse des écoulements qui en résulte, la concentration des activités socio-économiques et l'intensification agricole.

## **2.3. Impact de la mise en valeur intensive sous irrigation sur la qualité des eaux**

La dégradation de la qualité des sols et des eaux suite à l'irrigation constitue un danger sérieux pour la durabilité de ce système d'exploitation des terres. Il est bien connu que la mise en

valeur agricole sous irrigation dans les zones semi-arides et arides conduit le plus souvent à la dégradation de la qualité des sols (**Badraoui et Merzouk, 1994 ; Douaoui et Hartani, 2007**). Les principaux impacts sont:

- ✓ La salinisation secondaire des sols ;
- ✓ La recharge de la nappe par les eaux usées de drainage;
- ✓ La remontée de la nappe salée;
- ✓ La stagnation d'eau en surface dans le cas de sols à mauvais assainissement et drainage;
- ✓ La pollution des sols par l'utilisation abusive et non rationnelle des engrais et pesticides;
- ✓ La pollution des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides;
- ✓ La compaction des sols;
- ✓ Les pertes de matière organique ;
- ✓ L'acidification des sols.

### **3. Ressources en eau souterraines**

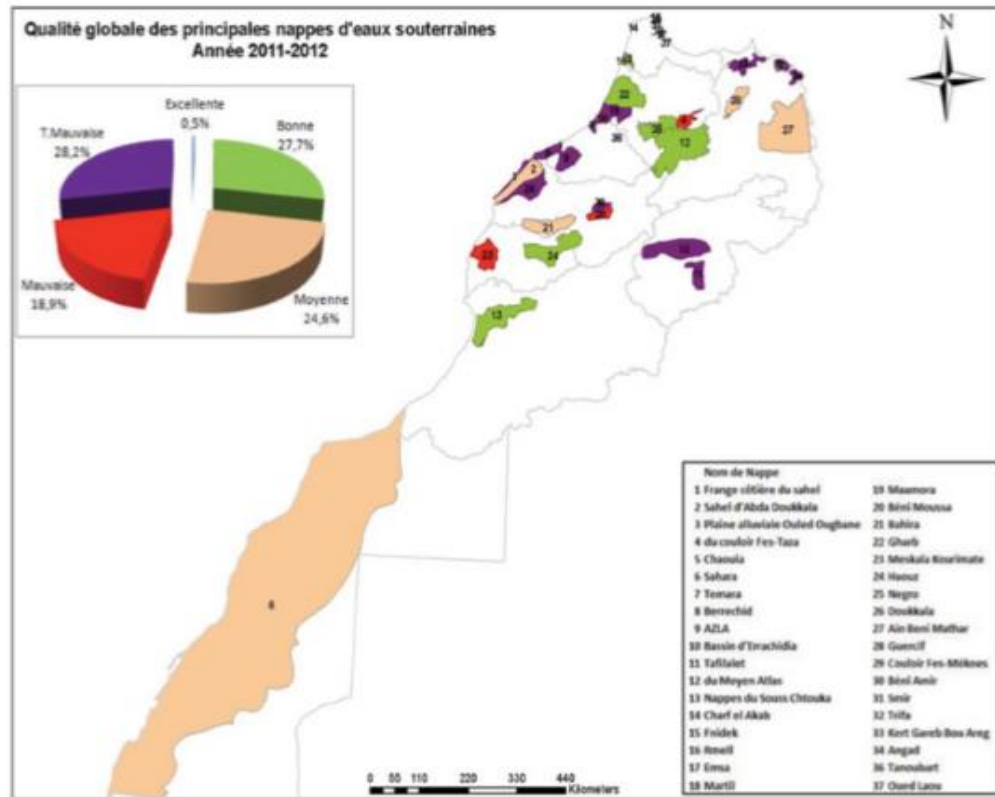
L'eau est un élément indispensable pour la vie mais sa disponibilité n'est pas assurée partout et sa qualité souvent ne respecte pas les normes concernant l'eau potable ce qui présente un risque pour la santé humaine. Les ressources en eau sont menacées de nos jours par la pollution qui provient de l'évacuation des eaux usées domestiques, industrielle et agricoles sans traitement dans les milieux naturels, de changement climatique, de la minéralisation naturelle et des pluies acides, etc. Les polluants superficiels peuvent infiltrer à travers le sol vers les nappes. Le danger de la pollution dépend des types et des concentrations des polluants. Les ressources en eau au Maroc sont confrontées à des problèmes de quantité et de qualité. Ces ressources sont limitées et menacées par la pollution dans la majeure partie du territoire (**NOVEC, 2013**).

#### **3.1. Evaluation de la qualité des eaux souterraines au niveau national**

Concernant les nappes d'eaux souterraines, la qualité bactériologique et organique des nappes contrôlées est excellente à bonne. Cependant, la qualité minéralogique et azotée connaît une détérioration par endroit ou généralisée. Celle-ci est due au contexte géologique de certaines nappes (Kert, Gareb, Bouareg, Tafilalte), aux activités en surface notamment les résidus des eaux usées (nappe de Martil , Angad) et à l'utilisation excessive des engrais et des pesticides (Triffa ,

Beni Amir, Beni Moussa, Gharb). Les nappes du moyen Atlas, Charf Lakab, Ouled Ogbane, Fnideq, la haute Moulouya, Guir et du Souss amont sont caractérisées par une eau de bonne qualité.

En général, 53% des stations d'eaux souterraines ont été de qualité excellente à moyenne contre 47% de qualité dégradée (Figure 3).



**Figure 3 : Qualité des principales nappes d'eaux souterraines à l'échelle nationale (Etat de la Qualité des Ressources en Eau au Maroc 2011-2012).**

### 3.2. Caractéristiques générales des eaux souterraines

Les eaux souterraines contribuent en grande partie à l'alimentation en eau potable en présentant de nombreux avantages par rapport aux eaux de surface tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif ;

- ✓ Sur le plan quantitatif, la capacité de stockage ; l'inertie des aquifères homogènes et leurs régimes très réguliers permettent aux eaux souterraines de jouer parfois un rôle de tampon entre les pluies très inégales dans le temps et les années de sécheresse.
- ✓ Sur le plan qualitatif, la protection des eaux souterraines est généralement meilleure que celle des eaux de surface vis-à-vis des pollutions massives. Leurs qualités

physicochimiques et leurs températures sont assez constantes. Certaines peuvent être consommées sans traitement et sans même une désinfection.

Les eaux souterraines présentent généralement les caractéristiques suivantes : Une température et une composition chimique constantes, une faible turbidité ; un faible indice de couleur ; une dureté parfois élevée suite au contact avec des formations rocheuses responsables de la dureté ; et une grande pureté bactérienne. L'exploitation des eaux souterraines à des fins agricoles ou de boisson s'effectuent via des puits, forages, sources. Les aquifères exploités sont divers et sont classés comme suit :

- ✓ **Nappe libres** : Ce sont des nappes à surface libre limitées au-dessus par la surface piézométrique, appelé toit, autrement dit, quand on creuse un puits, on traverse des terrains perméables avant de rencontrer l'eau (le niveau piézométrique) (**Bzioui, 2004**). C'est le cas des nappes superficielles de BENI AMIR, de BENI MOUSSA, d'EL HAOUZ, de TEMARA, Quand l'eau est proche du sol, ces nappes sont dites phréatiques (**Bzioui, 2004**).
- ✓ **Nappe captive** : Ce sont des nappes limitées au-dessus par une formation géologique imperméable, autrement dit un forage creusé dans un aquifère de ce type est artésien, c'est-à dire que l'eau peut remonter au-dessus de la couche géologique perméable constituant le réservoir et atteindra parfois la surface du sol. C'est le cas des nappes du SAISS profond, d'AIN EL ATI et d'AIN BENI MATHAR (**Bzioui, 2004**).
- ✓ **Nappe alluviale**: L'aquifère est constitué par les alluvions d'une rivière. L'eau de la nappe est en équilibre avec celle de la rivière et les échanges se font dans les deux sens. Les alluvions sont très perméables elles peuvent être très épaisses (une centaine de mètre) et constituer un réservoir très important qui sert à l'alimentation en eau des villes situées le long de la rivière c'est le cas du Gharb. Ces nappes soutenues par l'apport de la rivière, sont très vulnérables à la pollution (**Bzioui, 2004**).
- ✓ **Nappe karstique**: L'aquifère est dit karstique. Le karst défini un sous-sol calcaire fissuré ou microfissure présentant une grande vulnérabilité aux contaminations du fait des écoulements rapides par les fissures. En se fissurant, la craie forme des conduits souterrains, les karsts, de plusieurs décimètres de diamètre et d'une longueur pouvant atteindre plusieurs kilomètres. L'eau du karst provient de l'engouffrement de la pluie dans les bétoures, mais surtout du drainage de la nappe. La vitesse de circulation de

l'eau dans le karst est très élevée : elle varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres par heure (**Bzioui, 2004**).

### **3.3. Pollution des ressources en eau**

#### **3.3.1. Définition**

La charte européenne de l'eau la pollution comme une modification, généralement provoquée par l'homme, dans la qualité de l'eau, qui la rend impropre ou dangereuse à la consommation humaine, à l'industrie, à l'agriculture, à la pêche, aux loisirs, aux animaux domestiques et à la vie sauvage, sans subir d'altérations majeures. Cependant, ce liquide est d'un pouvoir quasi magique ; en effet, grâce à sa constante diélectrique et à ses liaisons hydrogène, l'eau peut dissoudre à peu près n'importe quelle substance et peut maintenir le soluté en solution presque indéfiniment (**Jabeen et al., 2015**).

#### **3.3.2. Types de pollution des eaux**









- La pollution bactériologique : La pollution bactériologique est l'introduction de bactéries, virus et organismes pathogènes dans l'eau, qui en modifient la qualité bactériologique naturelle. Le nombre de colibacilles (bactérie coliforme) présentes dans l'eau est choisi comme indice de ce type de pollution. Les effets de la pollution bactériologique sur l'homme sont l'entérite causée par certaines souches de coliformes, la fièvre typhoïde et parasite par les salmonelles infections virales (**Faye, 2017**).
- La pollution physique : Par pollution physique, on entend tout changement dans le caractère organoleptique d'une eau, tels que couleur, turbidité, goût, odeur et température. Ce type de pollution peut résulter de causes naturelles comme l'érosion, le ruissellement, la décomposition des matières végétales, la présence d'humus et de marécages. L'érosion accélérée des sols, à la suite de déboisement, de surcharge de pâturage ou de mauvaises pratiques culturales, peut provoquer une pollution physique grave, en recouvrant partiellement ou complètement le lit d'un cours d'eau (**Faye, 2017**).
- La pollution chimique : La pollution chimique est l'addition d'éléments ou composés chimiques qui modifient la présence ou la concentration des éléments chimiques naturels de l'eau et ce, de façon indésirable. La qualité d'une eau s'évalue grâce à l'analyse de plusieurs paramètres et indices à savoir : pH, (OD), (DBO), (DCO), ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), ( $\text{NO}_3^-$ ), ( $\text{PO}_4^{2-}$ ), les détergents, les hydrocarbures, les métaux et les produits organiques de synthèse (**Faye, 2017**).

- Pollution radioactive : Les rayonnements ionisants (alpha, beta, gamma) perturbent l'équilibre électronique des cellules des tissus vivants. Ils agissent par ionisation, en arrachant des électrons aux atomes qu'ils rencontrent, les transformant ainsi en ions. Une cellule est lésée ou détruite, selon le degré d'ionisation obtenu. Comme pour les pesticides.

### 3.3.3. Sources des pollutions des eaux souterraines

Le tableau 1 montre à titre illustratif des sources de contamination des eaux souterraines.

**Tableau 1** : Sources de la pollution des eaux souterraines (PEOI, 2008)

	Origine			
	Municipal	Industriel	Agricole	Individuel
Sur ou près de la surface	déchets municipaux sel pour le dégivrage des routes 	produits chimiques: stockage et flaques carburants : stockage et flaques 	flaques chimiques engrais pesticides 	Engrais produits d'entretien détergents huile de moteur peinture pesticides 
Sous la surface	décharge égouts 	canalisations réservoirs de stockage souterrains 	stockage en souterrain réservoirs puits: mal construits ou abandonnés 	Système septique puits: mal construits ou abandonnés 

### 3.3.4. Protection des eaux souterraines

Pour qu'un risque de pollution donné se traduise par une menace d'une source d'approvisionnement en eau souterraine, cela va dépendre principalement de son emplacement par rapport à la source d'eau / zone de captage et secondairement de la mobilité du/ des contaminant (s) concerné (s).

Une attention particulière doit être portée à la surveillance de la qualité des eaux souterraines gérée généralement par les réseaux publics d’approvisionnement en eau à partir de forages d’eau ou sources, au moyen de systèmes de distribution par canalisation. Deux éléments clés sont :

- ✓ Un échantillonnage régulier de l’eau ;
- ✓ L’analyse chimique en laboratoire.

Les évaluations des risques de pollution des eaux souterraines devraient inciter les autorités municipales ou les organismes de réglementation de l’environnement à prendre les deux mesures préventives (pour éviter la pollution future) et des mesures correctives (pour contrôler les menaces existantes). Pour protéger les aquifères contre la pollution, il est essentiel de restreindre l’occupation des sols, et les pratiques d’élimination des déchets et de rejet des effluents (**Valipour, 2015**).

### **3.4. Indicateurs de l’altération de la qualité des eaux souterraines zone irriguée**

#### **3.4.1. Toxicités des pesticides**

De par leur caractère biocide, les pesticides peuvent être toxiques pour tous les organismes vivants. En fonction de leur mode d’action, de leur persistance et de leur capacité de bioaccumulation, cette toxicité s’exprime différemment selon les espèces. Les animaux peuvent être touchés directement, notamment en bout de chaîne trophique (biomagnification), ou par le biais de la destruction de leur habitat sous l’effet des herbicides. Tous les pesticides sont potentiellement dangereux pour l’homme, la toxicité dépendant du mode de pénétration dans l’organisme. Dans la littérature scientifique, l’exposition à certains pesticides a été liée chez l’homme à des cancers associés à la suppression immunitaire, des réactions allergiques, des réponses auto-immunes, la suppression de la fonction immunitaire et une plus grande sensibilité aux agents pathogènes (**Commission européenne, 2003**).

#### **3.4.2. Risques sur l’environnement**

Lorsque les pesticides sont mal utilisés, ou utilisés en très grandes quantités, les substances chimiques peuvent contaminer l’eau, l’air et les sols et exercer des effets néfastes sur les végétaux et les espèces sauvages, ainsi que sur la diversité biologique (influencée également par toute une série d’autres facteurs). Ainsi, les produits phytopharmaceutiques disséminés dans l’environnement de manière incontrôlée par dérive de pulvérisation, lixiviation ou ruissellement peuvent polluer les sols, les eaux superficielles et les eaux souterraines. La contamination de

l'environnement peut également se produire pendant et après l'application, lors du nettoyage de l'équipement ou en cas d'élimination non contrôlée et illégale des pesticides ou des récipients et fûts qui les contenaient (UNEP, 2021).

### 3.4.3. Pollution par les nitrates

Les nitrates constituent aujourd'hui la cause majeure de pollution des grands réservoirs d'eau souterraine du globe qui par ailleurs présentent en général une qualité chimique et bactériologique satisfaisante pour l'alimentation (Venkateswari et al., 2008). Cette pollution a débuté à la fin des années 1950 et n'a fait qu'augmenter depuis lors. Alors qu'en l'absence de contamination, la teneur en nitrates des eaux souterraines varie de 0,1 à 1 mg/l par litre d'eau, elle dépasse souvent aujourd'hui 50 mg/l, norme retenue pour les eaux potables par l'Organisation Mondiale de la Santé et la Norme Marocaine 03-7-001. Désormais, de telles eaux nécessitent donc un traitement spécifique pour pouvoir être consommées. L'essentiel de cette pollution est dû à la différence entre les apports en nitrates sous forme d'engrais et ce qui est réellement consommé par les plantes. La pollution par les nitrates est un problème complexe (Birkinshaw et Ewen, 2000).

Les nitrates sont également consommés par les microorganismes (bactéries et champignons) présents dans la terre. Ils participent ainsi à la synthèse des matières organiques du sol qui stockent en leur sein l'azote contenu dans les nitrates qui n'ont pas été consommés dans l'année par les plantes, et ce jusqu'à leur mort (Wolfe et Patz, 2002). Leur décomposition par les bactéries libère alors l'azote qu'elles contiennent sous la forme de nitrates. Mais cette libération peut se produire à tout moment de l'année, notamment lorsque les plantes sont au repos et s'alimentent peu : dans ce cas, ne pouvant être consommés par ces dernières, les nitrates libérés sont lessivés par les eaux de ruissellement et d'infiltration. Les nitrates emportés par les eaux d'infiltration au cours d'une année ne proviennent donc que pour une faible part des engrais apportés cette même année.

La pollution des eaux par les nitrates présente un double risque. Ingérés en trop grande quantité, les nitrates ont des effets toxiques sur la santé humaine. Par ailleurs, ils contribuent avec les phosphates à modifier l'équilibre biologique des milieux aquatiques en provoquant des phénomènes d'eutrophisation. La pollution des eaux par les nitrates est aujourd'hui un problème planétaire. L'origine et les effets néfastes de la contamination nitrique ont été largement étudiés (Dakak, 2015).

### **3.4.4. Effet sur l'environnement**

Les différentes formes de l'azote sont en perpétuelle évolution, elles passent de l'une à l'autre par des processus physicochimiques, et surtout biochimiques (**Belghiti et al., 2013**). Les nitrates sont présents dans l'eau par lessivage des produits azotés dans le sol et par décomposition des matières organiques ou des engrais de synthèse ou naturels (**Samake, 2002**). Les nitrates sont répertoriés parmi les principales catégories de polluants chimiques rencontrés dans l'eau. Leur présence excessive dans le sol peut contaminer les différentes sources d'eau et soulever des préoccupations pour la santé de l'homme et de l'animal. En effet, les nitrates sont des polluants facilement lixiviables et atteignent la nappe aquifère sans subir des modifications (**Idrissi Alalami et al., 2007**).

La lixiviation des nitrates vers la nappe constitue, d'une part une perte économique pour les agriculteurs et, d'autre part une pollution des eaux souterraines. L'irrigation est aussi mise en cause pour sa contribution directe ou indirecte sur l'amplification de la contamination des eaux souterraines. Par ailleurs, l'approche liant à la fois la fertilisation et l'irrigation rend la maîtrise des pollutions diffuses, dues aux nitrates, particulièrement difficile (**Menani, 2009**). La lixiviation des nitrates est aussi reliée à la nature du sol. En effet, l'eau se déplace plus rapidement dans les sols sablonneux que dans les sols argileux, et les ions nitrates sont prédisposés à la lixiviation d'une manière plus intense. La texture du sol est aussi d'une importance capitale dans la mesure où elle conditionne la rétention et la conductibilité verticale de l'eau. En effet, étant donné que les ions sont négativement chargés, les nitrates suivent inévitablement le mouvement vertical des eaux infiltrées et par conséquent, les sols sablonneux demeurent les plus vulnérables à la lixiviation des nitrates (**Ibnoussina et al., 2007**).

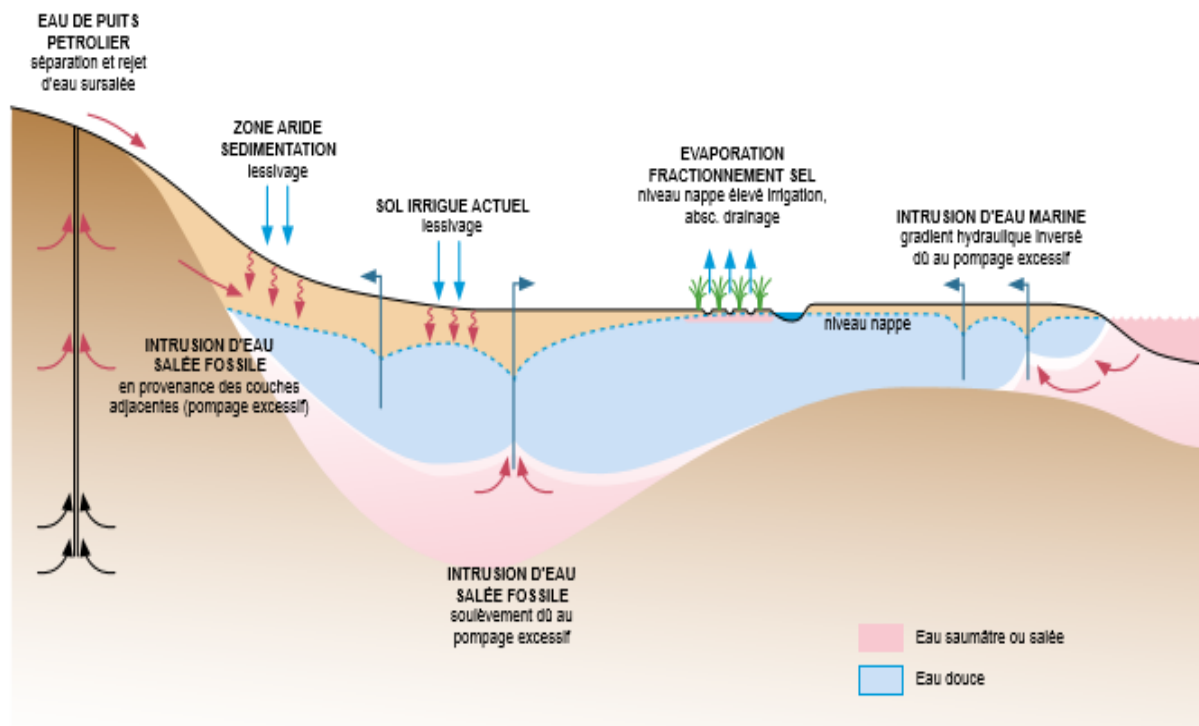
## **4. Caractéristique physico-chimiques des eaux d'irrigation**

### **4.1. Salinité des eaux**

Le progrès de l'irrigation est suivi, dans la plupart des situations, par l'apparition de phénomène de sodification ou d'alcalinisation des sols à plusieurs degrés. Ces situations sont étroitement liées aux mécanismes naturels du milieu tel que le sol et le climat, ainsi, il est primordial de prédire la modalité de gestion des eaux conçues pour l'irrigation dont la qualité est déterminante. Dans les régions caractérisées par un climat semi-aride et une évapotranspiration très accentuée, le recours à l'irrigation pour la majorité des cultures est indispensable (Figure 4).

La salinisation est décrite comme étant l'augmentation progressive de la concentration des sels hydrosolubles dans les eaux superficielles et les sols sous l'effet d'apport d'eau d'irrigation chargée en nutriments, de plus de l'aridité du climat ainsi que les conditions hydrologiques particulières (lessivage insuffisant, proximité de la nappe, ...) qui ne font qu'aggraver la situation (**Bauder et al., 2011**).

La composition des eaux de la nappe est résultante de plusieurs mécanismes d'apport d'eau d'irrigation, de la concentration sous l'effet indirect de l'évapotranspiration de la végétation, de la dilution par les retombées annuelles d'eau, en plus de l'écoulement des sels sous l'influence combinée du système de drainage incident et du drainage naturel du sol. Elle est aussi influencée par la précipitation ou la dissociation des composés minéraux, et donc capable d'évoluer en fonction des modifications apportées, mais à échelle de temps pluriannuel, le bilan de changement de la composition des eaux est plus au moins stable (**Lambert, 2000**).



**Figure 4** : Les principaux mécanismes de salinisation des eaux souterraines (**Commission européenne, 2003**)

#### 4.2. Sodium dans l'eau

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément a comme origine l'altération de la roche et du sol, des intrusions 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 imperméable 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 (Soutter et al., 2007).

Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme les carottes, les haricots, les fraises, les framboises, les oignons, pour en nommer quelques-unes. De grande quantité de sodium combiné avec du chlorure donne à l'eau un goût salé. Si l'eau passe par un système d'aspersion et que le calcium et le magnésium sont bas, des teneurs moyennes à élevées de sodium peuvent défolier les plantes sensibles.

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (SAR). Le SAR décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation.

Voici la façon dont on calcule le SAR (le sodium, le calcium, et le magnésium sont exprimé en meq/L) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

De l'eau avec un SAR de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas. Un usage continue d'eau avec un SAR élevé provoque une déstructuration du sol.

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problème reliés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol. Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de SAR encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm avec un SAR au-dessus

de 4 doivent être utilisés avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols. De l'eau avec un SAR de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas. Un usage continu d'eau avec un SAR élevé provoque une déstructuration du sol (**Leone et al., 2007**).

### **4.3. Alcalinité**

L'alcalinité est une mesure du pouvoir de l'eau à neutraliser les acides, c'est un peu comme le « pouvoir tampon de l'eau ». 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 (également dans une moindre mesure, des hydroxydes, des bases organiques, des borates, des ions ammoniums, phosphates et silicates). Tant que l'acide n'a pas maîtrisé les ions responsables de l'alcalinité, le pH ne bouge pratiquement pas. Une fois le processus d'acidification enclenché, la réaction produit alors de l'eau (H<sub>2</sub>O), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est libéré dans l'air ainsi que le cation accompagnateur (soit le calcium ou le magnésium). L'alcalinité de l'eau est généralement exprimée en ppm (mg/L) de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) (**Binet et al., 2009**).

### **4.4. Turbidité**

La turbidité est un paramètre de l'opacité de l'eau causée par des matières en suspension composées d'argile, de limon, de particules organiques, grains de silice et de divers organismes microscopiques. Les matières en suspension sont généralement produites par l'érosion des sols et les particules minérales ou organiques détachées et transportées par ruissèlement vers les plans d'eau. Pour l'irrigation des cultures, la turbidité peut engendrer un colmatage des systèmes d'irrigation, plus particulièrement les systèmes goutte à goutte. Les matières en suspension peuvent se décanter à cause des faibles débits utilisés lors de l'irrigation par le système de la goutte à goutte, ce qui contribue à l'entrave des conduits. En plus, si les matières en suspension (MES) ont des dimensions supérieures à celles des orifices des goutteurs, elles s'accumuleront et entraîneront un inévitable bouchage des goutteurs, affaiblissant ainsi l'irrigation et la production (**Grasso et al., 2011**).

### **4.5. Dureté**

D'après **Perrodon et Brémont (1979)**, on distingue la dureté carbonatée ou temporaire qui proviennent de la combinaison des ions calcium et magnésium avec les ions carbonates, et la dureté permanente qui provient de la combinaison des ions sulfates et chlorures. En générale :

$$\text{TCa} + \text{TMg} = \text{TH}.$$

La dureté totale de l'eau (TH) consiste à la somme des concentrations en degrés de calcium et du magnésium contenus dans l'eau (**Ayouba et GueL, 2015**),

Avec TCa est la dureté calcique et TMg et la dureté magnésienne. TH est déterminé par titrage à l'EDTA (complexation) en présence d'Eriochrome T à pH 10. Le seul TCa peut être déterminé à l'EDTA mais à pH 12 et en présence de calcéine.

Pour le contrôle des eaux déminéralisées (Na, Si, etc...), on fait recours à des techniques spectrophotométriques (**Ayouba et GueL, 2015**).

La dureté de l'eau se situe idéalement entre 100 mgCaCO<sub>3</sub>/l et 200 mgCaCO<sub>3</sub>/l. Une valeur trop faible entraîne la corrosion, une valeur trop élevée, ce qui est le plus fréquent, entraîne l'entartrage si le pH est trop élevé. Il faudra alors surveiller attentivement la valeur du pH.

## **5. Composition ionique des eaux**

### **5.1. Ammoniac**

Il provient principalement de la dégradation des matières organiques azotées, il peut s'infiltrer avec l'eau dans les sols vers les nappes. Dans les eaux souterraines, l'ammonium peut être lié à la réduction des nitrates (en association avec le fer) :



Il peut aussi être d'origine agricole, urbaine ou industrielle. La présence d'ammonium dans les eaux souterraines provient d'une contamination de surface à partir d'effluents ou d'un phénomène de réduction des nitrates fréquent dans les nappes captives et nous donne un indice sur la pollution organique. Elle peut également donner un indice sur une éventuelle pollution microbiologique (**Baran et al., 2006**).

### **5.2. Sulfate**

Les sulfates sont présents à l'état naturel dans l'eau. Ils sont liés aux cations majeurs : calcium, magnésium et sodium. A part ceux du plomb, du baryum et du strontium. Le sulfate de calcium est la forme la plus retrouvée dans les eaux souterraines et les concentrations les plus élevées sont généralement d'origine naturelle. On peut évoquer certaines hypothèses pouvant expliquer la variation des sulfates qui proviennent fondamentalement de la dissolution des sels évaporitiques (gypse, anhydrite, etc.), l'origine marine du terrain (calcaires et dolomies marins), l'oxydation des sulfures des roches ignée, métamorphiques ou sédimentaires et les activités agricoles (**Ben Abbou et al., 2014**). Toutefois, leur présence dans les eaux peut aussi provenir des

apports agricoles et des rejets industriels ou domestiques. Les sulfates contenus dans l'eau souterraine sont fournis par la dissolution du gypse (sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )). Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) proviennent du ruissellement ou d'infiltration dans les terrains à gypse. Ils résultent également de l'activité de certaines bactéries (chlorothiobactéries, rhodothiobactéries, etc.). Cette activité peut oxyder l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) toxique en sulfate (**HCEFLCD, 2006**).

### **5.3. Potassium**

Les teneurs en potassium des eaux peuvent provenir d'altération météorique et d'érosion des minéraux contenant du potassium comme le feldspath, lessivage des sols contenant des engrais, eau de mer (dans les régions où il peut avoir invasion d'eau salée). Les adoucisseurs d'eau à base de chlorure de potassium représentent la source la plus fréquente de potassium dans l'eau potable (**Nouayti et al., 2015**).

### **5.4. Calcium et magnésium**

Ces deux éléments sont présents dans toutes les eaux naturelles. En ce qui concerne l'eau souterraine, la source la plus fréquente de calcium et de magnésium est l'érosion des roches, comme le calcaire et la dolomite, et des minéraux, comme la calcite et la magnésite, la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la dolomie ( $\text{CaMgCO}_3$ ), la magnésie ( $\text{MgCO}_3$ ), le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), l'apatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ ) ou la fluorine ( $\text{CaF}$ ). Les variations des concentrations des eaux en calcium et en magnésium résulteraient du fait que le calcium provient essentiellement de la dissolution des dolomies par les eaux météoriques, la concentration en calcium peut subir à l'inverse de celle du magnésium, dérivant en plus de l'érosion des sols et des altérités et demeurant en solution dans l'eau (**Bouchelaghem et al., 2014**). Le calcium et le magnésium sont très présents dans les eaux dures et peuvent donc avoir des effets négatifs sur la qualité de l'eau potable.

### **5.5. Bicarbonates**

La plupart des bicarbonates des eaux naturelles provient de la dissolution de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) dans l'eau. Ils proviennent également de la dissolution des carbonates de calcium ou de magnésium en présence de gaz carbonique dans l'eau (**Rodier, 2005**).

### **5.6. Chlorures**

Le chlorure est présent à l'état naturel dans les eaux souterraines en raison de l'altération météorique et la lixiviation des roches sédimentaires et des sols, ainsi que de la dissolution des dépôts de sel (**Tarik, 2005**).

**Chapitre II :**  
**PARAMETRES DE LA QUALITE DES SOLS**

## 1. Qualité des sols

### 2.1. Salinité des sols

La salinisation des sols, processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles qui aboutit à la formation d'un sol salin, a été identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres et donc à la diminution de la production agricole. D'après la **FAO (2002)**, la salinisation des sols due à l'irrigation réduit la surface des terres irriguées de 1 à 2 % par an. Ces sels ont été reconnus comme un problème depuis des milliers d'années, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au-delà de la zone racinaire (**IPTRID et FAO, 2006**). Ce phénomène constitue ainsi une menace réelle pour la sécurité alimentaire mondiale. En effet, la salinisation affecte déjà 400 millions d'ha et menace gravement une surface équivalente (**Legros, 2009**). Leur distribution géographique se superpose presque entièrement à celle des zones arides et semi arides et des zones côtières (**Grünberger, 2005**). Par ailleurs, il est estimé que le monde perd au moins 3 ha de terres cultivables chaque minute à cause de la salinité du sol, soit 1,5 Mha/an (**Miyamoto et Chacon, 2006**).

En Afrique, près de 40 Mha sont affectés par la salinisation, soit près de 2% de la surface totale (**Mashali et al., 2005**). En région méditerranéenne, la salinité constitue une contrainte dans beaucoup de périmètres de grandes cultures où la recherche de plantes adaptées à des seuils élevés de salinité devient un impératif pour la production agricole. Au Maroc, plus que 5 % de la surface totale sont déjà affectés par la salinisation à différents degrés (**Antipolis, 2003**). La superficie des sols affectés par la salinité est estimée à 350000 ha de sols salés au Maroc (**Badraoui et al., 2000**), dont 158300 ha sont dans les zones irriguées suivantes :

**Tableau 2 : Sols affectés par la salinité dans les périmètres irrigués au Maroc (Badraoui et al., 2000).**

Périmètres irrigués	Surface totale des sols affectés par la salinité (x 1000 ha)	Surface affectée en %
Gharb	15,0	12,5
Basse Moulouya	30,2	27,7
Haouz	24,2	29,9
Tafilalet	20,9	70,4
Ouarzazate	14,5	65,9
Tadla	19,3	24,45
Doukkala	0,6	1
Sous Massa	9,8	28,8
Loukkous	2,8	14,5
Bahira	21,0	22,8

Dans le périmètre de Gharb, notre zone d'étude la salinité touche environ 15000 ha de sols irrigués dans ce périmètre (Tableau 2), soit près de 13% de la surface agricole irriguée (Badraoui et al., 2000).

Ce phénomène de salinisation des sols cultivés apparaît souvent dans des conditions défavorables telles que l'évapotranspiration intense, et l'insuffisance de ressources en eau qui conduit souvent à l'utilisation d'eau salée pour l'irrigation (Zizi et Ndiaye, 2012).

## 1.2. Définition de la salinisation des sols

Dans la littérature classique, la salinisation se définit comme l'ensemble de processus ayant comme aboutissant une augmentation des espèces ioniques dans le sol donné. On évalue donc cette salinité par la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de pate saturé du sol (Maillard, 2001). Les sels trouvés dans le sol peuvent contenir du sodium, du potassium, du magnésium et du calcium, en plus du chlorure, du sulfate, du carbonate et du bicarbonate. On peut distinguer la salinisation primaire et secondaire. La salinisation primaire due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes. Donc elle se produit suit à des facteurs géologiques. Climatiques et topographiques, sans une intervention anthropique. La salinisation secondaire et la résultante des activités humaines liées aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation avec l'absence des plans de drainage et la présence des eaux saumâtres. L'étendue globale des sols touchés par la salinisation primaire dans le monde est environ 955 millions

d'hectares, tandis que la salinisation secondaire affecte près de 77 millions d'hectares, avec 58% dans les zones irriguées (**Metternicht et Zinck, 2003**).

Au Maroc, la salinisation secondaire est induite essentiellement par la salinisation des eaux au contact de formations salifères et l'usage des eaux salées de nappe pour l'irrigation. Elle affecte les écoulements de surface et les nappes et consécutivement les sols irrigués. C'est le cas de plusieurs ORMVA comme Gharb, Doukkala, Ouarzazate, Tadla, Tafilalet et Moulouya (**Debbagh et Badraoui, 2007**).

### **Classification des sols**

Il existe trois grands groupes de sols affectés par les sels, il s'agit des sols salins, des sols salins-sodiques et des sols sodiques, qui diffèrent en fonction de leur conductivité électrique, pourcentage de sodium échangeable (ESP), rapport d'adsorption du sodium (SAR) et de leur pH. Les trois types de sols sont rassemblés dans le tableau 3.

**Tableau 3 : Différents types de sols affectés par les sels (Essington, 2004).**

Type de sol	Type de sel	CE	ESP	pH	Caractéristiques
<b>Salin</b>	Présence de sels solubles neutres; de chlorure et de sulfate de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium (calcium et magnésium dominants)	> 4dS/m	<15 (SAR<13)	< 8,5	Croissance des plantes est généralement contrainte par une faible infiltration, une faible stabilité et aération du sol. La plupart du temps, l'évaporation de l'eau entraîne la formation d'une croûte blanche à la surface du sol, connue sous le nom de croûte blanche alcaline, ce qui était auparavant le terme utilisé pour qualifier les sols salins.
<b>Salin-sodique</b>	Grande concentration de sels neutres et d'ions sodium	> 4dS/m	>15 (SAR>13)	< 8,5	La croissance des plantes sur ce type de sol peut être affectée à la fois par des excès de sel et par des excès de sodium. Ces sols ont des caractéristiques intermédiaires entre celles des sols salins et celles des sols sodiques. Si les sels solubles sont lessivés et en particulier si le SAR des eaux de lessivage est élevé, le niveau de salinité baisse, mais l'ESP augmente et les sols salins sodiques se transforment en sols sodiques.
<b>Sodique ou alcalin</b>	Faibles quantités de sels solubles neutres, grande quantité d'ions sodium	< 4dS/m	>15 (SAR>13)	> 8,5	Ce type de sol est le plus affecté par les sels et le plus dégradé. Il présente une dispersion des particules du sol et des pores obstrués, ces phénomènes augmentent avec la profondeur. L'absence de larges pores dans les sols dispersés rend le sol peu perméable. Le taux d'infiltration est tellement réduit que l'eau tend à former des flaques. Ce type de sol est dit engorgé.

### 1.3. Critères de la salinité des sols

La salinité des sols est appréciée par deux critères importants à savoir la teneur en sels solubles et le pourcentage du sodium échangeable (ESP) dans le sol.

#### ✓ Sels solubles

La principale source de sels dans le sol est constituée par des minéraux naturels de la croûte terrestre dont le sel est libéré progressivement par désagrégation puis solubilisation. La salinisation des sols, par l'apport des sels solubles en quantités importantes, peut détériorer la qualité physico-chimique du sol et diminuer sa productivité agricole (IPTRID et FAO, 2006). En sciences du sol, les sels solubles sont des éléments chimiques minéraux qui sont plus solubles que le gypse. Ce dernier présente une solubilité de 2.0l g/l à 20°C alors que le chlorure de sodium (NaCl) présente

une solubilité de 360g /l soit 180 fois plus soluble que le gypse. Ces sels présents dans le sol sont composés de cations tels que le sodium  $\text{Na}^+$ , le calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et le magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  et des anions tels que les chlorures  $\text{Cl}^-$  et les bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ . On peut aussi rencontrer, mais en faible quantité, le potassium  $\text{K}^+$ , l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , les nitrates  $\text{NO}_3^-$ , et les carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  (**Cramer, 2002**).

✓ **Pourcentage de sodium échangeable (ESP)**

L'irrigation des sols par une eau saline peut causer une absorption élevée de l'ion sodium au niveau des sites d'échange des particules (**Cramer, 2002**). Cet effet peut avoir lieu aussi bien dans les sols salins que dans les sols non salins et il est apprécié par le pourcentage de sodium échangeable :

$$\text{ESP} = (\text{Na}^+ \text{ échangeable} / \text{CEC}) \times 100$$

Si la proportion des sites d'échange occupés par le sodium est élevée, les sols peuvent devenir alcalins avec des pH allant de 8,5 à 10,5 (**Li et al., 2007**).

**1.4. Causes de la salinisation des sols**

L'irrigation conduit le milieu vers un nouvel équilibre selon la qualité des eaux d'irrigation. Elle impose également une nouvelle dynamique aux sels et à l'eau. Cette dynamique se traduit par une remontée de la nappe phréatique (**Antipolis, 2003**).

- ✓ Rôle de l'eau : L'eau joue le rôle de véhicule pour les sels. Elle transporte les sels à la parcelle lorsqu'on irrigue et les emporte par lessivage au cours des événements pluvieux ou en cas d'excès d'eau lors des irrigations.
- ✓ Rôle du climat : Le climat intervient par sa composante évaporation. Les contextes arides et semi-arides sont généralement caractérisés par de faibles pluies et de fortes évaporations. Il y a donc peu d'eau pour assurer le lessivage et le transport des sels. Le lessivage des sols est donc local et les sels ne sont pas transportés très loin. Les sols salins se rencontrent donc plus dans ces régions que dans les contextes humides (**Elhagwa et al., 2011**).
- ✓ Rôle du drainage des sols : Le mauvais drainage des sols ainsi que la présence de nappe d'eau peu profonde contribuent également aux processus de salinisation. Lorsque les sels ne sont pas transportés hors de la zone irriguée, la remontée des nappes d'eaux salines par capillarité favorise l'accumulation de sels dans la zone des

racines. Ce phénomène est à craindre dans des contextes où la nappe phréatique se trouve à moins de 2m du niveau du sol (**Delaunoy et al., 2009**).

- ✓ Rôle de la géologie du sol : La salinité du sol peut être d'origine géologique nommée salinité naturelle. Les minéraux dont les sels, peuvent avoir des origines naturelles dans la plupart des cas (**Sommerfeldt et al., 2012**). Les réactions et les phénomènes géologiques sont la cause directe et indirecte de l'augmentation de la concentration en sel dans les cours d'eau, par la suite dans les sols.

### **1.5. Conséquences de la salinisation**

Au cours des irrigations, il peut y avoir une accumulation de sels dans le sol. On assiste à une diminution de la disponibilité en eau pour la plante. La force d'absorption que la plante devra exercer pour extraire l'eau doit être plus importante que celle qui retient l'eau dans la matrice du sol. Dans le cas échéant, la plante ne sera pas en mesure d'extraire l'eau du sol en quantité suffisante et souffrira d'un déficit hydrique (sécheresse physiologique). La salinité génère ainsi un déficit hydrique au niveau de la plante et une réduction de sa croissance (**Denden et al., 2005**).

#### ✓ **Effets de la salinité**

La salinité des sols a des effets négatifs, mais elle peut avoir des effets positifs sur les cultures jusqu'à une certaine limite.

➤ Effets positifs de la salinité : Parmi les effets positifs, on peut citer l'augmentation du nombre de fruits par plante, bien que la taille de ces derniers soit un peu réduite, une bonne consistance et une bonne apparence du fruit. Le résidu sec du fruit contient plus de sels minéraux que les fruits provenant d'un sol non salé.

#### ➤ Effets négatifs de la salinité

- Effet osmotique : Les mouvements de l'eau à travers les membranes cellulaires sont attribués essentiellement aux forces osmotiques (**El Malki, 2007**). L'eau passe du compartiment ayant une pression osmotique la plus faible (milieu hypotonique) vers le compartiment ayant la pression osmotique la plus forte (milieu hypertonique) dont la concentration tend à diminuer. Le sel augmente la pression osmotique du milieu de culture diminuant ainsi la quantité d'eau disponible à la plante il en résulte un ralentissement de la croissance des plantes (**IPTRID et FAO, 2006**).

- Effets spécifiques des ions : Certaines concentrations ioniques en Na<sup>+</sup> peuvent être à l'origine de phénomène de toxicité pour les cultures. Ces effets sur les plantes se traduisent par des

lésions sur les feuilles, dès que la teneur en cet élément atteint 0.05% dans les tissus. Les ions considérés toxiques aux plantes sont le  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et le bore. Les effets du sel sur la croissance et le développement de la plante se traduit généralement par réduction de la croissance dont l'intensité varie selon l'espèce et la composition ionique du sol (**Madhava Rao et al., 2006**).

### **1.6. Méthodes de mesure de la salinité des sols**

Plusieurs études ont démontré les méthodes de détermination de la salinité des sols, notamment les méthodes de suivi de la culture (**Kloppmann et al., 2011**), la mesure de la conductivité électrique des extraits de la pâte saturée, la mesure non invasive de la conductivité électrique avec l'induction électromagnétique (EM), la mesure in situ de la conductance électrique avec réflectométrie du domaine temporel (TDR).

### **1.7. Moyens techniques de lutte contre la salinisation**

Les moyens de lutte contre la salinité sont de plusieurs natures, nous essayerons dans cette partie d'aborder les principales (**Marlet et Job, 2006**).

- ✓ **Le drainage** : Les problèmes de salinité dans les périmètres irrigués sont souvent liés à la présence d'une nappe peu profonde et saline, elle alimente en permanence la zone racinaire en sel au fur et à mesure que l'eau est utilisée par la plante. Cette accumulation de sel est très marquée dans les régions chaudes à cause d'une forte évaporation de l'eau. D'où l'installation de drains ouverts ou enterrés ou de puits drainant qui est nécessaire pour entraîner une partie de l'eau salée vers une zone où le sel peut être stocké sans risque (**Tanji et Kielen, 2002**).
- ✓ **Le lessivage des sols** : L'apport de doses supplémentaires pour le lessivage permet de diminuer l'accumulation des sels solubles. Il consiste donc à apporter une dose d'irrigation supérieure aux besoins de la plante. Toutefois, le lessivage n'est efficace qu'en présence d'un réseau de drainage fonctionnel (**FAO, 1988**).
- ✓ **Le choix des assolements** : Ce choix est d'autant plus important que toutes les cultures ne possèdent pas les mêmes aptitudes à extraire de l'eau dans un sol salé. Certaines cultures sont donc capables de fournir un rendement acceptable même à des niveaux de salinité du sol élevé (Tableau 4). En effet, le degré de tolérance aux sels des plantes peut varier de 1 à 10. Cette gamme étendue de tolérance permet un emploi des eaux jugées inutiles auparavant (**Lymbery et al., 2013**).

**Tableau 4** : Niveau critique de conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée  
Caractéristique de quelques espèces (Herrero et al., 2003).

	<b>Cultures</b>	<b>Niveau critique de la C.E (dS/m)</b>
<b>GRANDES CULTURES</b>	Arachide	3,2
	Betterave à sucre	7,0
	Blé	6,0
	Canne à sucre	1,7
	Coton	7,7
	Haricot	1,0
	Maïs	1,7
	Orge	8,0
	Soja	5,0
	Betterave rouge	4,0
<b>CULTURES MARAICHERES</b>	Carotte	1,0
	Chou	1,8
	Citrouille	4,7
	Epinard	2,0
	Haricot	1,0
	Maïs sucre	1,7
	Navet	09
	Oignon	1,2
	Pomme de terre	1,7
	Chiendent	7,5
	<b>CULTURES FOURRAGERES</b>	Dactyle pelotonné
Dolique		2,5
Luzerne		2,0
Mais fourrager		1,8
Sesbanie		2,3
Trèfle		1,5
Vulpin des prés		1,5
Abricotier		1,6
Amandier		1,5
Avocatier		1,7
<b>CULTURES FRUITIERES</b>	Citronnier	1,3
	Fraisier	1,0
	Olivier	2,7
	Oranger	1,7
	Pêcher	1,7
	Poirier	1,7
	Prunier	1,5

## 2. Fertilité des sols

### 2.1. Evolution historique du concept de fertilité de sol

La définition de la fertilité a évolué avec le temps. Au XVII<sup>e</sup> siècle, elle était perçue comme une conséquence directe de la qualité de la terre, décrite par ce qu'on peut observer sans caractérisations chimiques : sa définition se réduisait ainsi essentiellement à la texture du sol. La fertilité d'une parcelle était alors considérée comme une donnée, une caractéristique intrinsèque du sol, à laquelle l'agriculteur devait s'adapter en choisissant les cultures (**Delville, 1996**).

Avec le début de la modernisation (notamment la motorisation) de l'agriculture en Europe à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, les agronomes ont proposé de modifier les techniques culturales. Ils concevaient la fertilité comme une dynamique dépendant des méthodes de culture et pouvant être améliorée moyennant un certain coût. Avec l'essor de la chimie au XIX<sup>e</sup> siècle, les agronomes se sont penchés sur les constituants du sol. Le concept de fertilité a alors pris le sens d'une mesure quantitative, liée à la richesse du sol en éléments minéraux (**Delville, 1996**).

Selon cette approche, le sol contient un stock initial d'éléments minéraux qui peut augmenter ou décroître en fonction des pratiques culturales. La richesse d'un sol est alors perçue comme une sorte de capital, qui peut être appauvri ou enrichi en fonction des pratiques mises en œuvre par les agriculteurs sur leurs terres (amendements, fumiers, etc.). Si elle introduisait pour la première fois la notion de potentiel chimique, cette définition de la fertilité des sols réduite à un capital d'éléments minéraux présentait l'inconvénient de ne pas rendre compte des mécanismes agronomiques et du rôle des techniques et des cultures (**Delville, 1996**). **Soltner, (1990)** a alors fait évoluer cette approche en définissant la fertilité d'un sol comme la conjugaison de facteurs fonciers et de facteurs techniques.

Pour **Barbier, (1955)** cité par **Morel, (1996)**, la fertilité d'un sol exprime la potentialité maximale de production du sol considéré en considérant que tous les facteurs dépendant de l'agriculteur accèdent à leur pleine efficacité. Dans un contexte pédoclimatique donné, elle se mesure par l'importance des récoltes portées par le sol lorsque lui sont appliquées les techniques culturales appropriées. L'importance des récoltes est de ce fait l'indicateur de la fertilité de ce sol. En ce qui concerne le sol proprement dit, il paraît opportun de rechercher une définition de sa fertilité dans les causes intrinsèques de son aptitude à porter des récoltes plus ou moins abondantes. La référence aux besoins mêmes des racines suggère la définition suivante «la notion de la fertilité d'un sol correspond à la facilité avec laquelle, pendant toute la durée de la culture, la racine peut

bénéficier dans ce sol des différents facteurs de la croissance végétale : chaleur, eau, ensemble des éléments chimiques nécessaires à la plante, composés organiques favorisant la croissance ». Pour l'agronome, la production d'un milieu agricole est l'expression du bon ou mauvais état de fonctionnement de cette interaction (**Pieri, 1990**).

Le concept de la fertilité s'applique à différentes échelles de complexité. L'école française (**Tourte, 1977**) tend à l'appliquer à un niveau plus général : celui du milieu rural considéré comme un système dont les productions résultent des interactions entre ses trois constituants fondamentaux : le milieu humain et naturel (climats, sols, plantes, animaux) et le milieu technique (défini comme étant le mode de gestion des espaces ruraux).

## **2.2. Définitions de la fertilité**

La fertilité d'un sol est définie comme étant la résultante de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les interactions entre ces différentes propriétés donnant au sol sa capacité à nourrir les plantes (**Soltner, 1986**). Cette définition est la plus opérationnelle et s'adapte le mieux à notre thème d'étude.

## **2.3. Types de fertilité de sol**

### **2.3.1. Fertilité physique des sols**

La fertilité physique d'un sol correspond au potentiel de production lié à l'ensemble de ses propriétés physiques (aération, cohésion, humidité, etc.). Elle est essentiellement déterminée par trois caractères.

#### **2.3.1.1. Profondeur**

Le sol fournit et régule les ressources minérales et hydriques pour les plantes. Il participe à la recharge des nappes d'eau souterraines et joue ainsi un rôle de régulateur hydrologique. C'est également un système épurateur des eaux en retenant et en dégradant les éléments contaminants qu'elles contiennent.

De nombreuses propriétés du sol interviennent sur sa capacité à retenir l'eau ou à dégrader des polluants. Mais on oublie souvent que la profondeur du sol est l'un des facteurs les plus importants. En effet, plus le sol est profond, plus il peut stocker d'eau et d'éléments. La dégradation des contaminants est d'autant plus efficace que leur temps de résidence dans le sol est important. La connaissance de la profondeur du sol est donc essentielle à la fois pour connaître les aptitudes culturales des sols, mais également dans de nombreuses problématiques environnementales.

La profondeur d'enracinement peut être plus grande que la profondeur du sol lorsque le matériau géologique est meuble ou fracturé ce qui permet la pénétration des racines. Cela revêt une grande importance pour les cultures pérennes (arboriculture, forêts, vigne) car les plantes peuvent alors s'enraciner très profondément, particulièrement dans certains sols peu profonds. La plante peut alors puiser l'eau et les nutriments nécessaires à sa croissance dans la roche (**Antoni et al, 2011**).

Il est très important de déterminer l'épaisseur des horizons accessibles aux racines, en particulier dans les sols tropicaux qui possèdent fréquemment en profondeur des horizons impénétrables (cuirasse, ligne de pierre, casseroles ...). Lorsque ces matériaux sont proches de la surface le volume de terre exploitable par les racines est réduit. Ce fait lié à une pauvreté générale qui peut se révéler très néfaste surtout pour les plantes à système racinaire pivotant.

Dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux l'horizon gravillonnaire a plusieurs actions :

- Action mécanique directe sur la pénétration des racines. Ceci intervient surtout dans le cas des très hautes teneurs en gravillons (supérieures à 60 % en poids de terre totale).
- Diminution de la richesse chimique totale du sol.
- Action sur les rapports de l'eau et du sol.
- Diminution de la porosité totale du sol.

La meilleure façon de juger l'action des horizons gravillonnaires sera d'en mesurer les constantes physiques (porosité, perméabilité, rétention d'eau) (**Vallerie, 1968**).

### **2.3.1.2. Texture**

La texture de sol, en tant que critère de différenciation des particules élémentaires entrant dans la fraction minérale (caractérisée par leur volume et forme), est définie par leur répartition numérique en fonction de la géométrie (**Prevost, 2006**).

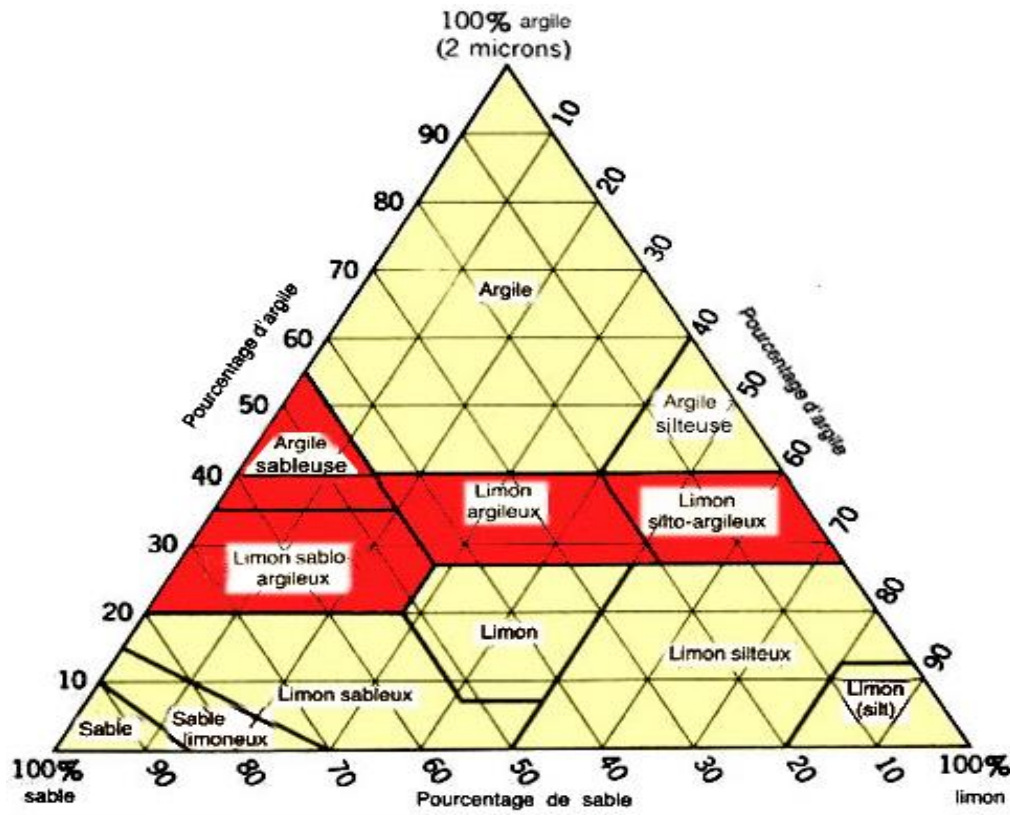
L'objectif de l'analyse de texture consiste à différencier par la taille des éléments minéraux du sol et à quantifier leur répartition pondérale dans des classes de diamètres prédéfinies. La classification du sol se fait d'une manière générale en deux étapes :

- ✓ La gamme granulométrique est subdivisée en intervalles, formant une échelle texturale
- ✓ Les trois classes texturales les plus significatives sont retenues pour la constitution d'un triangle textural.

La terre fine se compose de trois classes texturales :

- ✓ **Sable** : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre apparent est compris entre 0,05 et 2 mm ;
- ✓ **Limon** : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre apparent est compris entre 2 et 50 µm ;
- ✓ **Argile** : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre apparent est inférieur à 2 µm.

Les trois classes permettent de classer le sol dans une famille regroupant les sols ayant des caractéristiques granulométriques voisines par l'utilisation du triangle texturale (Figure 5).



**Figure 5** : Diagramme triangulaire des classes texturales de sol d'après les dimensions des particules USDA (**Richer de Forges, 2008**)

### 2.3.1.3. Structure

La structure renvoie à la disposition des assemblages des éléments constituant en agrégats ou en unités structurales (**Memento de l'agronome, 2002**). Elle dépend donc en partie de la texture. Les sables et les limons jouent un rôle de squelette, les argiles et la matière organique celui de ciment (**Delville, 1996**). La structure a une influence sur l'enracinement, détermine la cohésion

du sol la résistance à l'éclatement des agrégats et de sa porosité. On distingue trois grands groupes de structure :

- ✓ **Structure mécanique** : facilement visible dans les sols secs, disparaît plus ou moins par humidification, par suite d'un gonflement des agrégats amenant la fermeture des interstices (**Bronick et Lal, 2005**).
- ✓ **Structure construite** : les agrégats arrondis résultent pour partie ou en totalité de l'activité biologique. Les êtres vivants exercent d'abord une fragmentation et incorporation des débris végétaux à la matière minérale, fabrication des boulettes fécales, et fournissent également des agents liants, provenant de la décomposition des débris organiques par l'activité microbienne, des microorganismes eux-mêmes, des sécrétions des racines des plantes et enfin de l'action de la mesofaune du sol, et servant aussi de ciment dans la construction des agrégats. Ajoutant aussi que l'humus calcique joue un rôle important pour une liaison efficace (**Calvet, 2003**).
- ✓ **Structure précipitée** : elle est d'origine physico-chimique, ainsi que les hydroxydes peuvent se précipiter soit sous forme de flocons arrondis, soit de pellicules enrobant les grains de sable, dans les sols podzolisés en particulier (**Lamande, 2003**).

La structure construite est la plus résistante à la dégradation, ceci est dû à l'action stabilisante de la matière organique sur les argiles (**Bronick et Lal, 2005**), par contre la structure mécanique et la plus fragile

Plusieurs phénomènes sont à l'origine de la dégradation de la structure du sol, ainsi le gonflement, l'éclatement (lors d'une pluie et dans les conditions où les agrégats sont très secs et contiennent des pores d'air, les agrégats exercent une force de succion et l'air commence à se comprimer, au moment où la pression de l'air dépasse la force de cohésion, la motte subit un éclatement (**Calvet, 2013**), dispersion des ciments, action mécanique des gouttes de pluie et compaction.

### 2.3.2. Fertilité biologique des sols

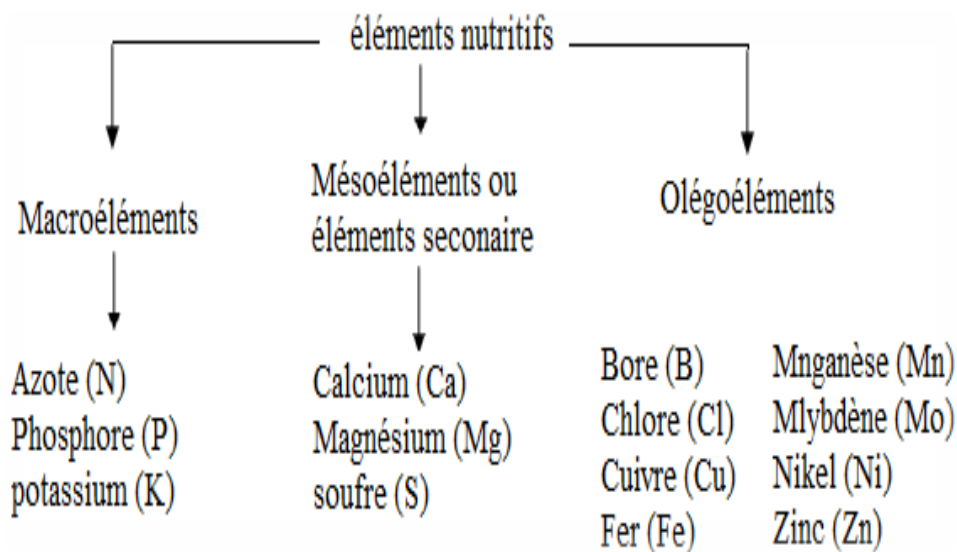
Le sol est un milieu vivant. Il abrite, partiellement ou complètement, de nombreuses espèces animales et végétales ; de nombreux cycles biologiques passent par le sol. La plupart des réactions ayant lieu dans le sol ne sont pas purement chimiques mais biochimiques. L'ensemble des interactions issues des organismes vivants constitue un réseau complexe qui conditionne la fertilité d'un sol (**CSRE, 2003**).

L'activité biologique du sol permet :

- ✓ La formation des pores (galeries créés par les racines, vers de terre, taupes,...) et d'agrégats (dépôts de déjections dans le sol et à la surface du sol).
- ✓ La dissolution de minéraux issus de la roche mère (Ca, Mg, Fe, P,...) et la fabrication de nouveaux minéraux (calcite, hydroxydes,...)
- ✓ L'alimentation des plantes en minéralisant la matière organique,
- ✓ L'humification de la matière organique, et ainsi leur transformation en composés stables.
- ✓ La fixation d'azote atmosphérique (bactéries libres du sol)
- ✓ L'amélioration de la nutrition en eau, en phosphore et en oligoéléments des plantes.
- ✓ L'amélioration de la capacité de rétention en eau du sol lors de l'action de bioturbation de la faune.

### 2.3.3. Fertilité chimique des sols

Les éléments majeurs dont les plantes ont besoin pour leur croissance sont l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le manganèse et le soufre. Les oligoéléments ou éléments traces reconnus indispensables au développement des végétaux, sont le bore, le fer, le cuivre, le zinc, le molybdène, souvent présent en quantité suffisante dans un sol riche, est également indispensable (Figure 6). L'importance de ces éléments minéraux et de leur passage sous forme assimilable détermine la capacité d'un sol à se maintenir chimiquement fertile ou au contraire à s'épuiser rapidement.



**Figure 6** : Classification des éléments nutritifs essentiels (Campbell, 1978)

### 2.3.3.1. Éléments nutritifs majeurs

#### 2.3.3.1.1. Azote

##### a. Formes et quantité d'azote dans le sol

L'azote présent dans le sol provient au départ de l'azote (N) de l'atmosphère. L'air que nous respirons renferme, en volume, 78 % de N. Cet azote est en grande partie inutilisable par la plupart des végétaux et doit subir une conversion chimique pour passer de sa forme gazeuse (N<sub>2</sub>) à une forme biodisponible (azote ammoniacal ou nitrique) (Tableau 5).

- ✓ L'azote organique : constitue 85 à 95 % de l'azote total du sol. Cette fraction peut être composée jusqu'au 50% d'acides aminés et d'une proportion réduite de sucres aminés. Le reste est constitué par des formes difficilement identifiables ou des composants de la partie des hétérocycles des molécules humiques qui sont stables et de dégradation lente (**El Haroui, 2004**).
- ✓ L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol en contient rarement plus de 10% d'azote inorganique total. C'est sous la forme de nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) qu'il est principalement absorbé par les cultures, exception faite de certains cas où la culture se développe en conditions d'anoxie. C'est le cas des rizières où la forme prédominante est le NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

**Tableau 5** : Présentation des états et des formes de l'azote (**El Alaoui, 2007**)

Formes de l'azote	Formules	Observations
<b>Azote gaz (inerte)</b>	N <sub>2</sub> (g)	Représente près de 80% de l'air que nous respirons
<b>Ammoniac gaz</b>	NH <sub>3</sub> (g)	Généralement la forme de N la moins chère, toxique à des concentrations élevées
<b>Ammonium</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Disponible pour la plante, retenu par les charges négatives du sol
<b>Nitrate</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Très mobile, exige de la plante plus d'énergie que l'ammonium pour être incorporé dans les protéines
<b>Nitrite</b>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Mobile dans le sol, généralement en faible concentrations, toxique aux petits mammifères
<b>Azote organique</b>	-	Fournit lentement N à la solution du sol

##### b. Rôle de l'azote

L'azote est présent dans nombre de structures végétales et de processus végétaux. Comparativement à d'autres éléments nutritifs, il est nécessaire en grandes quantités.

L'azote entre, avec d'autres éléments (carbone, oxygène, hydrogène, ...), dans la composition des acides aminés formant les protéines (Martin, 2003 ; Nemeth, 2001). L'azote est un élément essentiel pour la constitution des cellules et la photosynthèse (chlorophylle). C'est le principal facteur de croissance des plantes est un facteur de qualité qui influe sur le taux de protéines des végétaux. L'azote ammoniacal a tendance à réduire le pH dans la rhizosphère, ce qui peut accroître la biodisponibilité de certains oligo-éléments, en particulier le manganèse.

### c. Cycle de l'azote

Le cycle de l'azote (Figure 7) intègre les diverses formes d'azote du sol et de l'atmosphère, et toutes les transformations entre ces différentes formes (El Khodrani., 2018).

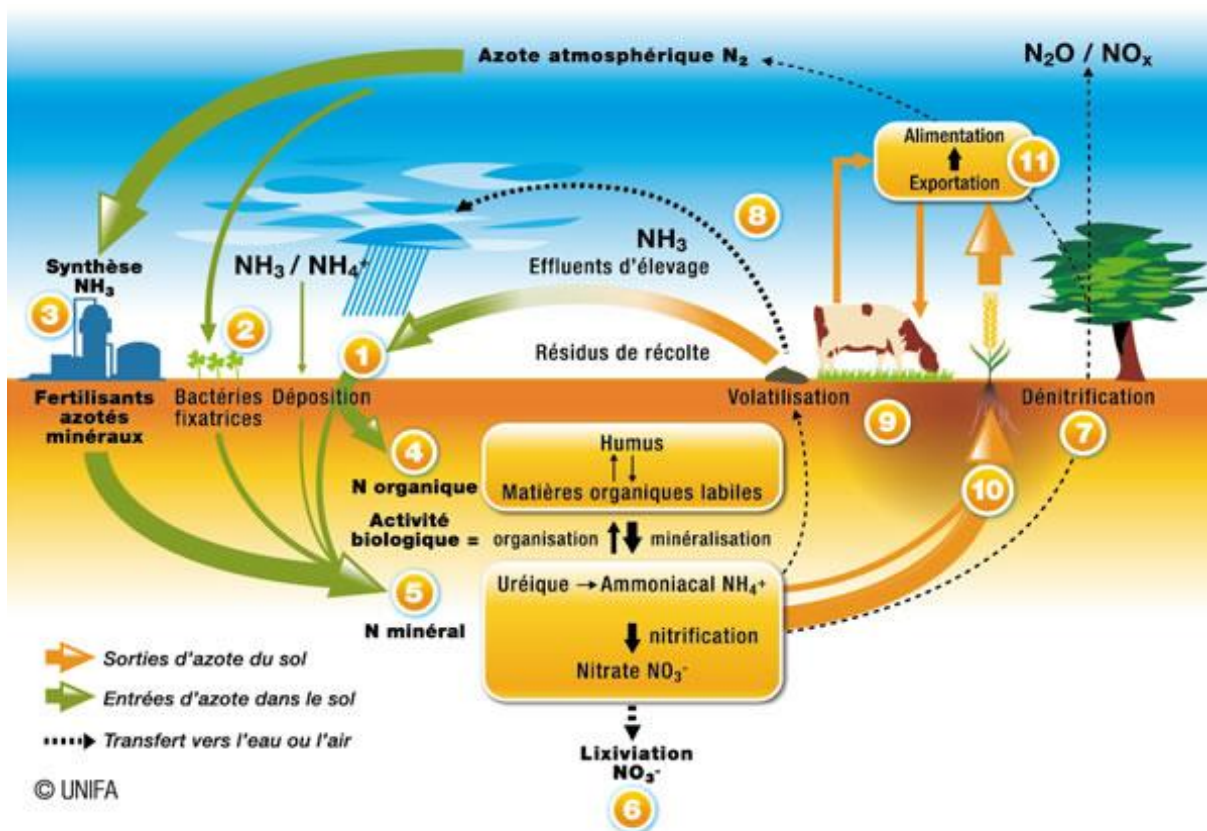


Figure 7 : Cycle d'azote dans le sol (El Khodrani, 2018)

- 1) Le recyclage d'éléments nutritifs contenus dans les matières organiques de toute nature constitue une ressource importante pour la fertilisation.

- 2) Seuls des organismes appartenant au groupe des procaryotes peuvent réduire l'azote en une forme recombinaée assimilable. Les rhizobia appartiennent à ce groupe. Les systèmes fixateurs les plus efficaces sont des symbioses, qui réalisent un couplage entre la fixation de l'azote et la photosynthèse.
- 3) La synthèse de l'ammoniac utilise le gaz naturel et l'eau pour produire du dihydrogène ( $H_2$ ) et le combiner au diazote ( $N_2$ ) présent dans l'atmosphère pour former l'ammoniac ( $NH_3$ ), matière première des grands engrais azotés.
- 4) L'organisation microbienne transforme l'azote minéral en matière organique. L'activité des bactéries du sol est principalement stimulée par l'ammonium. L'azote organique n'est pas directement assimilable par les plantes ; il doit d'abord être minéralisé.
- 5) La nitrification par les bactéries du sol transforme l'ammonium en nitrate dans un délai pouvant aller de quelques jours à quelques semaines. Des pertes sous formes de protoxyde d'azote ou d'oxyde d'azote peuvent survenir durant ce processus de lixiviation.
- 6) La lixiviation du nitrate est un entraînement en profondeur par l'eau du sol. Cela se produit principalement en hiver lorsque l'excès d'eau fait migrer le nitrate hors de portée des racines.
- 7) La dénitrification a lieu lorsque les micro-organismes manquent d'oxygène. Lors de ce processus, les bactéries du sol transforment le nitrate (et les nitrites) en diazote gazeux ( $N_2$ ) et en protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) et oxydes d'azote ( $NO_x$ ) qui rejoignent l'atmosphère.
- 8) L'hydrolyse de l'urée par les enzymes du sol convertit l'urée en ammonium et en  $CO_2$ . En fonction de la température, l'hydrolyse est plus ou moins rapide. Le pH du sol autour des granulés d'urée augmente de manière significative durant le processus, favorisant ainsi la volatilisation de l'ammoniac produit au cours de la réaction.
- 9) L'assimilation de l'ammonium par les racines est plus lente que celle du nitrate. L'ammonium de charge positive ( $NH_4^+$ ) est adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et les racines doivent l'atteindre. La majeure partie de l'ammonium est transformée en nitrate avant absorption par les plantes.
- 10) L'assimilation du nitrate est rapide en raison de sa forte mobilité en solution dans l'eau du sol. La majorité des cultures annuelles utilisent préférentiellement le nitrate à l'ammonium.
- 11) La récolte est transformée en nourriture (humaine ou animale), ce qui est l'objectif fondamental de l'agriculture.

#### d. Carence en azote

Les carences en azote apparaissent habituellement en premier sur les vieilles feuilles. La plante utilise le peu d'azote dont elle dispose pour développer ses nouvelles feuilles, au détriment de ses feuilles plus vieilles et moins productives. Celles-ci prennent alors une teinte vert pâle ou jaune. Le temps froid du début du printemps provoque souvent chez les plantes une carence en azote temporaire. Celle-ci résulte plus souvent de mauvaises conditions de croissance et d'un mauvais développement des racines que du manque d'azote dans le sol (Pyradeau, 2002).

**Le signe de carence en azote sont :**

- ✓ Végétation languissante ;
- ✓ Feuillage vert clair ou jaunâtre (chlorose) ;
- ✓ Plantes de taille peu développée.

#### 2.3.3.1.2. Phosphore

##### a. Formes et quantités de phosphore dans le sol

Le phosphore n'a pas de forme gazeuse. Il peut exister dans le sol sous différents états : phosphate en solution ( $\text{HPO}_4^{2-}$  ou  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), P adsorbé, P organique et P dans les minéraux du sol (Tableau 6). Cependant les plantes absorbent la majeure partie de leurs besoins en P sous la forme des ions ortho-phosphatés primaires  $\text{HPO}_4^{2-}$ . De plus petites quantités d'ions ortho-phosphatés secondaires ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) sont aussi absorbées. Il faut noter que le P organique qui consiste en P de la matière organique représente entre 25% et 65% de P total du sol de surface et le P minéral (tel que les minéraux phosphatés calciques) et le P adsorbé représentent le reste (Mcdowell et Sharpley, 2003).

**Tableau 6 :** États et formes du phosphore dans le sol (El Alaoui, 2007)

États du phosphore	Exemple de formule moléculaire	Observations
<b>Ions phosphates</b>	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ ,	Formes que la plante absorbe
<b>P adsorbé</b>	-	Peut devenir soluble lentement
<b>P minéral :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Phosphates de calcium</li><li>▪ Phosphates d'aluminium</li><li>▪ Phosphates de fer</li></ul>	$\text{CaHPO}_4$ $\text{AlPO}_4$ $\text{FePO}_4$	Relativement insoluble
<b>P organique</b>	-	Fournit P disponible lentement pour les plantes et les microorganismes

## b. Rôle du phosphore

Le phosphore joue un rôle de véhicule et de moteur dans la photosynthèse, facteur de croissance, il favorise le développement racinaire, est un facteur de précocité et a un rôle essentiel dans la fécondation et la mise en place du fruit (**Memento de l'agronome, 2000**). Le phosphore intervient de façon déterminante dans la constitution de certains éléments structuraux essentiels à la vie cellulaire (phospholipides, acides nucléiques), dans les échanges d'énergie et dans de très nombreuses réactions métaboliques (**Gallet et al., 2003**). Cet élément essentiel pour les plantes existe généralement en quantité réduite dans les sols ferralitiques.

## c. Cycle du phosphore

Le cycle du phosphore (Figure 8) est très semblable à celui de l'azote et les micro-organismes jouent également un rôle important dans le processus de minéralisation et d'immobilisation (**El Khodrani, 2018**).

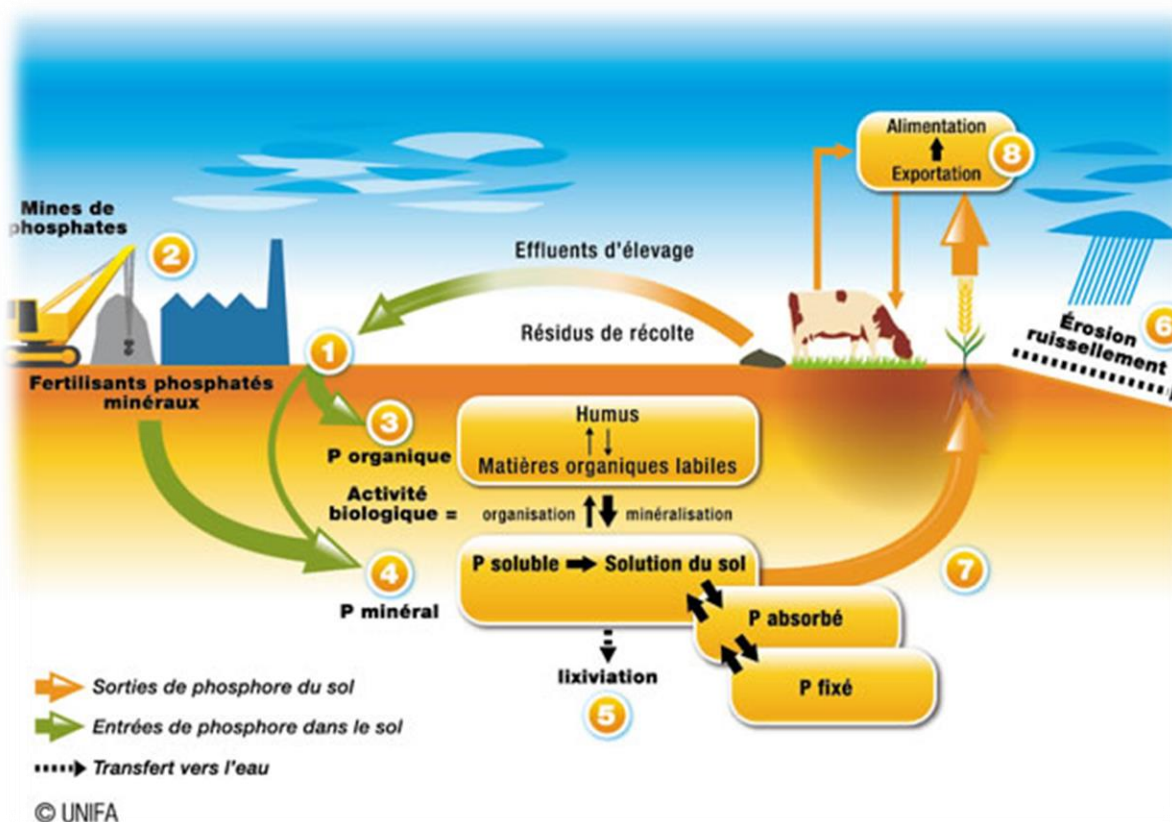


Figure 8 : Cycle du phosphore dans le sol (El Khodrani, 2018)

- 1) Le recyclage d'éléments nutritifs contenus dans les matières organiques de toute nature : effluents d'élevage, résidus de culture et autres sous-produits organiques issus des activités humaines, constitue une ressource importante pour la fertilisation.
- 2) Le phosphate est extrait de mines à ciel ouvert, il est généralement transformé par l'action d'acides minéraux pour produire des formes plus solubles, assimilables par les plantes.
- 3) La minéralisation de la matière organique du sol (et des effluents) produit du phosphore minéral (phosphate) soluble.
- 4) Le phosphore évolue en permanence entre les formes fixées, adsorbées et solubles.
- 5) La lixiviation du phosphore soluble (entraînement en profondeur par l'eau du sol) est un phénomène extrêmement limité (moins de 1kg/ha).
- 6) L'entraînement du phosphore hors de la parcelle est faible, il se fait par ruissellement (terrains en pente) et érosion (phosphore lié aux particules solides).
- 7) L'absorption racinaire des végétaux se fait exclusivement à partir du phosphore de la solution du sol.
- 8) La récolte est transformée en nourriture (humaine ou animale), ce qui est l'objectif fondamental de l'agriculture.

#### **d. Carence en phosphore**

Des plantes ayant une teinte violacée peuvent souffrir d'une carence en phosphore, bien que ce symptôme ne soit pas fiable. La production d'anthocyanine, qui est à l'origine de cette coloration, est une réaction type à un facteur de stress. De nombreux autres facteurs peuvent provoquer cette coloration. La carence en phosphore est plus difficile à déceler visuellement qu'une carence en azote ou en potassium (**Drouet, 2010**).

##### **Le signe de carence en phosphore sont :**

- ✓ Feuillage vert foncé, bronzé ou taché de rouge ;
- ✓ Rameaux grêles ou mal formés ;
- ✓ Floraison peu abondante ;
- ✓ Avortement des fleurs ;
- ✓ Maturation tardive des fruits.

### **2.3.3.1.3. Potassium**

#### **a. Formes et quantités du potassium dans le sol**

Les minéraux du sol sont riches en potassium, bien que peu de ce dernier soit assimilable par les plantes. Le potassium se présente dans le sol sous diverses formes (El Alaoui, 2007).

- ✓ Potassium non assimilable : Dans une proportion de 90 à 98 %, le potassium du sol n'est pas assimilable par les plantes. Il est fixé à des minéraux comme le mica et le feldspath, qui résistent relativement à la météorisation. Toutefois, avec le temps, la météorisation de ces minéraux libère lentement du potassium dans le sol.
- ✓ Potassium lentement assimilable dans une proportion de 1 à 10 %, le potassium total du sol est lentement assimilable par les végétaux. Il est piégé entre les couches de silice et d'alumine des argiles. Ces argiles se contractent et se gonflent au fil des sécheresses et des précipitations. Le potassium piégé entre les couches d'argile est lentement libéré lorsque l'argile se gonfle. À l'opposé, il n'est plus assimilable quand l'argile se contracte sous l'effet de la sécheresse.
- ✓ Potassium assimilable : Dans une proportion de 1 à 2 %, le potassium du sol est immédiatement assimilable et est retenu dans la solution de sol ou se présente sous une forme échangeable avec la matière organique ou les argiles du sol

#### **b. Rôle du potassium**

Le potassium est toujours abondant dans la matière sèche des végétaux. Très mobile dans la plante (Hinsinger et al., 2011), il y joue un rôle multiple :

- ✓ Il intervient dans l'équilibre acido-basique des cellules et régularise la pression osmotique
- ✓ Il réduit la transpiration des plantes, augmentant la résistance à la sécheresse.
- ✓ Il active la photosynthèse et favorise la formation des glucides dans la feuille.
- ✓ Il participe à la formation des protéines, et favorise leur migration vers les organes de réserve (tubercules et fruits ).
- ✓ Il contribue à renforcer les parois cellulaires, offrant aux plantes une meilleure résistance à la verse et à l'agression des maladies ou parasites

### c. Cycle du potassium

Le cycle du potassium (Figure 9) est dépendant des caractéristiques physiques et chimiques du sol. Il s'agit d'un élément assez mobile mais qui peut être adsorbé sur la capacité d'échange cationique CEC des sols (El Khodrani, 2018).

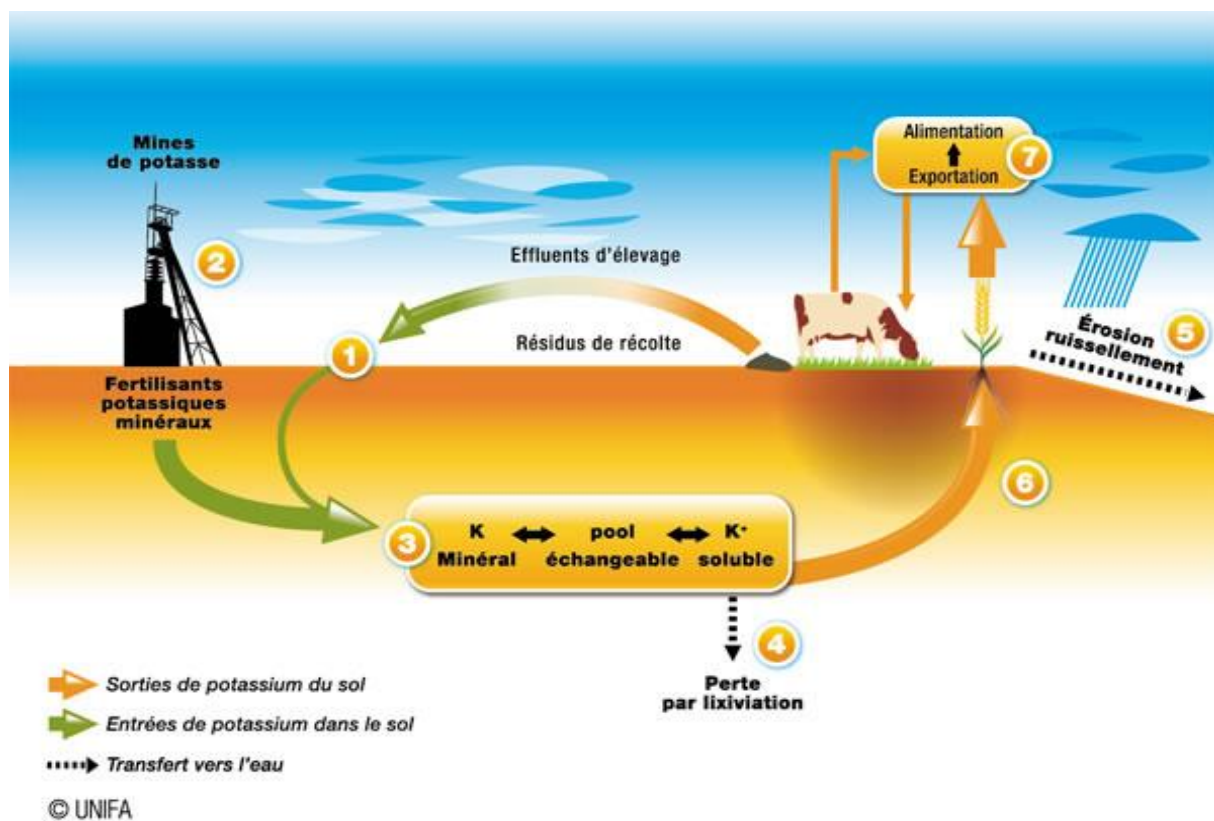


Figure 9 : Cycle du potassium dans le sol (El Khodrani, 2018)

- 1) Le recyclage d'éléments nutritifs contenus dans les matières organiques de toute nature : effluents d'élevage, résidus de culture (pailles, fanes, verts, ...) et autres sous-produits organiques issus des activités humaines, constitue une ressource importante pour la fertilisation.
- 2) Le potassium est extrait des mines sous forme principalement de mélange de sels de sodium, de potassium et parfois de magnésium. Il subit une purification pour être transformé en engrais utilisable en agriculture.
- 3) Le potassium évolue dans le sol sous sa forme minérale de cation  $K^+$ . Il est peut être fixé aux argiles, adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC) et soluble dans l'eau du sol.

- 4) La lixiviation du potassium soluble présent dans l'eau du sol (entraînement en profondeur par l'excès d'eau du sol) est un phénomène plus important dans les sols sableux à faible CEC.
- 5) L'entraînement du potassium hors de la parcelle se fait aussi par ruissellement (terrains en pente) et érosion (potassium lié aux particules solides).
- 6) L'absorption racinaire des végétaux se fait exclusivement à partir du potassium  $K^+$  dissout dans la solution du sol.
- 7) La récolte est transformée en nourriture (humaine ou animale), ce qui est l'objectif fondamental de l'agriculture.

#### **d. Carence en potassium**

Puisque le potassium est mobile dans la plante, les symptômes de carence apparaissent généralement d'abord sur les feuilles plus anciennes, souvent sous forme de nécrose (brunissement) ou de chlorose (jaunissement) du pourtour des feuilles. Les causes les plus fréquentes de la carence en potassium sont la sous-fertilisation, les rotations comportant de nombreuses cultures de plantes entières, une croissance racinaire restreinte en raison du compactage du sol, les premières étapes du passage à des systèmes de travail réduit du sol dans des sols lourds, ou des conditions de sécheresse dans des sols sableux (**Hinsinger, 2006**).

#### **Le signe de carence en potassium sont :**

- ✓ Nécroses brunes à la pointe, sur les bords et entre les nervures des feuilles ;
- ✓ La distance entre les nœuds sur la tige devient moins grande,
- ✓ Le bord des feuilles s'enroule parfois vers le haut
- ✓ Plantes sensibles aux maladies ;
- ✓ Fruits peu sucrés ni savoureux ;
- ✓ Mauvaise conservation des légumes racines.

### **2.3.3.2. Éléments nutritifs secondaires**

#### **2.3.3.2.1. Soufre**

##### **a. Formes du soufre dans le sol**

Le soufre peut, comme l'azote, être combiné :

- ✓ Sous forme organique, lié à des atomes de carbones
- ✓ Sous forme minérale. Si le sol est dans des conditions normales d'aération, le soufre est sous la forme de sulfates ( $SO_4^{2-}$ ). C'est la forme assimilable par les végétaux. Ces sulfates se présentent sous différents états :

- ✓ Combinés à d'autres ions positifs, dans des formes peu solubles (combinaisons avec Fe, Al ou le baryum)
- ✓ à l'état d'ions libres en solutions
- ✓ sous un état faiblement adsorbés par des charges +

Par contre si le sol est en conditions réductrices, le soufre passe sous la forme de sulfures  $S^{2-}$ , qui peuvent poser des problèmes de toxicités pour les végétaux (**Pretchel et al., 2001**).

### **b. Quantités dans le sol**

Les sols contiennent en général entre 500 et 5000 unités de  $SO_3$  en soufre total, ce qui correspond à 200/2000 unités de S. La forme organique représente, comme pour l'azote, la grande majorité, classiquement entre 70 et 90%.

La plus grande partie du soufre du sol se trouve dans la matière organique. La transformation du soufre des formes organiques et inorganiques en sulfate assimilable par les plantes comporte quatre étapes principales :

- La minéralisation ;
- L'immobilisation ;
- L'oxydation ;
- La réduction.

Le soufre est un constituant de 2 des 21 acides aminés qui forment les protéines. De plus :

- Il facilite le développement des enzymes et des vitamines ;
- Il participe à la fixation de l'azote dans les légumineuses ;
- Il facilite la production des semences ;
- Il est nécessaire à la formation de la chlorophylle.

Les sols développés sur roche volcanique peuvent avoir des valeurs plus élevées, car les minéraux primaires sont dans ce cas riches en soufre (**NEGTAPE, 2001**).

### **2.3.3.2.2. Magnésium**

#### **a. Formes du magnésium dans le sol**

Le magnésium est présent dans le sol sous trois formes :

- ✓ À l'état d'ions libres, en solution :  $Mg^{2+}$
- ✓ À l'état d'ions  $Mg^{2+}$  adsorbés sur le complexe échangeable
- ✓ À l'état combiné, entrant dans la composition de minéraux primaires

Le magnésium prend contact avec la racine par les trois modes de transport : écoulement de masse, interception racinaire et diffusion. Comme le potassium, il se trouve dans la matière organique sous forme ionique et donc libéré lors de la minéralisation sans être lui-même minéralisé (**Gerendás et Führs, 2013**). Les quantités de magnésium varient fortement selon les sols : il peut y avoir entre 1 tonne de MgO total jusqu'à 100 tonnes pour les sols les plus riches, comme par exemple les sols sur roches volcaniques, ou sur roche dolomitique (roche sédimentaire riche en Mg). Mais la majeure partie (plus de 90%) de ces réserves en magnésium n'est pas échangeable et on trouve des valeurs de MgO échangeables souvent comparables à celles de K<sub>2</sub>O, entre 300 et 800 unités de MgO. Cependant, la concentration en ions dans la solution est généralement 3 à 5 fois plus forte qu'en K<sub>2</sub>O et les réserves en MgO non échangeables semblent encore plus mobilisables par la plante que les réserves de potassium.

Le magnésium joue plusieurs rôles dans la croissance et le développement des plantes (**Hermans et al., 2005**) :

- Structure des molécules de chlorophylle ;
- Synthèse des protéines ;
- Activation des enzymes (rôle indispensable).

#### **b. Quantités dans le sol**

Les quantités de magnésium varient fortement selon les sols : il peut y avoir entre 1 tonne de MgO total jusqu'à 100 tonnes pour les sols les plus riches, comme par exemple les sols sur roches volcaniques, ou sur roche dolomitique (roche sédimentaire riche en Mg). Mais la majeure partie (plus de 90%) de ces réserves en magnésium n'est pas échangeable et on trouve des valeurs de MgO échangeables souvent comparables à celles de K<sub>2</sub>O, entre 300 et 800 unités de MgO. Cependant, la concentration en ions dans la solution est généralement 3 à 5 fois plus forte qu'en K<sub>2</sub>O et les réserves en MgO non échangeables semblent encore plus mobilisable par la plante que les réserves de potassium.

#### **2.3.3.2.3. Calcium**

##### **a. Formes du calcium dans le sol**

Le calcium est présent dans le sol sous trois formes :

- ✓ À l'état d'ions libres, en solution : Ca<sup>2+</sup>
- ✓ À l'état d'ions Ca<sup>2+</sup> adsorbés sur le complexe, échangeables

- ✓ À l'état combiné, entrant dans la composition de minéraux primaires :  $\text{CaCO}_3$ , calcite des sols calcaires comme le potassium et le magnésium, il se trouve dans la matière organique sous forme ionique et donc libéré lors de la minéralisation sans être lui-même minéralisé (Fabien, 2016 ; Landmann, 2000).

#### **b. Quantités dans le sol**

Les quantités de calcium varient fortement selon les sols : il peut y avoir jusqu'à plusieurs centaines de tonnes de CaO total pour les sols les plus riches, en sols calcaires (Fabien, 2016).

L'assimilabilité du calcium par les plantes est fonction de :

- ✓ La réserve totale de calcium ;
- ✓ Le pH du sol, les sols à pH faible étant plus sujets aux carences en calcium ;
- ✓ La CEC, car la capacité du sol à retenir les cations détermine la quantité de calcium qui pourra être libérée et rendue assimilable par les plantes ;
- ✓ Le type de sol, le calcium étant perdu par lessivage dans les sols sableux.

Le calcium a un rôle extrêmement important dans la constitution des tissus végétaux et permet aux plantes de mieux se développer. Il permet d'augmenter la résistance des tissus végétaux, une meilleure tenue de la tige et un développement normal du système racinaire.

#### **2.3.3.3. Oligoéléments ou éléments mineurs**

Les rôles physiologiques des oligoéléments sont assez connus. Ceux qui présentent des valences multiples jouent des rôles importants dans les systèmes enzymatiques mettant en jeu des réactions d'oxydoréduction (réduction des nitrates, photosynthèse, fixation d'azote) (Tableau 7). Nous citons quelques exemples d'oligoéléments :

##### **a. Fer**

Il est absorbé par les racines sous forme d'ion ferreux  $\text{Fe}^{2+}$ . Bien qu'abondant dans le sol, l'absorption du fer par les racines est complexe car dans des conditions oxydantes ou de pH alcalin, le cation  $\text{Fe}^{2+}$  disparaît transformé en oxyde ferrique inassimilable. Les fonctions du fer, composant essentiel de nombreuses enzymes, concernent la respiration, la synthèse de la chlorophylle et la protéosynthèse (Pugh et al., 2002). Un rôle particulier du fer est associé à la fixation d'azote de l'air par la symbiose entre légumineuses et Rhizobium. Le fer participe aux processus d'oxydoréduction en passant de  $\text{Fe}^{2+}$  à  $\text{Fe}^{3+}$  avec libération d'un électron. On le trouve dans la ferrédoxine et d'autres enzymes comme les cytochromes et les peroxydases. La carence est commune dans les cultures maraichères sur sols à  $\text{pH} > 7.0$

### **b. Manganèse**

Le manganèse du sol se présente sous plusieurs formes : inclus dans un minéral, complexé par la matière organique, échangeable et en solution, le manganèse soluble pouvant être, soit sous forme ionique ( $Mn^{2+}$ ), soit combiné avec des molécules organiques solubles. L'équilibre entre ces formes est dominé par les réactions d'oxydation à la surface des particules minérales du sol et les réactions d'adsorption sur les minéraux argileux ou la matière organique.

Le pH et les conditions oxydo-réductrices du sol sont les 2 facteurs principaux régulant cet équilibre. En conséquence, l'assimilabilité du manganèse est fortement améliorée par la baisse du pH, l'ion  $Mn^{2+}$  prélevé par les végétaux étant fortement dominant aux pH acides.

La richesse du sol en matière organique diminue la biodisponibilité de cet élément. D'autre part, une forte hydromorphie du sol, qui entraîne des conditions réductrices drastiques, est susceptible d'augmenter fortement le taux de manganèse assimilable, provoquant des risques de toxicité pour le végétal (Comeau et al., 2006). La carence en Mn existe généralement dans des sols basiques ( $pH > 7.0$ ).

### **c. Cuivre**

Le cuivre, comme tout élément du sol, peut se trouver dans l'un des 4 compartiments suivants : minéraux primaires ou secondaires, composés organiques, formes échangeables sur les colloïdes du sol et solutions du sol (Dhaou-El-Djabine, 2005). La forme  $Cu^{2+}$  est dominante dans les sols, en effet  $Cu^+$  est instable aux températures ordinaires et aux concentrations supérieures à  $10^{-7} \text{ mol.l}^{-1}$  (Larmet, 2007).

La majeure partie du cuivre est généralement incluse dans les mailles cristallines des minéraux primaires ou secondaires (Baize, 2011). Le reste du cuivre, potentiellement disponible pour les plantes, est fortement adsorbé sur les surfaces d'échange du sol ou complexé avec la matière organique. La carence en Cu est fréquente dans les sols organiques.

### **d. Zinc**

La plante absorbe le zinc sous forme du cation  $Zn^{2+}$ . Le zinc est ensuite fortement adsorbé sur les argiles et la matière organique. Dans ces conditions, la solubilité du zinc est nettement abaissée avec l'élévation du pH. Le zinc co-précipitait avec les hydroxydes de fer et d'aluminium. Les minéraux argileux, les hydroxydes et le pH sont les facteurs principaux intervenant dans la solubilité du zinc. La complexation avec la matière organique et la cristallisation en hydroxydes, carbonates ou sulfides présente une importance moindre (Calderini et Ortiz-Monasterio, 2003).

Le zinc protège aussi la plante des stress oxydants en conditions de forte lumière et de sécheresse. La carence en Zn existe dans les sols sableux, sols neutres, basiques ou calcaires, sols très riches en phosphore (**Tang et al., 2010**).

#### **e. Bore**

L'absorption racinaire prend principalement la forme borate  $\text{BO}_3^{3-}$  associée à l'acide borique  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Le bore passe facilement en solution sous forme d'anions ( $\text{BO}_2^-$ ,  $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ).

Il est abondamment absorbé par les argiles et les substances organiques. La forme la plus courante dans la solution du sol est l'acide borique ou l'ion borate  $\text{B}(\text{OH})_4^-$ . L'absorption du bore par les hydroxydes de fer et d'aluminium est un mécanisme important qui commande en grande partie la solubilité de cet élément dans le sol (**Parent et Rivest, 2003**). La rétention du bore par la matière organique est prépondérante en milieu acide où les colloïdes humiques formeraient la réserve principale en bore, les micro-organismes interviennent en le libérant progressivement (**Yremiyahu et al., 2001**).

#### **f. Molybdène**

La plante prélève l'anion molybdate  $\text{MoO}_4^{2-}$  dans le sol. Les besoins sont faibles de quelques grammes à des dizaines de grammes mais les fonctions du molybdène sont très spécifiques (**Kaiser et al., 2005**). L'absorption du molybdène contrairement aux autres oligo-éléments, est favorisée en sols alcalins mais elle est limitée par la présence de sulfate  $\text{SO}_4^-$ , anion de taille équivalente qui entre en compétition pour l'absorption racinaire. Le molybdène active l'enzyme nitrate réductase qui assure la réduction du nitrate dans les feuilles. Il est fortement adsorbé par les argiles et les oxydes d'aluminium et de fer (**Lyons et al., 2003**). Enfin chez les bactéries du genre *Rhizobium*, il active la nitrogénase, une autre enzyme qui permet la fixation de l'azote de l'air  $\text{N}_2$  en ammonium  $\text{NH}_4^+$ . Ces bactéries vivent en symbiose dans des nodules sur les racines des légumineuses, cultures sensibles à la carence.

**Tableau 7** : Les principales fonctions physiologiques des oligoéléments (**Price et al, 1972**)

	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>B</b>	<b>Mo</b>
Croissance						
Fixation de l'azote						
Réduction des nitrites						
Réduction des nitrates						
Respiration						
Activation d'enzymes						

#### **2.3.3.4. pH**

Le pH du sol ou potentiel d'hydrogène du sol exprime la concentration des ions H<sup>+</sup> et représente le niveau d'acidité ou d'alcalinité d'un sol donné, c'est-à-dire les protons libres ou adsorbés dans le sol. Le pH est une notion synthétique qui dépend de nombreuses propriétés du sol et qui doit être considéré comme un simple indice de fertilité qui donne une idée sur la disponibilité des éléments nutritifs, sur l'état physique du sol et sur son activité biologique (**Rajmohan et al., 2004**). D'autre part, le pH influence directement la vie microbienne du sol, l'assimilabilité des éléments majeurs et des oligo-éléments. En effet, le pH du sol influence directement sur l'activité des bactéries ammonifiantes et nitrifiantes donc, sur la fourniture de l'azote à partir des éléments organiques. Un pH trop bas, inférieur (4,5 - 5) contribue à ralentir considérablement la minéralisation de la matière organique et diminue les quantités d'azote disponible. Par contre les valeurs de pH élevé (6,5 - 8) accélèrent la minéralisation et la libération de l'azote. Ceci implique que les faibles quantités de matière organique seraient en mesure de fournir des quantités importantes de cet élément (**FIFI, 2010**).

#### **Pourquoi mesurer le pH du sol ?**

La valeur du pH détermine les comportements physiques (stabilité de la structure, résistance à la battance), chimiques (fonctionnement de la CEC, assimilabilité du phosphore, biodisponibilité des oligoéléments et microéléments) et biologiques (humification et minéralisation des matières organiques) du sol. Le meilleur compromis est obtenu, suivant les cultures, pour des sols neutres, peu acides ou peu basiques. Le pH permet également d'estimer la quantité d'ions H<sup>+</sup> présents dans le sol et le taux de saturation de la CEC.

### 2.3.3.5. Matière organique

Les matières organiques du sol (MOS) consistent en un mélange de résidus végétaux et animaux à différents stades de décomposition, de corps microbiens et animaux vivants dans le sol, et de substances fabriquées par les organismes vivants et/ou provenant de la décomposition chimique de molécules plus importantes (**Brun et al., 2015**).

La teneur en matière organique est un paramètre important de mesure de la qualité du sol, elle a une influence significative sur le maintien des propriétés physiques, chimiques et biologiques. En effet, une diminution de la teneur en matière organique et la quantité de carbone produite par la biomasse (activité et diversités des organismes) contribuent à la dégradation biologique.

D'après **Mathieu & Pieltain, 2003**, la matière organique est une source importante d'éléments nutritifs de la plante et la connaissance de sa teneur totale dans le sol renseigne sur sa potentialité fertilisante, elle a également un rôle important dans la fabrication des agrégats, autrement dit sur l'élaboration de la structure du sol. Elle est peu à peu transformée et cela donne naissance, d'une part à des éléments solubles ou gazeux comme l'ammoniac  $\text{NH}_3$ , l'acide nitreux  $\text{HNO}_3$  et le gaz carbonique  $\text{CO}_2$ , et d'autre part à des complexes humiques qui se décomposeront, se minéraliseront très lentement et progressivement.

Pour les propriétés chimiques, la matière organique intervient dans la capacité d'échange cationique du sol et constitue une source d'éléments nutritifs pour les plantes (**Larmet, 2007**) en effet plus un sol est riche en complexe argilo-humique plus la capacité d'échange cationique est importante.

En ce qui concerne les propriétés physiques, les matières organiques peuvent améliorer la capacité de rétention en eau des sols, limiter la compaction, et contribuer à la structuration et à l'amélioration de la stabilité structurale des sols (**Luo et al., 2009**).

Cependant, ce paramètre n'est pas toujours un indicateur de richesse du sol, ainsi dans les sols très acides ou engorgés, le manque de l'oxygène empêche les microorganismes à décomposer la matière organique, ce qui rend les nutriments non biodisponibles pour les plantes.

#### **Pourquoi mesurer la matière organique du sol ?**

La matière organique joue un rôle important dans les fonctionnements physique, chimique et biologique du sol. Elle améliore la cohérence des éléments structuraux, favorise la rétention en eau utile, participe au stockage réversible des éléments nutritionnels, limite le développement de

certaines parasites, augmente l'aération du sol, ... Un sol bien pourvu en matière organique offrira un milieu bien plus favorable au développement des cultures et moins sensible aux aléas climatiques.

#### **2.4. Interactions entre les fertilités physique, chimique et biologique du sol**

Un sol ne peut offrir les conditions favorables aux productions végétales que lorsque ses propriétés physiques, chimiques et biologiques sont optimales. En effet, en fonction de sa structure et de sa texture, le sol peut être plus ou moins riche. La porosité structurale et texturale joue un rôle important dans la circulation de l'air, de l'eau et de la vie biologique dans le sol. Un sol à structure fragmentaire facilite l'infiltration de l'eau, la pénétration des racines et favorise la vie microbienne. La dynamique des éléments minéraux du sol et celle de l'azote en particulier, les pertes de calcium/magnésium par lessivage dépendent des conditions hydriques, du taux de la matière organique et de l'enracinement des végétaux. Selon **Delville (1996)**, la matière organique et l'enracinement constituent les clés du maintien des caractéristiques physico-chimiques des sols. Par la minéralisation de la matière organique, les organismes vivants du sol créent les conditions favorables au développement des végétaux. La macro-faune augmente la porosité du sol par le creusage des galeries. L'azote fixé par les bactéries symbiotiques des légumineuses peut contribuer entre 20 et 70% dans la constitution d'un plant (**Delville, 1996**). Les microorganismes du sol utilisent l'azote pour se nourrir et se développer. En cas d'apport de matière organique à C/N élevé, ils prélèvent dans la réserve du sol la quantité de l'azote nécessaire à leur fonctionnement en diminuant ainsi la disponibilité de cet élément dans le sol. Ces exemples d'interaction de la fertilité physique, chimique et biologique du sol montrent que le sol est un système complexe d'où la nécessité d'aborder son étude par une approche globale.

#### **2.5. Mécanismes de dégradation de la fertilité chimique des sols**

##### **2.5.1. Carences**

Une carence est un manque ou une insuffisance d'un ou de plusieurs éléments ou oligoéléments nécessaires au développement des végétaux. Elle peut être primaire (due à une très faible teneur du sol en élément trace concerné) induite ou conditionnée (développée en raison de conditions engendrant dans le sol l'indisponibilité plus ou moins sévère de l'élément). Les carences ont un effet dépressif sur les rendements des cultures et leurs symptômes changent selon les espèces cultivées. L'azote constitue le premier facteur limitant, car son insuffisance exerce l'action dépressive la plus marquée sur le rendement. Le pH d'un sol apparaît comme l'un des paramètres

les plus importants de la disponibilité des oligo-éléments pour les plantes. En effet, un pH élevé du sol révèle fréquemment la carence relative du fer, du zinc, du manganèse et du bore (**Mclanghlin et al., 2000**).

### **2.5.2. Toxicité chimique et salinisation des sols**

Lorsque les bases échangeables du complexe absorbant sont remplacées par les éléments minéraux tels que  $H^+$ ,  $Al^{3+}$  ou  $Mn^{2+}$ , l'acidification et l'apparition de toxicités qui en résultent sont des manifestations courantes de la dégradation du potentiel de production d'un sol (**Pieri, 1986**). Dans certains cas, cette dégradation peut revêtir la forme d'une salinisation des sols, caractérisée par un dépôt de sels sur les couches superficielles des sols, les rendant ainsi impropres à l'agriculture.

La toxicité aluminique ne se manifeste qu'à partir d'un pH voisin de 5,5. En deçà de ce seuil, la toxicité aluminique devient nette lorsqu'il sature à plus de 30% la capacité d'échange cationique du sol (**Fifi, 2010**).

### **2.5.3. Pollution**

La pollution du sol correspond à l'accumulation de composés toxiques : produits chimiques, sels, matières radioactives ou agents pathogènes qui, tous, ont des effets nocifs sur la croissance des plantes, la santé humaine et animales. Les apports et les épandages excessifs de matières organiques, fumier, lisier peuvent contribuer à la pollution par excès de nitrates que les eaux de pluie peuvent entraîner vers les nappes phréatiques et les cours d'eau. De même, l'emploi excessif de pesticides organochlorés pose de graves problèmes dans la mesure où ils se dégradent lentement et s'accumulent progressivement dans la chaîne alimentaire. L'eutrophisation est une forme singulière mais naturelle de pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent. Les principaux nutriments à l'origine de ce phénomène sont le phosphore (des phosphates) et l'azote (dans l'ammonium, les nitrates et les nitrites) (**Lemière et al., 2001**).

## **Conclusion**

La qualité des sols joue un rôle crucial dans la conservation du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes. Sa définition et la détermination de ses paramètres peut aussi servir de base aux stratégies d'évaluation du risque environnemental lié à certaines pratiques humaines, notamment agricoles. La compréhension du fonctionnement des sols et la définition de pratiques appropriées de leur gestion nécessitent des connaissances approfondies des processus fonctionnels opérant dans l'ensemble de l'écosystème, c'est-à-dire non seulement dans le sol mais également à la surface de celui-ci. Par conséquent, l'intégration des processus physiques, chimiques et biologiques, et de leurs interactions, dans un modèle général du fonctionnement des écosystèmes terrestres, apparaît absolument indispensable pour définir correctement la qualité des sols.

Les eaux souterraines constituent une ressource importante pour la collectivité et les écosystèmes, car elles revêtent un caractère stratégique et jouent un rôle primordial dans le développement socioéconomique. La préservation de leur qualité exige la compréhension des processus qui régissent les interactions entre la pression agricole et le milieu naturel. C'est dans cette perspective que s'inscrit de travail de thèse, qui vise l'évaluation de la qualité des eaux et des sols de la région Sidi Yahya Gharb en relation avec l'activité agricole.

**PARTIE II :**  
**MATERIELS ET METHODES**

## **Introduction**

Les périmètres irrigués au Maroc ont fait l'objet d'efforts considérables en matière d'aménagements hydro-agricoles. Ces périmètres irrigués sont aujourd'hui en train de connaître des phénomènes de salinisation, de sodification et de compaction des sols et de pollution des eaux par les nitrates.

Ainsi, les études de l'impact de l'irrigation sur la qualité des sols et des eaux sont devenues impératives afin de mener des actions pour leur conservation et leur préservation.

Pour veiller sur la durabilité des systèmes de production de ces périmètres irrigués, quelques projets et études sur l'impact de l'intensification agricole sur la qualité des sols et des eaux ont été mis en œuvre.

C'est dans cette perspective et en vue de disposer d'outils de pilotage et d'évaluation de la qualité des sols agricoles et des eaux souterraines, que s'inscrit notre étude qui a pour but la mise en place d'un système « d'observation » optimisé pour le suivi et le contrôle de l'impact de l'irrigation sur la qualité et la durabilité des ressources en sols et en eaux dans le périmètre Sidi Yahya Gharb.

Dans cette partie, nous présentons une description de la région de Gharb ainsi que le périmètre étudié (Sidi Yahia Gharb) ; puis, dans un deuxième temps, nous présenterons la démarche méthodologique adoptée et les enquêtes menées sur le terrain. Ensuite, nous nous intéresserons à détailler les protocoles expérimentaux utilisés dans les analyses des échantillons collectés.

**CHAPITRE I :**  
**PRESENTATION DE LA ZONE ET DU**  
**PERIMETRE ETUDIES**

# 1. Présentation générale de la région du Gharb

## 1.1. Situation géographique générale

La plaine du Gharb est située au Nord-Ouest du Maroc. Elle occupe une situation stratégique sur le plan intérieur et extérieur, par sa proximité des grands centres de consommation et de l'Europe. Elle est délimitée par : Kénitra au sud, Moulay Bouselham au nord, Sidi Kacem à l'Est et l'océan atlantique à l'Ouest. A l'intérieur du Gharb on trouve Sidi Slimane, Machaa Belksiri et Souk Larba du Gharb. Il couvre une superficie de 893 860 ha (1,2 % du territoire national), dont 68 % (616 000 ha) de surface agricole utile (7 % de la SAU nationale). Le périmètre du Gharb bénéficie des apports d'oued Sebou et de ses affluents (Ouergha et Beht) avec un volume de 5 milliards m<sup>3</sup>, soit environ 27 % du potentiel national en ressources d'eau superficielles (Omrania, 2022).

Les ressources en eaux souterraines constituent une réserve de 960 millions m<sup>3</sup>. Ces réserves sont renforcées par les ouvrages suivants : barrage El Ouahda, barrage Idriss 1er, barrage Allal El Fassi, barrage Oued El Makhazine et barrage El Kansera (Figure 10).



Figure 10 : Schéma de l'aménagement hydraulique du bassin du Sebou (ABHS, 2019).

## 1.2. Climatologie

Le climat de la plaine du Gharb est de type méditerranéen avec une influence océanique. La pluviométrie annuelle est relativement élevée. Elle est très variable d'une année à l'autre et se concentre, pour 90 % entre les mois d'octobre et d'avril. Elle est aussi variable d'une zone à l'autre. La pluviométrie annuelle moyenne de la zone côtière avoisine 525 mm, alors que celle de la zone interne (Sidi Slimane) dépasse 600 mm (Figure 11). Elle augmente également en allant vers le nord. Elle est de 470 mm à Dar Gueddari au sud et de 577 mm à Souk Larbaa au nord. L'influence océanique sur les températures est bien marquée par le parallélisme des lignes isothermes à la côte atlantique. Les températures moyennes oscillent entre 11°C l'hiver et 27°C l'été. L'évapotranspiration annuelle avoisine 1200mm. Elle excède ou compense la pluie entre novembre et mai.

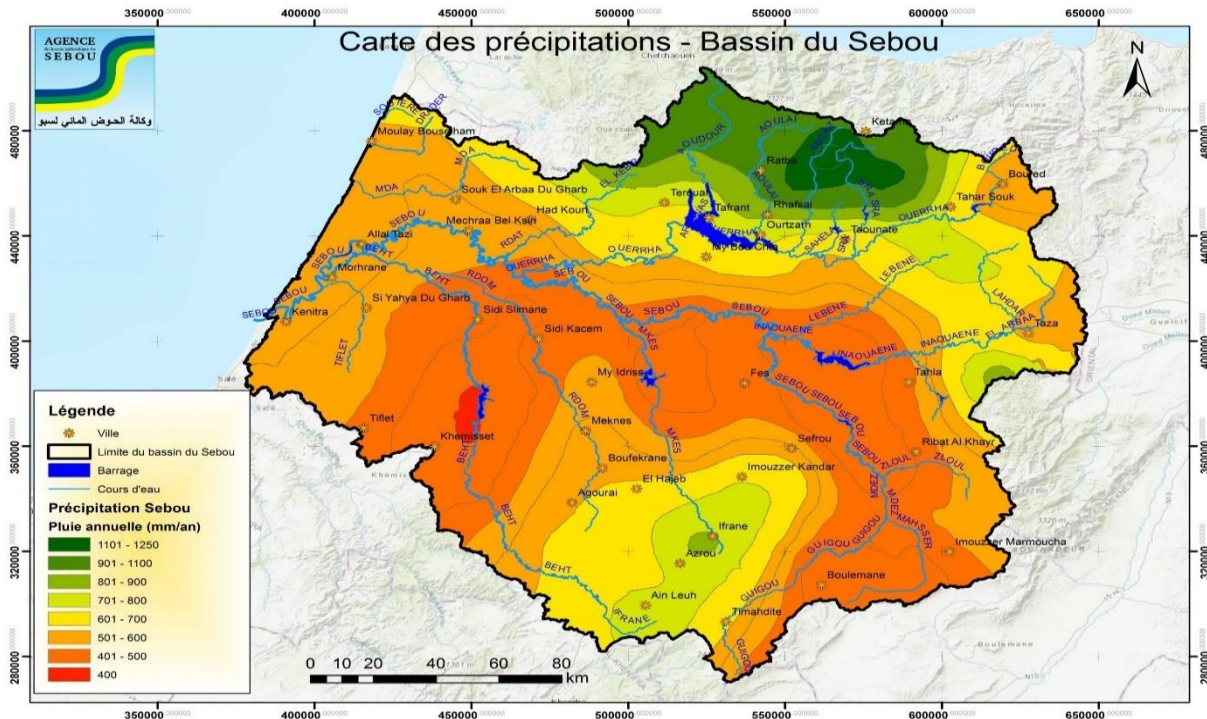


Figure 11 : Précipitation annuelle moyenne de la plaine du Gharb (ABHS, 2019).

## 1.3. Types de sol

Les sols du Gharb, essentiellement argileux, se sont formés sous des conditions d'hydromorphie et d'engorgement. Ils sont constitués essentiellement d'alluvions à teneur en argile allant de 15 à plus de 55% (Figure 12). Les principaux types de sols sont les vertisols ou Tirs (34%), Dehs qui sont des sols argileux peu développés (22%), les sols hydromorphes (15%) et les sols sablonneux (12,5%) (Taky et al., 1999).

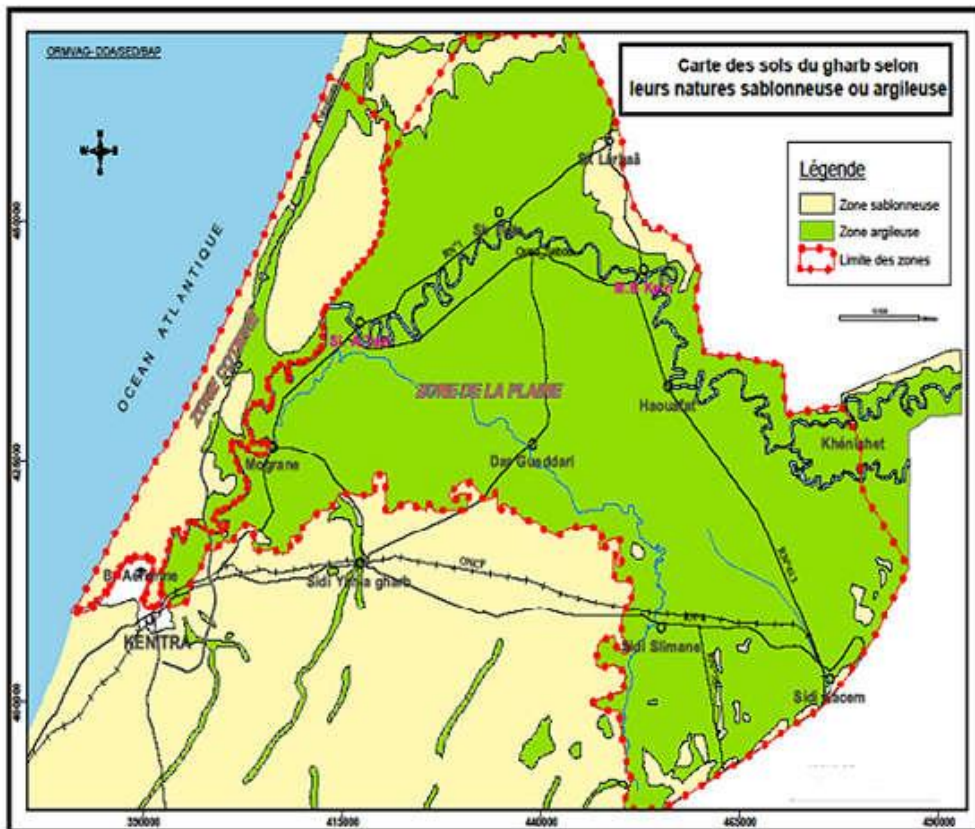
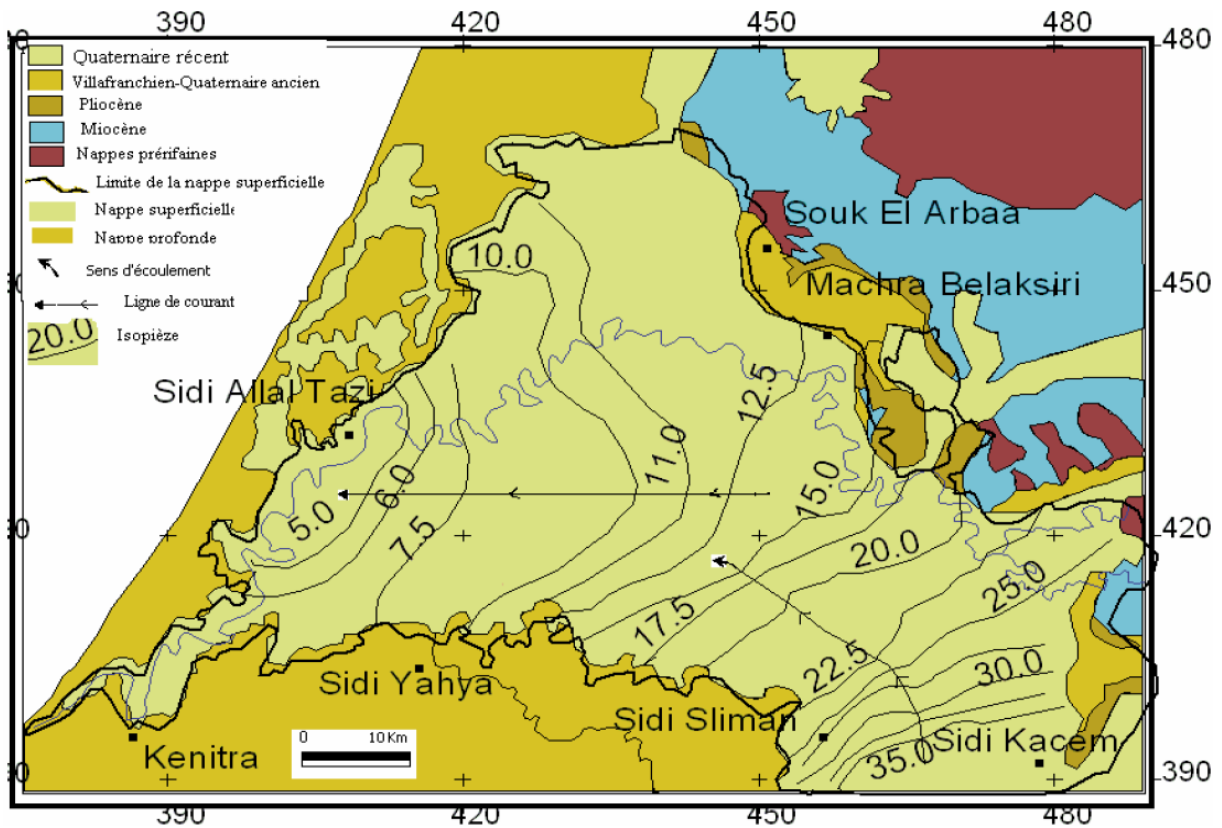


Figure 12 : Répartition des sols dans la région du Gharb (Zeraouli et Mrini, 2004).

#### 1.4. Hydrogéologie

Le Gharb présente deux types de nappes aquifères : une nappe profonde (à plus de 100 m) couvrant une superficie de 3500 km<sup>2</sup> (Figure 13), avec une épaisseur de 50 à 150 m, et une salinité n'excédant pas 1,5 g/l ; une nappe phréatique, dont le substratum appartient aux argiles soltaniennes ou gharbiennes oscillant entre 8 et 15 m de profondeur dans plus de 75% de la plaine (Pallix et Tabet, 1973). Elle est alimentée par drainage vertical de la nappe profonde et par infiltration des eaux de pluie et d'irrigation (représentant une part de 90 à 95% des apports). L'évaporation et la faible circulation des eaux de la nappe phréatique renforcent sa salinisation (supérieure à 10 g/l) (Debbarh et al., 1999).



**Figure 13** : Carte piézométrique de la nappe superficielle du Gharb (Amharref et al., 2007).

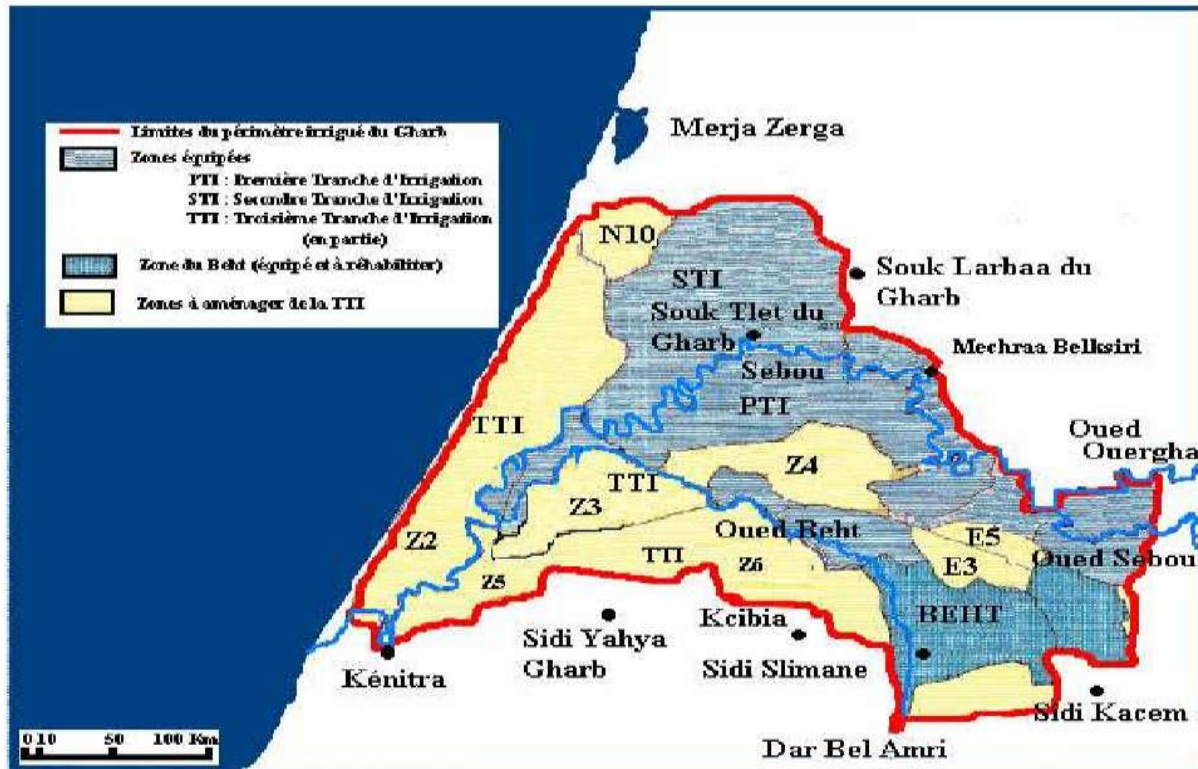
#### 1.4.1. Eaux de Surface

Sur le plan hydrologique, le principal cours d'eau du périmètre du Gharb est le Sebou avec ses principaux affluents l'Ouergha sur la rive droite et le Beht sur la rive gauche. Les moyennes annuelles des apports du bassin du Sebou sont d'environ 5000 Mm<sup>3</sup>/an (Série 1936-1996) et ne sont que de 3800 Mm<sup>3</sup>/an pour la série sèche de 1970-1996, soit une réduction d'environ 24% (Bricha et al., 2007).

#### 1.4.2. Aménagement hydro agricole

##### 1.4.2.1. Réseaux d'irrigation

L'eau d'irrigation du périmètre du Gharb provient de 3 barrages : le barrage El Kansera (270 Mm<sup>3</sup>) sur l'oued Beht, le complexe Idriss Ier Allal Fassi (1,23 Mm<sup>3</sup>) sur oued Inaouene et le barrage El Wahda (3,8 MM de m<sup>3</sup>) sur l'oued Ouergha. La superficie équipée en grande hydraulique couvre 120 000 ha dont 29 000 ha pour le périmètre du Beht, 36000 ha constituant la première tranche d'irrigation (PTI), 54 000 ha à la seconde tranche d'irrigation (STI) et le reliquat correspond à la troisième tranche d'irrigation (TTI) dont l'aménagement (Figure 14).



**Figure 14** : Carte de différentes tranches d'aménagement du périmètre du Gharb (ORMVAG, 2008).

Les systèmes d'irrigation adoptés au Gharb actuellement sont le gravitaire sur 97 000 ha dont 13 500 ha par submersion pour la riziculture, l'aspersion 20000 ha et 3000 ha en basse pression. L'infrastructure mise en place pour l'irrigation est complexe et diversifiée. Elle est constituée principalement de 56 stations dont 54 de pompage et 2 d'exhaure, et de 7 stations de mise en pression, constitués de 270 groupes motopompes (ORMVAG, 2008). La superficie équipée est divisée en secteurs indépendants qui font environ 3000ha chacun. La taille des secteurs a été dictée par des considérations d'optimisation de consommation énergétique. Chaque secteur est considéré comme une entité hydraulique et est caractérisé par une ossature alimentée par une station de pompage sur l'oued Sebou ou l'oued Beht, mis à part ceux relevant du périmètre Beht, alimentés gravitairement à partir du canal principal. Chaque secteur est composé outre d'une station de mobilisation des eaux, de canaux secondaires et tertiaires pour acheminer les eaux d'irrigation pour le cas du gravitaire ou de conduites pour amener les eaux aux bornes d'irrigation. Chaque secteur est divisé en blocs réguliers constituant la trame d'aménagement. Le bloc est lui aussi subdivisé en plusieurs soles (unité agronomique) dans lesquels les agriculteurs ont été répartis lors du remembrement, opération préalable à l'aménagement hydro agricole.

### 1.4.2.2. Réseaux de drainage et d'assainissement

Le système de drainage dans le Gharb est constitué de : (i) un réseau de fossés à ciel ouvert, assurant l'assainissement superficiel et les eaux recueillies des collecteurs, (ii) un drainage de surface par profilage qui permet d'assainir les eaux de pluies avant percolation et (iii) un drainage souterrain par canalisations enterrées. La superficie drainée par tuyaux couvre plus de 100 000 ha (**Hammani, 2002**). Le réseau d'assainissement de la plaine du Gharb est de type ramifié de l'aval vers l'amont. On y trouve les colatures quaternaires d'assainissement longeant les longueurs des sols. Elles recueillent les eaux excédentaires à la parcelle (excédents d'irrigation et de pluie). Les colatures quaternaires rejettent leurs eaux dans les fossés tertiaires qui les rejettent à leur tour dans les fossés secondaires qui servent d'exutoire aussi pour les collecteurs de drainage. Les exutoires principaux sont les oueds et les canaux de grande dimension. Les dimensions des différents fossés sont variables, en fonction de leur catégorie et de leur position sur le réseau. Pour les fossés artificiels, le fruit de berge adopté est de 1,5, la largeur au plafond varie de 0,5 à 3m, avec une profondeur pour les secondaires et primaires variant de 2 à 4 mètres.

### 1.5. Production agricole

La participation de la région du Gharb dans la production agricole nationale est présentée dans le Tableau 8 (**DRA, 2020**).

**Tableau 8** : Participation du Gharb dans la production nationale agricole (**DRA, 2020**).

Filières	2016-2017	
	Superficie (ha)	Production (T)
<b>Agrumes</b>	25185	456 017
<b>Maraichage de saison</b>	42120	1 244 758
<b>Maraichages primeurs</b>	4 060	146 126
<b>Maraichages Agroindustriels</b>	820	65 800
<b>Olivier</b>	66 135	93 226
<b>Céréales</b>	544755	1419794
<b>Riz</b>	6 413	48 098
<b>Légumineuses</b>	54 315	63 395
<b>avocatier, bananier et autres cultures tropicales</b>	6 842	187 839
<b>Lait</b>	307 000 têtes	554 220
<b>Viandes Rouges Bovines</b>	540 000 têtes	36 730

La production agricole de la région est dominée par le riz 48 098 t sur 6 413 h, les artichauts 54 000 t sur une superficie 3 000 h, les tomates 300 000 t sur 6 000 h, le tournesol 40 000 t sur 1 050 000 h, les fraises 32 000 t sur 840 ha et la canne à sucre 670 000 t sur 18 500 h, les céréales avec 544 755 t sur une superficie de 1 419 794 h. Cette production est moins importante pour le lait avec 554 220 litres (**DRA, 2020**).

La région compte un cheptel important dominé par les ovins qui présentent 1 060 400 têtes soit 5,51 % du cheptel national. Les caprins approchent les 79 000 têtes soit 0,40 % à l'échelle du pays. Alors que les bovins englobent 399 260 têtes soit 10 % au niveau national.

En aviculture, la région a enregistré en 2008 une production de 16 000 tonnes en viandes blanches. En même temps, la quantité de viandes rouges produite pour la même année a atteint 36 730 tonnes (**DRA, 2020**).

Le Gharb est considéré depuis longtemps comme la première région apicole du Maroc, en raison des conditions climatiques adéquates favorisant le développement d'un couvert végétal propice. Celle-ci offre une disponibilité en pollen et en nectar tout au long de l'année. La zone a de forte concentration d'abeilles puisqu'elle compte plus de 90 000 ruches en 2006. La production de miel assure 43 % de la production nationale avec un volume de 1 200 tonnes (**Omrania, 2022**).

## **1.6. Activité économique**

Le secteur agricole occupe la première place au sein des activités productives de la région. Il occupe 53,3% de la population active (6,3% en milieu urbain et 81,7% dans les campagnes) et participe dans la production nationale, à hauteur de 17% pour le lait, 28% pour les agrumes, 80% pour le tournesol, 8,5% en ce qui concerne les céréales et enfin à 100% pour le riz. Au cours de la campagne 1997/98, les superficies cultivables ont atteint 603.000 ha, dont 130.000 ha sont irrigués, représentant 21,5% des surfaces susceptibles d'être aménagées et qui totalisent 275.000 ha. Ainsi, au vu de l'importance de l'agriculture dans la région, les pouvoirs publics prévoient d'accélérer l'aménagement des terres bour (113000 ha) et irriguer 33.000 ha supplémentaires dans le cadre du programme national de l'irrigation. Ces actions seront soutenues par une activation de la recherche agronomique (**HCP, 2013**).

A côté des cultures, le cheptel bovin et ovin de la région durant l'année 1997, était de 261.500 et 1.010.000 têtes, représentant respectivement 10,3% et 6,6% des effectifs correspondants, au niveau national. On peut rappeler que ces proportions étaient en 1992 de 9,1% et 5,9%. Par ailleurs,

la région dispose de réserves hydriques importantes, évaluées à 6,57 milliards de m<sup>3</sup>. Ces réserves se sont renforcées par les ouvrages suivants : barrages EL Ouahda, Idriss 1er, Allal El Fassi, Oued El Makhazine et Kansera. Le volume des eaux consacrées à l'irrigation se chiffre à 3 milliards de m<sup>3</sup> (HCP, 2013).

## 2. Présentation du Périmètre de Sidi Yahya Gharb

### 2.1. Situation géographique

La zone d'étude appartient à la Province de Sidi Slimane (région du Rabat-Salé-Kénitra), localisée entre 34° 18' 33" nord, 6° 18' 41" ouest, limitée au Nord par la commune rurale de Mechra Bel Ksiri, Souk El Arbaa et Ouezzane, au Sud-Est par la Province de Meknès (Sidi Slimane), et à l'Ouest par la Province de Kénitra (Province de Sidi Slimane), la commune rurale de Sidi Yahia s'étend sur environ 616 ha (Figure 15) (Boulmane et al, 2017).



Figure 15 : Carte de situation de la zone d'étude.

### 2.2. Choix du périmètre de Sidi Yahya

La région de Sidi Yahya dans la plaine du Gharb (Maroc) est bien connue pour son agriculture intensive car elle dispose de sols fertiles et d'eau disponible, conduisant à l'utilisation abusive des produits agrochimiques et sur le fait que la population locale utilise les eaux souterraines sans traitement préalable, ce qui l'expose à des risques sanitaires potentiels. En effet,

l'augmentation de la production et/ou de la protection des cultures, engendre l'utilisation des produits phytosanitaires dont la présence dans l'environnement impose le contrôle et la surveillance des sols et des champs de culture sur lesquels, ils sont pulvérisés ainsi que les eaux (de surface ou souterraines) destinées à l'alimentation qui risquent d'être les sources d'intoxication des consommateurs de ces eaux contaminées. Les études traitant la problématique au Maroc, s'intéressent souvent aux milieux agricoles à grande échelle, mais il ya peu d'études qui s'intéressent à l'utilisation des produits phytosanitaires dans les villages ou des petites régions où les activités agricoles sont individuelles.

Dans ce sens, nous nous sommes intéressés à la région de Sidi Yahya. En effet, après avoir enquêté sur le terrain, auprès des vendeurs des produits phytosanitaires et des fertilisants, et vu que l'utilisation non contrôlée de ces produits dans la région, et l'utilisation des eaux souterraines pour l'alimentation en eau et pour l'irrigation sans traitement préalable, il nous a semblé important d'évaluer certains paramètres physiques et chimiques du sol et de l'eau. Ceci en vue de savoir comment ils ont été affectés par les activités agricoles intensives dans la région, dans le but de mettre en évidence les risques sanitaires et environnementaux liés à leurs présences, à travers l'élaboration des cartes des paramètres physico-chimiques et de fertilité des sols et des eaux de la zone de Sidi Yahya, aussi de mettre au point des formules moyennes d'engrais de la région, la contribution à la préservation de l'environnement. Enfin, l'orientation et le conseil des agriculteurs à l'échelle de l'exploitation des engrais du périmètre de Sidi Yahya El Gharb.

### **2.3. Contexte géologique**

Sur le plan géologique, la plaine du Gharb constitue la charnière entre deux ensembles structuraux qui diffèrent par la nature et l'âge des terrains d'une part et par le style tectonique et l'âge de la déformation d'autre part :

- ❖ Sur la marge septentrionale : le Rif qui est marqué par une grande instabilité jusqu'à l'actuel.
- ❖ Sur la marge méridionale : la Méséta avec un socle paléozoïque rigide et relativement stable plongeant régulièrement du Sud vers le Nord avec une pente de 3°.

Le bassin du Gharb a été individualisé au Miocène terminal suite à l'obstruction du sillon sud-rifain par la remontée isostatique au seuil de Taza et le glissement de la nappe pré-rifaine du Nord vers le corridor sud-rifain (Figure 16). En outre, l'instabilité de la marge pré-rifaine et le basculement dû à la surrection rifaine provoquent le déversement d'énormes quantités de matériaux

terrigenes, souvent fins et le glissement d'un enorme olistostrome. La moitie septentrionale du Gharb repose directement sur cet olistostrome alors que la moitie meridionale repose sur les formations de la Meseta occidentale formant le substratum autochtone du Rif.

Le comblement du bassin du Gharb, au Miocene terminal, est le resultat de la combinaison de plusieurs facteurs :

- L'accumulation d'énormes apports en provenance de deux zones émettrices, bien définies par la nature et la granulométrie des matériaux :
- La marge septentrionale pré-rifaine ne fournit que des éléments très fins, siltoreux, parmi lesquelles sont transportés des tests de micro-organismes arrachés aux formations crétacées et tertiaires de l'arrière-pays ainsi que des carapaces d'ostracodes.
- La marge mésétienne, libère des matériaux beaucoup plus grossiers, principalement vers le sommet de la série.
- L'arrivée de la nappe pré-rifaine.

En effet, c'est l'interaction entre la subsidence tectonique et les changements du niveau marin qui façonne la morphologie d'ensemble des sédiments néogènes.

Les changements eustatiques peuvent avoir joué un rôle important dans les parties les moins profondes du bassin. L'aspect le plus important de l'histoire tectonique du bassin du Gharb est l'initiation et la propagation des failles synsédimentaires initiées par un déséquilibre gravitaire. Ce dernier, résulte à la fois de la forme inclinée du substratum et des fractures qui permettent l'accommodation par le flux sédimentaire (Hmamouchi et al., 2013).

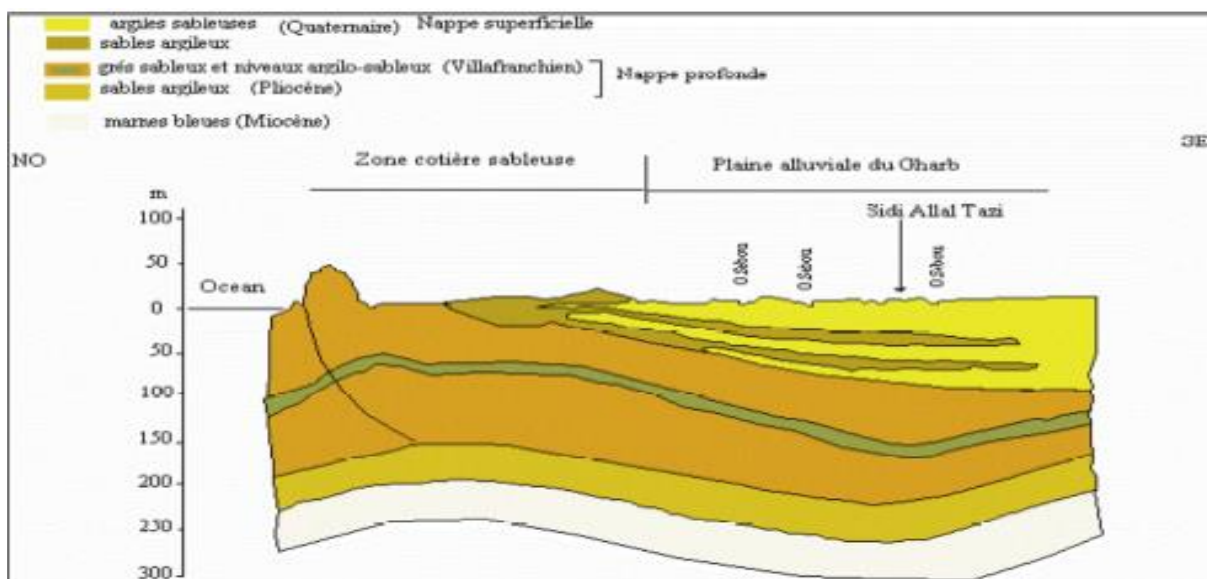


Figure 16 : Coupe géologique NO-SE de la plaine du Gharb (Bouya et al., 2011).

## 2.4. Contexte hydrologique

Dans la plaine du Gharb, plus particulièrement à Sidi Slimane, le cours d'Oued Beht qui a une superficie de l'ordre de 9 000 km<sup>2</sup> et un périmètre de 488 Km, rejoint le Sebou dans la plaine. Les apports moyens annuels de l'oued Beht sont de l'ordre de 410 Mm<sup>3</sup> (Figure 17). La variabilité importante des débits est la principale caractéristique du régime de tous les oueds du Maroc, et en l'occurrence celle de l'oued Beht où le débit varie de 0,1 à plus de 130 m<sup>3</sup>/s (Administration de l'hydraulique, 1991).

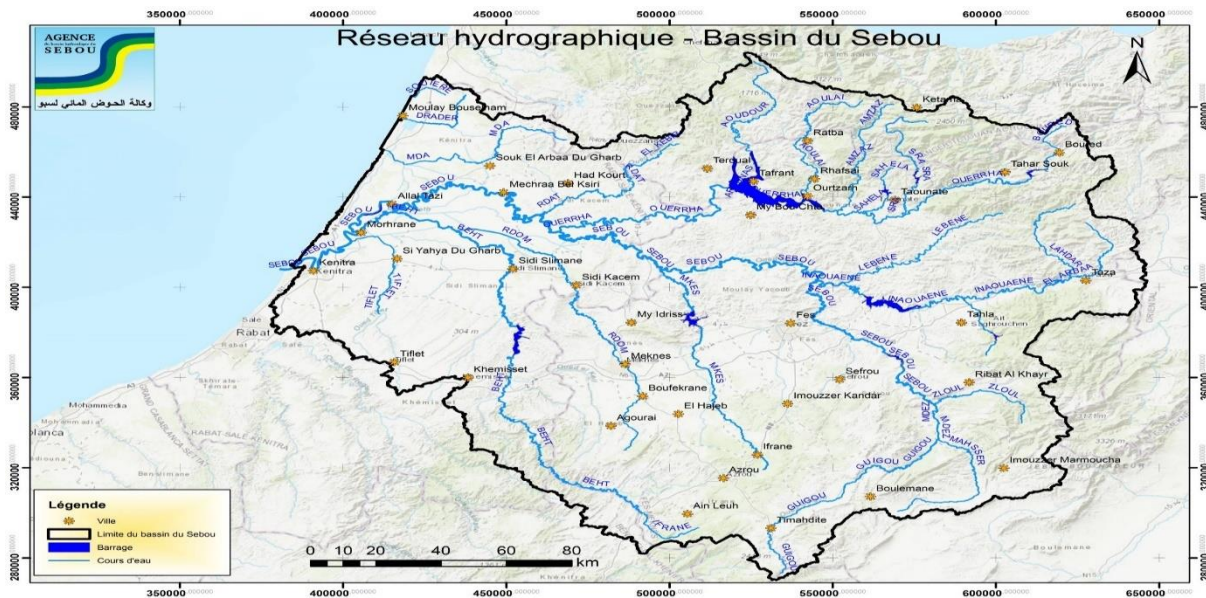


Figure 17 : Carte hydrographique de bassin du Sebou (ABHS, 2019).

## 2.5. Agriculture dans le périmètre

L'agriculture est la grande richesse naturelle de la zone, elle est favorisée par les conditions climatiques et les sols productifs. Les principales cultures agricoles sont les céréales, les légumes, les oranges, etc. A côté de l'agriculture, il y a aussi la production animale englobant toutes les espèces du Maroc (les bovins, les ovins, les volailles,...).

Dans leurs recherches pour l'amélioration de la production et la lutte contre les ravageurs des cultures, les agriculteurs ont recours à une utilisation massive des engrais et des pesticides, qui par conséquent deviennent une source de contamination des sols et des eaux souterraines par infiltration (Zeraouli et Mrini, 2004).

Le tableau 9 montre les quantités d'engrais utilisées pour les différentes cultures du Gharb. A ce problème, s'ajoute l'intrusion marine induite par la surexploitation des eaux souterraines à des fins agricoles, particulièrement dans la zone côtière Sidi yahya. Quant aux activités

industrielles- les sucreries, les huileries, les papeteries, la cellulose et les unités agro-alimentaires elles sont les plus polluantes.

**Tableau 9** : Culture, production et quantité d'engrais utilisée dans la région du Gharb (**Harbouze et al., 2019**).

<b>Culture</b>	<b>Aire de production (ha)</b>	<b>Production(T/ha)</b>	<b>Quantité de N-engrais (Kg/ha)</b>
<b>Céréales</b>	326 000	1,6	155
<b>Légumineuses</b>	41 800	0,4	28
<b>Canne à sucre &amp; betterave à sucre</b>	26 400	39,3	180
<b>Oléagineuses</b>	36 800	1,8	240
<b>Légumes</b>	27 096	36,1	80

## **2.6. Système d'irrigation**

D'après **MAPMDREF** (2019), l'agriculture irriguée marocaine couvre 1.600.000 ha, soit 18% de la superficie arable totale et 21% de la superficie cultivée par an. Les programmes d'irrigation couvrent 750.000 ha dont 90% destinés aux superficies inférieures à 10 ha. La superficie équipée en irrigation localisée s'élève à 560.000 ha et devrait atteindre 610.000 ha d'ici fin 2019, soit 38% de la superficie totale irriguée au niveau national. Le Maroc reçoit en moyenne annuelle environ 29 milliards de m<sup>3</sup> de pluies, le potentiel hydraulique mobilisable, dans les conditions techniques et économiques actuelles, est estimé à 20 milliards de m<sup>3</sup> dont 16 milliards à partir des eaux superficielles et 4 milliards en provenance des eaux souterraines.

L'agriculture irriguée participe pour presque 81 % au volume total de la production agricole, toutes cultures confondues. L'irrigation dans la région du Gharb constitue une voie privilégiée du développement agricole (Figure 18). La superficie irriguée s'élève dans la région à 177 800 ha, soit 30,85 % de la SAU et 11,33 % des terres irriguées au niveau national en 2015. L'irrigation gravitaire reste le système le plus adopté par les agriculteurs. Ce système intéresse 63,4 % de la plaine. L'irrigation localisée s'est surtout développée dans la zone côtière, elle occupe plus du 2/3 de la superficie totale du Gharb (**Taky, 2015**).

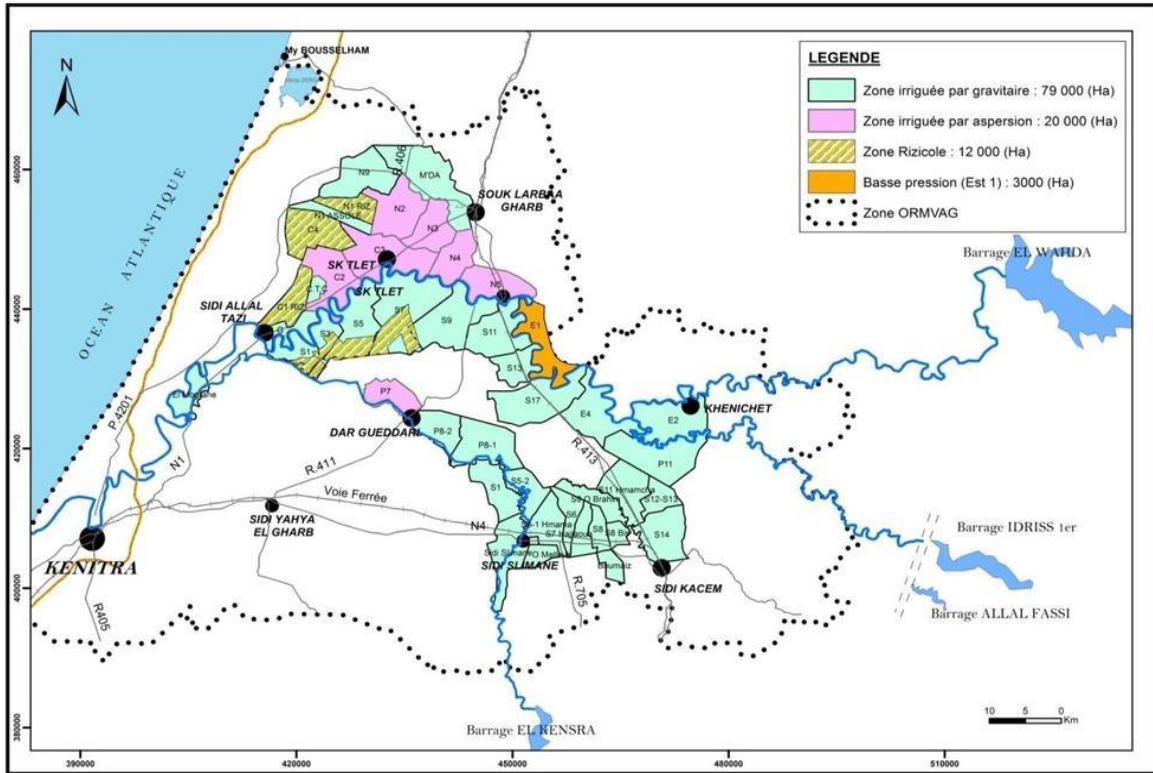


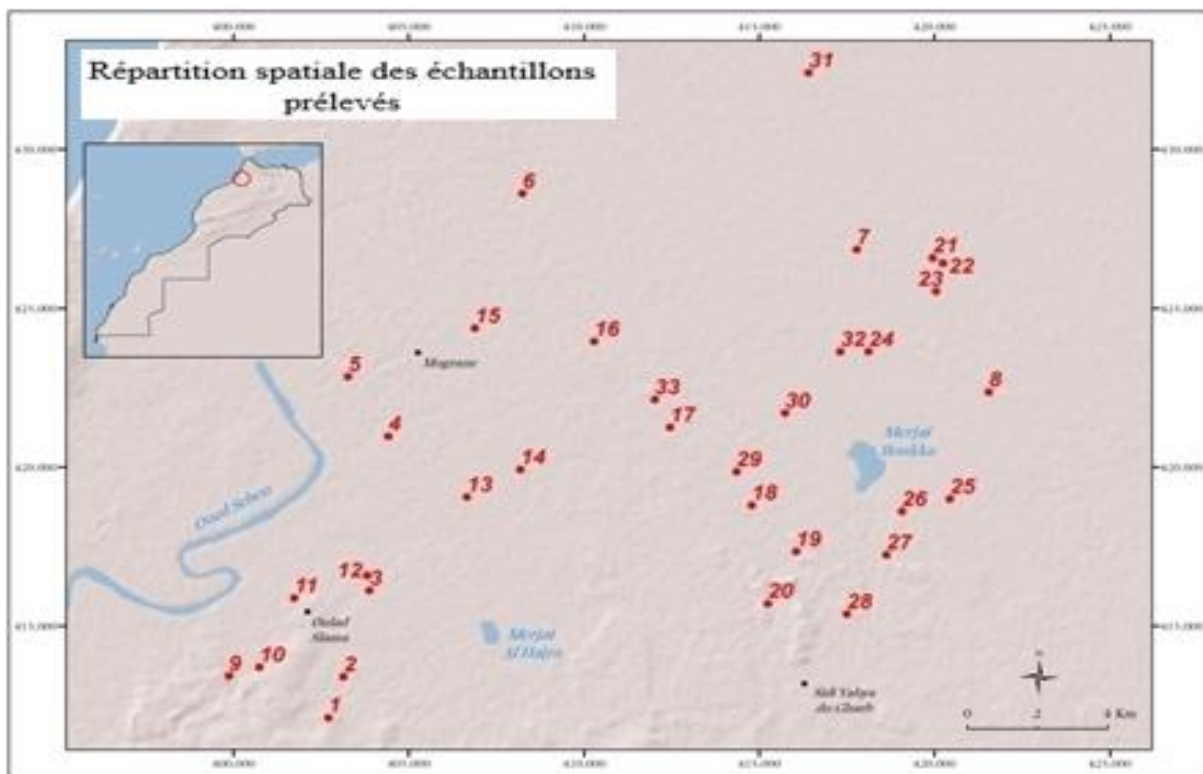
Figure 18 : Carte des systèmes d'irrigation du périmètre de Gharb (Taky, 2015).

## **CHAPITRE II :**

# **OUTILS ET METHODOLOGIE**

## 1. Sites de prélèvement

La méthodologie de travail consiste à caractériser le milieu étudié par la détermination de plusieurs paramètres physico-chimiques des sols et des eaux. Puis l'étude de la qualité des eaux souterraines de la région de Sidi Yahya et le risque sanitaire sur la population. Ainsi et moyennant une carte topographique, nous avons localisé et planifié les différents points d'eau et sol (33 points) de manière à obtenir une distribution assez homogène et en définir aussi les coordonnées par GPS de chaque échantillon (Figure 19). En effet, cette étude a pour objectif de générer des cartes d'interpolation spatiale de la qualité des eaux et des sols de la région de Sidi Yahya El Gharb.



**Figure 19** : Présentation de la zone d'étude et des échantillons prospectés.

Au niveau de chaque échantillon nous avons recueilli des informations sur la profondeur de puits, les coordonnées GPS, les types d'engrais et les produits phytosanitaires utilisés et les différentes utilisations de ses eaux (alimentation en eau potable, irrigation, ...). Et nous avons constaté que tous les points d'eau sont destinés surtout à l'irrigation.

## **2. Echantillonnage**

### **2.1. Prélèvement de sol**

Les prélèvements du sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière à raison de deux échantillons par site (0-20 et 20-40 cm). Les échantillons du sol sont collectés dans des sachets en plastique portant l'identification du site (les coordonnées géographiques X, Y).

### **2.2. Prélèvement d'eau**

Les échantillons d'eau sont collectés directement du réseau d'irrigation dans des bouteilles en plastique hermétiquement fermées et portant le code du site (Px), avec P se référant au puits et x le numéro du site. Les niveaux des eaux sont mesurés in situ à l'aide d'une sonde piézométrique.

## **3. Analyse au laboratoire**

### **3.1. Préparation des échantillons**

Pour la caractérisation de la qualité des sols et des eaux, des analyses physico-chimiques ont été considérées primordiales. Ce qui fait que les échantillons prélevés sur le terrain sont ramenés au laboratoire de l'Institut National de La Recherche Agronomique à Rabat (INRA-Rabat) dans le but de les préparer et les analyser dans le laboratoire de chimie des sols de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles.

Les échantillons des sols sont tout d'abord enregistrés dans le registre du laboratoire, puis subissent alors au préalable un séchage à l'air libre, émietter les mottes pour les broyer et tamiser par la suite sans que leur nature soit modifiée. Ainsi ils sont passés dans un tamis à 2mm pour extraire les débris végétaux et les cailloux de taille supérieure à 2mm. Une aliquote du sol tamisé à 0,2mm est conservée pour l'analyse de la matière organique. Concernant les échantillons des eaux, ils sont conservés dans le réfrigérateur pour éviter toute sorte de dégradation. Tous les échantillons font l'objet d'une série d'analyses physico-chimiques.

### **3.2. Analyse des sols**

#### **3.2.1. Paramètres physiques**

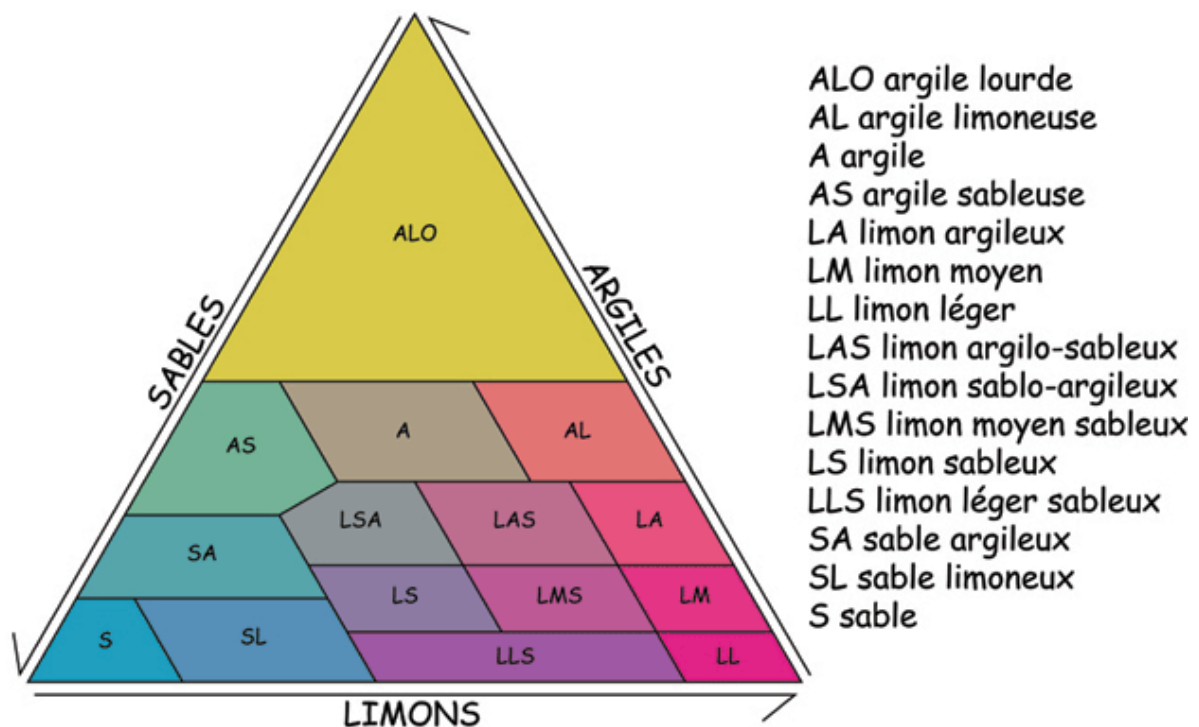
##### **3.2.1.1. Granulométrie**

Selon les dimensions recherchées, les méthodes de séparation utilisent la voie sèche (tamis) ou humide (sédimentation en colonne d'eau) pour les fractions les plus fines ( $< 50 \mu\text{m}$ ). En alternative à ces méthodes, il existe aujourd'hui des granulométries à laser qui permettent une caractérisation pratiquement continue de la distribution granulométrique des matériaux solides divisés (ADEME, 2009). La méthode préconisée dans l'objectif d'exclure certaines techniques sur

la base de la distribution granulométrique est décrite par la norme NF X 31-107. Cette méthode d'analyse permet de définir la répartition des particules minérales inférieures à 2 mm selon les cinq fractions suivantes :

- Argiles : < 2  $\mu\text{m}$
- Limons fins : 2 à 20  $\mu\text{m}$
- Limons grossiers : 20 à 50  $\mu\text{m}$
- Sables fins : 50 à 200  $\mu\text{m}$
- Sables grossiers : 200 à 2000  $\mu\text{m}$

L'analyse physique de ces cinq fractions granulométriques (argile, limons fin et grossier, sables fin et grossier) a été réalisée par la méthode densimétrie. Le triangle de texture de l'USDA (Figure 20) a été utilisé pour la classification de la texture des sols.



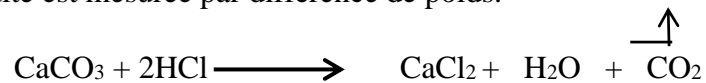
**Figure 20** : Diagramme de classification détaillée des textures (USDA, 1995).

### 3.2.1.2. Calcaire total

Le calcaire ou le carbonate de calcium se présente sous la forme de particules plus ou moins grosses. Du point de vue purement granulométrique, ces particules sont analogues aux autres grains de sable mais du point de vue chimique elles sont différentes. En effet, les plus fines et les plus

poreuses d'entre elles peuvent libérer du calcium qui tend à neutraliser les acides et donc à rendre la terre plus basique (**Romuald, 2010**).

L'échantillon du sol est mis en contact avec un acide fort (HCl à 25%) susceptible de dissoudre le calcaire en milieu fermé. L'attaque du calcaire (CaCO<sub>3</sub>) engendre un dégagement gazeux de CO<sub>2</sub> dont la quantité est mesurée par différence de poids.



Cette méthode est très utilisée par les laboratoires. Les éléments d'interprétation de la teneur en calcaire total sont donnés dans le tableau 10.

**Tableau 10** : Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol (**Baize, 2000**).

Taux du calcaire (%)	< 1	1 à 5	5 à 25	25 à 50	50 à 80
Appréciation	Non calcaire	Faiblement calcaire	Moyennement calcaire	Calcaire	Fortement calcaire

### 3.2.2. Paramètres chimiques

#### 3.2.2.1. pH de sol

Le pH est un paramètre important de la dynamique du sol, il peut être influencé par divers facteurs. Il joue un rôle prépondérant dans la vie biologique et dans la croissance des plantes. On détermine le pH par la méthode potentiométrique à l'aide d'un pH-mètre. Cet appareil fonctionne avec un système d'électrodes combinées, se composant d'une part d'une électrode de verre dont le potentiel dépend des ions H<sup>+</sup>, et d'autre part d'une électrode de référence (une électrode au calomel saturée) (**Dinon et Gerstmans, 2008**).

Le pH (pH eau) de l'échantillon du sol est déterminé par sa mise en suspension dans l'eau distillée avec un rapport sol/eau (1/2,5). L'acidité d'échange est déterminée par ajout de KCl dans la suspension (pH KCl). Le pH est mesuré au moyen d'un pH-mètre de marque METRHOM, modèle 728 (**Van Ranst et al., 1999**). La répartition des classes de pH des sols selon les normes marocaines (**DIAEA /DRHA /SEEN, 2008**) est présenté par le tableau 11.

**Tableau 11** : Répartition des classes de pH des sols selon les normes marocaines (DIAEA /DRHA /SEEN 2008)

pH	<6	6 – 6,5	6,5-7,3	7,3-7,8	7,8-8,5	8,5-9
Classe du sol	Acide	Faiblement acide	Neutre	Faiblement basique	Moyennement basique	Tendance alcaline

### 3.2.2.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'un sol est un paramètre important qui nous renseigne sur le degré de salinité de ce dernier. Pour mesurer la salinité du sol, nous avons utilisé la méthode de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à l'aide d'un conductivimètre de laboratoire de Marque ORION, modèle 162. Le conductivimètre est utilisé pour avoir une valeur directe de la conductivité d'une solution, cet appareil contient une cellule constituée de 2 électrodes de platine bien parallèles avec une distance de 1cm sensible au courant et par la suite la concentration de la solution en sels solubles. L'unité de mesure internationale standard est dS/cm (Tableau 12) corrigé à une température de 25°C.

**Tableau 12** : Echelle de salure (FAO, 1988).

Classe de salinité du sol	CE (dS/m)
Non salin	0-2
Légèrement salin	2-4
Modérément salin	4-8
Fortement salin	8-16
Très fortement salin	>16

### 3.2.2.3. Matière organique (MO)

Le carbone est l'élément de la matière organique le plus facilement déterminé. A partir de celui-ci, on peut donner une estimation de la matière organique totale dans le sol.

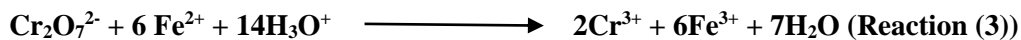
Cette méthode consiste à une oxydation à froid de la fraction organique du carbone selon la méthode Walkley-Black (Walkley et Black, 1934). En effet, l'attaque du carbone se fait par le bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$  à 1N) en milieu acide ( $H_2SO_4$ ) (Réaction 1). Après un repos de deux heures, l'excès du bichromate inutilisé dans la réaction est dosé par une solution du sel de

Mohr ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O a 0,5N) [titrage par retour] (Réactions 2 et 3). En fin de neutralisation, on observe un virage de la couleur du mélange du bleu foncé au vert clair.

Le carbone total s'exprime en taux de matière organique (MO) en %, en multipliant le résultat de C (%) par un coefficient de 1,724. **M.O% = C% x 1,724**



Ou en écrivant l'équation ionique :



**Tableau 13** : Normes d'interprétation de la matière organique selon les normes marocaines (DIAEA/DRHA/SEEN 2008)

Classe du sol	MO (%)
Très pauvre	<0,7
Pauvre	0,7-1,5
Moyennement pauvre	1,5-3
Riche	3-6
Très riche	>6

#### 3.2.2.4. Phosphore assimilable (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

La méthode d'Olsen (Olsen et al., 1954) est utilisée pour les sols ayant un pH supérieur à 7 comme dans le cas des échantillons étudiés. L'extraction est faite par une solution alcaline d'hydrogencarbonate de sodium à pH égal à 8,5 pendant une heure à une température de 20°C. Puis on prélève 5 ml à laquelle on ajoute une solution de l'acide sulfo-molybdique et d'acide ascorbique (1%). Cette méthode est basée sur la formation et la réduction du complexe de l'acide ortho phosphorique et de l'acide molybdique par l'acide ascorbique (coloration bleu ciel).

La lecture de la teneur en phosphore s'effectue à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible- modèle JENWAY 6405 a une longueur d'onde de 825 nm. Le résultat est exprimé en ppm. Le tableau 14 présente les normes d'interprétation de phosphore assimilable.

**Tableau 14** : Normes d'interprétation de phosphore assimilable (Delaunois et al, 2008).

Classe du sol	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)
Très faible	<15
Faible	15-30
Bien pourvu	30-45
Elevé	45-100
Très élevé	>100

### 3.2.2.5. Potassium échangeable (K<sub>2</sub>O)

Le potassium échangeable est un élément susceptible d'être absorbé directement par la plante, l'extraction s'effectue à l'aide d'une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 7, par la suite, les mesures se font par dosage photométrique à flamme (Blanchet, 1959).

La concentration de la solution d'extraction doit être faite après un mélange de 1/25 (4g du sol tamisé à 2mm dans 100 ml de CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, 1N), le mélange est agité pendant une heure et filtré avant de faire la lecture au moyen d'un photomètre à flamme modèle CL 378 bien étalonné. Le résultat est exprimé en ppm (Van Ranst et al., 1999). Les normes d'interprétation sont montrées dans le tableau 15.

**Tableau 15** : Normes d'interprétation potassium échangeable (Delaunois et al, 2008).

Classe du sol	K <sub>2</sub> O (ppm)
Très faible	<60
Faible	60-100
Bien pourvu	100-180
Elevé	180-300
Très élevé	>300

### 3.2.2.6. Bases échangeables

Les bases échangeables sont l'ensemble des métaux alcalins et alcalino-terreux, notamment Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>, liés au complexe absorbant et qui sont susceptibles d'être échangés avec

d'autres cations dans la solution du sol. L'extraction des bases échangeables a été réalisée par une solution d'acétate d'ammonium  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  à pH 7 (**Blanchet, 1959**). Le dosage du sodium et du potassium est réalisé au moyen du photomètre à flamme. L'appareil utilisé est de type ELICO CL 378.

Le dosage du calcium et magnésium se fait par la complexation de ces ions par l'Acide Ethylène Diamine Tétraacétique (EDTA) en présence d'une solution tampon pour ramener le pH de l'échantillon à 10, et l'indicateur coloré (Noir Eriochrome T) qui a la propriété de former avec des ions calcium et magnésium un complexe de type chélate. Pour le dosage du calcium seul, on ajoute, au lieu de la solution tampon, la soude caustique 40% avec un indicateur coloré (Calcone-carbonique).

**Tableau 16** : Normes d'interprétation du calcium et du magnésium (**Horneck et al, 2011**).

<i>Niveaux de richesse</i>	<b>Pauvres</b>	<b>Moyennes à bonnes</b>	<b>Riches</b>
<b>Calcium (meq/100g)</b>	<2,23	2,23-30,94	>30,94
<b>Magnésium (meq/100g)</b>	<0.5	0.5–2.5	>2.5

### 3.2.2.7. Oligoéléments

#### ❖ Méthodes d'extraction

Les analyses reposent sur les deux étapes suivantes :

#### ✓ Extraction :

Suivant la méthode décrite par **Mathieu et Pieltain** (2003) nous avons tout d'abord préparé la solution d'extraction comme suit : après avoir dissous 1,96g de l'acide diéthylènetriamine-pentaacétique (**DTPA**) dans 13,3 ml de Triéthanolamine (**TEA**) et 100 ml de l'eau distillé (**H<sub>2</sub>O**), nous avons ajouté 1,47g de chlorure de calcium dihydraté (**CaCl<sub>2</sub>, 2 H<sub>2</sub>O**), homogénéisé ajusté le pH à 7,3 par le biais de l'acide chlorhydrique (**HCl**) et enfin complété à 1000 ml avec du H<sub>2</sub>O (Tableau 17).

Ensuite, nous avons ajouté 50ml de cette solution d'extraction à 25g du sol dans un erlenmeyer, puis on a fait agiter pendant deux heures à 180 tours/minute. Et enfin, nous avons filtré le mélange et récupéré le filtrat pour être dosé dans l'étape suivante.

**Tableau 17** : Préparation de la DTPA (Lindsay et Norwell,1978).

Méthode	Objectif	Référence
DTPA (0,005mol.l <sup>-1</sup> ) +TEA (0,1 mol.l <sup>-1</sup> ) +CaCl <sub>2</sub> (0,01 mol.l <sup>-1</sup> ) à pH =7,3	Teneurs assimilables en Cu, Zn, Fe, Mn et Ni	(Lindsay et Norwell,1978)

✓ **Dosage :**

Le dosage de Fe, Zn, Mn, Cu et Ni a été effectué par le biais de la spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA), modèle VARIAN, 220 (Figure 21).

❖ **Principe de la Spectrophotométrie d'Absorption Atomique**

Le spectre émis par la source lumineuse traverse le lieu d'atomisation, une partie de la lumière incidente est absorbée par les atomes résultant d'une dissociation thermique. La qualité de l'analyse dépend principalement de la concentration atomique, donc du rendement de l'atomisation. Le milieu absorbant doit, en conséquence, contenir la plus haute densité possible d'atomes à l'état fondamental, tout en conservant une proportionnalité entre cette concentration et celle de l'élément dans l'échantillon soumis à l'étude. La lecture des teneurs des échantillons se fait directement sans traitement. Dans ce qui suit, nous allons détailler l'appareillage utilisé.

❖ **Appareillage**



**Figure 21** : Photo du Spectrophotomètre d'Absorption Atomique VARIAN, 220.

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une source, lampe à cathode creuse, d'un brûleur, d'un nébuliseur, d'un monochromateur, d'un détecteur relié à un amplificateur en plus d'un dispositif d'acquisition (**Varian, 2007**).

**Tableau 18** : Normes d'interprétation des oligo-éléments du sol

Analyse	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Fer assimilable (ppm) (Cox et Kamprath ,1972)	<2,5	2,5-4,5	4,5-11	>11	-
Zinc assimilable (ppm) (Buchholzet Brown ,2004)	<0,5	0,5-1	1-2	2-60	>60
Manganèse assimilable (ppm) (Herrera ,1995)	-	<1	1-2,5	2,5-50	>50
Cuivre assimilable (ppm) (Buchholzet Brown ,2004)	-	<0,3	0,3-0,6	>0,6	-

### 3.3. Analyse des eaux

#### 3.3.1. Sur terrain

##### 3.1.1.1. pH

Le pH conditionne un grand nombre d'équilibre physico-chimiques entre l'eau, le gaz carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates qui constituent des solutions tamponnées conférant à la vie aquatique un développement favorable. Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 (Tableau 19).

Le pH de l'eau est mesuré à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode.

**Tableau 19** : Classement du pH des eaux d'irrigation (**Baize et Girard, 2001**).

Qualité d'eau	pH
Acide	<6
Peu acide	6-6,5
Neutre	6,5-7,3
Peu basique	7,3-7,8
Moyennement basique	7,8-8,5

### 3.3.1.2. Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique est le niveau d'eau mesuré, généralement, au moyen d'une sonde piézométrique de 100m. Le point de repère est simplement déterminé par le sommet du tubage piézométrique ou encore du tubage de protection. Le niveau piézométrique d'une nappe à l'équilibre est fourni par la mesure du niveau de l'eau souterraine dans les puits ou les forages non exploités. L'eau peut librement osciller dans une nappe libre considérée, alors que dans une nappe captive, une couche imperméable surmonte la formation aquifère ; la nappe est alors sous pression et son niveau piézométrique s'équilibre au-dessus du toit de la formation aquifère, l'eau émerge quand ce niveau dépasse le niveau du sol (CWEA, 2010) (voir Annexe II).

### 3.3.1.3. Température

La connaissance des valeurs de la température de l'eau permet la compréhension de l'eau de l'état d'évolution de beaucoup de phénomènes. Elle est mesurée par un thermomètre à mercure. Ce paramètre permet également la correction d'autres paramètres notamment la conductivité électrique. la température de l'eau mesurée à l'aide d'un thermomètre.

## 3.3.2. Analyse au laboratoire

On a prélevé 33 échantillons qui ont été pris de la région d'étude Sidi Yahya Gharb et 16 paramètres physico-chimiques pour les échantillons prélevés ont été mesurés. Ces paramètres sont : **CE, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>**. Toutes ces analyses sont effectuées dans le laboratoire de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles (URECRN) à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Rabat.

### 3.3.2.1. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique de l'eau est une mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique (capacité de l'eau à permettre le passage d'un courant électrique). La conductivité électrique de l'eau est une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, ...) qui sont formés par la solution des sels minéraux dans l'eau (Tableau 20). La conductivité électrique donne une idée de la minéralisation d'une eau est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau (HCEFLCD, 2006). Elle a été réalisée sur le terrain et au laboratoire à l'aide d'un conductimètre de Maque ORION, modèle 162, les valeurs sont exprimées en dS/m.

**Tableau 20** : Classification de l'eau (Maillard, 2001).

Classe	CE mS/cm	Type d'eau
Non saline	< 0,7	Eau potable et irrigable
Légèrement saline	0,7-2	Eau d'irrigation
Modérément saline	2 - 10	Première eau de drainage et eau souterraine
Très saline	10 - 25	Seconde eau de drainage et eau souterraine
Très fortement saline	25 - 45	Eau souterraine très salée
Saumure	> 45	Eau de mer

### 3.3.2.2. Chlorures

Les chlorures ont été déterminés par la méthode de Mohr. Les ions  $\text{Cl}^-$  sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ , 0.02 N) en présence de chromate de potassium ( $\text{KCrO}_4$ ) 10 %. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de teinte rouge caractéristique du chromate d'argent. Les chlorures vont se précipiter sous forme de chlorure d'argent ( $\text{AgCl}$ ) (Rodier et al., 2009). Les normes d'interprétation sont montrées dans le tableau 21.

**Tableau 21** : Répartition de la teneur des ions chlorures dans les eaux des irrigation (MDMEMEE,2014).

Qualité d'eau	$\text{Cl}^-$ (ppm)
Excellente	<200
Bonne	200-300
Moyenne	300-750
Mauvaise	750-1000
Très mauvaise	>1000

### 3.3.2.3. Sodium et potassium

Le sodium est un élément constant de l'eau, toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des retombées d'origine marine, de la venue des eaux salées dans les nappes aquifères, des nombreux usages industriels etc...

Par contre, le potassium est moins répandu que le sodium dans les roches ignées (volcaniques) mais il est plus abondant dans les roches sédimentaires (roches silicatées). De plus, contrairement au sodium, le potassium est plus difficile à libérer des minéraux silicatés et montre une plus grande facilité à se réincorporer comme produit solide de l'altération. C'est pourquoi le K<sup>+</sup> dans l'eau se retrouve à des concentrations plus faibles que le sodium (**Simard et Des Rosiers, 1980**). D'une manière générale, les eaux souterraines présentent rarement des teneurs en potassium supérieures à 10 mg/l (**Meybeck, 1986**). Elles sont mesurées à l'aide d'une photométrie à flamme et sont exprimées en meq/l.

L'appareil utilisé est de type JENWAY, modèle PFP7.

### 3.3.2.4. Alcalinité résiduelle des eaux

Il a été constaté que, dans le cas où le faciès chimique des eaux à usage agricole est chloruré, le SAR minimise fréquemment le risque de sodisation et d'alcalinisation de ces eaux (Tableau 22). C'est pourquoi on a opté pour la détermination du Carbonate de Sodium Résiduel (RSC) comme un autre moyen pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation (**Durand, 1983**). La détermination du RSC se fait selon la relation suivante :

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

**Tableau 22** : Classification de l'eau d'irrigation selon RSC (**DURAND, 1983**).

Qualité de l'eau	RSC (méq/l)
Bonne	$\leq 1,25$
Moyenne	$1,25 < \text{RSC} \leq 2,5$
Inutilisable	$> 2,5$

### 3.3.2.5. Carbonates et bicarbonates

Pour doser les ions carbonatés, on neutralise par une solution de HCl (0,05N), en présence d'un indicateur coloré (la phénophtaléine), à pH compris entre 8,3 et 10. La disparition de la coloration rose, qui caractérise la phénophtaléine en présence des carbonates, indique la neutralisation de ces ions. Ainsi, à partir de la prise d'essai et du volume de HCl versé, on détermine la concentration des ions CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (**Rodier et al., 2009**).

Le dosage d'ion de bicarbonates se fait de la même façon que précédemment, mais, l'indicateur coloré est, dans ce cas, le rouge de méthyle. La neutralisation est atteinte lorsque la coloration de cet indicateur passe du jaune à l'orange, vers un pH compris entre 3,2 et 4,4.

### 3.3.2.6. Dureté

La dureté totale d'une eau est produite par les sels de calcium et de magnésium qu'elle contient. On distingue :

- Une dureté carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg
- Une dureté non carbonatée produite par les autres sels

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. Par contre, là où on trouve de la contamination par l'eau de mer, la concentration en magnésium peut être plus élevée que celle du calcium ( Tableau 23).

En général, une eau dure n'est pas souhaitable pour l'usage domestique car elle réduit de beaucoup l'efficacité des savons. Par contre, en agriculture, une eau dure aide le sol à conserver une bonne structure par les ponts calciques. La dureté est mesurée par le titre hydrotimétrique exprimé en °F (degré français) ; 1 °F correspond à 10 mg de carbonate de Ca dans 1 litre d'eau(Desbordes., 2000).

La dureté des eaux est l'une des méthodes pour l'estimation de la potabilité des eaux destinées à la consommation humaine. Cette dureté est déterminée par le calcul de titre hydrotimétrique de la façon suivante :

$$TH = TCa^{2+} + TMg^{2+}$$

**Tableau 23** : Classification de l'eau d'irrigation selon TH (I'O.M.S, 2008)

TH (°F)	0-7	7-22	22-32	32-54	>54
Dureté de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure

### 3.3.2.7. Calcium et Magnésium

Les ions calcium et magnésium sont complexés par l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA ,0.02N ) en présence des indicateurs colorés ( Calconcarbonique et noir eriochrome T)(**Van Ranst et al., 1999**).

### 3.3.2.8. Nitrates et l'ion ammonium

Les nitrates et l'ammonium sont déterminés par la méthode Kjeldahl'' sur un appareil de marque bûchi unit B-323. Cette méthode est basée sur la récupération du distillat dans la solution d'acide borique et le titrage par l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ,0,005N) après l'addition de 1 à 2g de MgO calciné pour le dosage d'ammonium, et l'addition de 0,5 à 1g d'alliage de devarda pour le dosage de nitrate (**Calvet et Villeman, 1986**). La répartition de la teneur des ions nitrate et d'ammonium est présenté dans les tableau 24, 25.

**Tableau 24** : Répartition de la teneur des ions nitrate dans les eaux d'irrigation (**MDMEMEE, 2014**).

Qualité d'eau	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
Excellente	<5
Bonne	5-25
Moyenne	25-50
Mauvaise	50-100
Très mauvaise	>100

**Tableau 25** : Répartition de la teneur des ions d'ammonium dans les eaux d'irrigation (**MDMEMEE, 2014**).

Qualité d'eau	·NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)
Excellente	<0,1
Bonne	0,1-0,5
Moyenne	0,5-2
Mauvaise	2-8

### 3.3.2.9. Sodicité

Lorsque la concentration des ions Na<sup>+</sup>   l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca<sup>2+</sup> ( change de base) dans le complexe absorbant.

Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR),(Arveti et al., 2011). Pour une même conductivité électrique, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé (Tableau 26). Le SAR est défini par la relation suivante:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

**Tableau 26** : SAR et degrés d'alcalinisation des eaux d'irrigation (DIAEA/DRHA/SEEN , 2010)

SAR	Alcalinisation
$SAR \leq 10$	<b>Pas d'alcalinisation</b>
$10 < SAR \leq 20$	<b>Faible alcalinisation</b>
$20 < SAR \leq 40$	<b>Alcalinisation moyenne</b>
$40 < SAR \leq 100$	<b>Alcalinisation forte</b>
$SAR > 100$	<b>Alcalinisation intense</b>

### 3.3.2.10. Identification des faciès chimiques

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie et ont pour objectif de

- décrire la composition des eaux naturelles ;
- classer les eaux de la nappe en fonction de leurs comportements chimiques ;
- connaître l'origine des eaux de la nappe.

La nécessité d'une comparaison aisée, ou une classification des eaux naturelles nécessitent nous mène à l'utilisation des représentations graphiques. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées, parmi lesquelles on peut citer :

- **le diagramme de Piper.**
- **le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff.**

## ❖ Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles (Figure 22). Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon (Guler et al., 2002). Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée. Le diagramme de Piper permet également :

- d'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes ;
- d'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques ;
- d'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant ;
- la projection de plusieurs échantillons en même temps pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Cette projection va nous permettre de faire une comparaison facile et aussi avoir une idée sur la notion de mélange et de suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle.

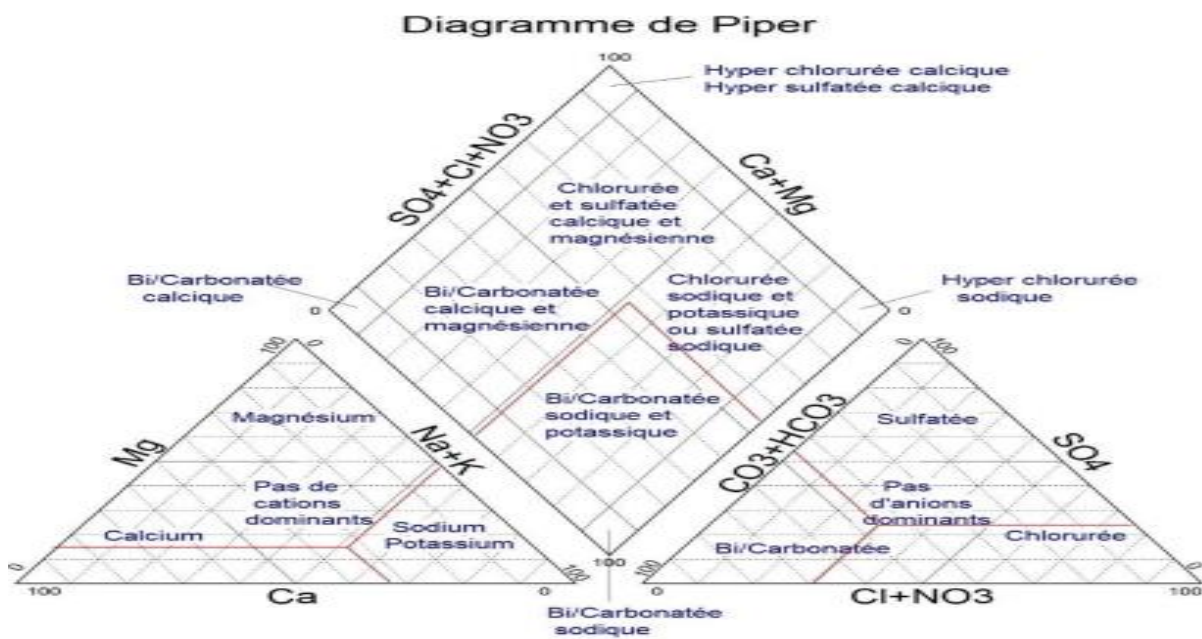


Figure 22 : Diagramme de Piper ( Boutaleb et al., 2000).

### 3.4. Analyse statistique

Les paramètres statistiques (minimum, maximum, moyenne et CV) sont calculés pour les échantillons prélevés dans le périmètre de Sidi Yahya El Gharb et pour les 8 paramètres de qualité de sols (Texture, CaCO<sub>3</sub>, pH, CE, MO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, ESP) et pour les 13 paramètres de qualité des eaux (CE, pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SAR, RSC, TH). Ces calculs statistiques concernant :

- Les corrélations inter-éléments ont été analysées avec la méthode de corrélation de Pearson.
- Le degré de similitude entre les paramètres a été évalué en utilisant une analyse ANOVA pour mesurer les relations entre les groupes d'éléments qui ont des comportements similaires. D'une manière générale, l'objectif d'une analyse de variance (ANOVA) vise à tester les différences significatives entre les moyennes. Elles ont des propriétés qu'il est important de présenter pour faciliter l'interprétation de l'analyse.
- Analyse en composantes principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus fréquemment utilisées. Elle permet d'étudier des ensembles de données multidimensionnelles avec des variables quantitatives.

### 3.5. Système d'Information Géographique (SIG)

Dans le domaine d'exploitation des ressources naturelles, la prise de décision repose en grande partie sur l'analyse des données qui proviennent de sources variées d'informations spatialement distribuées et stockées dans des cartes thématiques.

De nos jours, la cartographie assistée par ordinateur, associée à la gestion des données dans le cadre d'un système d'information géographique (SIG) présente un certain nombre d'avantage par rapport aux méthodes traditionnelles de manipulation des données. Parmi ces avantages on peut citer :

- La saisie de l'information de manière géocodée et son stockage sur un support magnétique facilement archivable.
- La disponibilité des données sous format directement utilisable à la demande et leur restitution sous format cartographique selon le thème ou l'application voulus et à l'échelle désirée.
- La visualisation sur écran des sorties avant leurs éditions.

- La possibilité de faire des superpositions (des recoupements) de documents cartographiques de façon numérique sur ordinateur pour l'établissement de carte multifactorielle ou la modélisation.

Cet outil a été utilisé dans le cadre de cette étude pour générer des cartes d'interpolation spatiale de la qualité des eaux et des sols de la région de Sidi Yahya El Gharb.

Toutes les données produites dans le cadre de cette étude concernant la qualité des eaux et des sols ont été saisies, géocodées et attachées pour constituer une base de données, dans le but de les restituer sous forme cartographique en se basant sur les normes et les classes qui sont définies. Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire SIG de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles.

Toutes les cartes géographiques, celle de la zone d'étude, les cartes de distribution de tous les paramètres confondus ont été réalisées à l'aide d'ArcGIS 9.3. Toutes ces cartes de distribution de chacun de ces éléments ont été générées en utilisant la méthode d'interpolation La distance inverse pondérée (IDW) (**Atkinson et Tate, 1999 ; Zerrouqi et al., 2013**).

Nous avons procédé à la numérisation des limites de la zone d'étude. La digitalisation a été réalisée à l'aide d'une interface du système ArcInfo/ArcView sur un fond topographie que au 1/50000. Les cartes finales ont été élaborées par un modèle d'interpolation spatiale à partir des mesures ponctuelles.

**PARTIE III :**  
**RESULTATS ET DISCUSSION**

**CHAPITRE I :**  
**ETUDE DE LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE**  
**DES SOLS**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des analyses des paramètres de qualité des sols étudiés. L'étude concerne en particulier la texture, le pH, la salinité, la matière organique (MO), le phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ), le potassium échangeable ( $K_2O$ ), l'alcalinité (ESP) et les oligoéléments (Cu, Fe, Zn et Mn). Ils seront présentés de façon structurale, par les cartes de distribution ou par des tableaux. Les interprétations se réfèrent aux études effectuées par d'autres auteurs et aux normes internationales et nationales. Ensuite, dans un deuxième temps, nous interpréterons les résultats des analyses statistiques.

La détermination de ces paramètres nous permettra de caractériser l'état actuel des sols dans le périmètre étudié, afin d'évaluer leur degré de dégradation.

### 1. Texture du sol

Les sols naturels sont composés des particules de sols de tailles différentes. Les classes texturales du sol sont les sables (les plus gros), les limons et les argiles. La proportion relative des différentes classes structurales détermine la texture du sol (**Legros, 2006**).

La classification des textures est représentée à l'aide du triangle textural, dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, limon et argile. Les résultats d'analyse granulométrique sont présentés dans le tableau 27 :

*Tableau 27 : Distribution des cinq fractions de texture des sols.*

<b>Sites</b>	<b>% A</b>	<b>% LF</b>	<b>% LG</b>	<b>% SF</b>	<b>% SG</b>	<b>Texture</b>
<b>1</b>	14,8	2,4	0	47,6	35,2	<b>S</b>
<b>2</b>	14	2,2	2,2	43,4	38,2	<b>S</b>
<b>3</b>	49,3	11,2	5	15,7	18,8	<b>ALO</b>
<b>4</b>	72,8	12,2	9,9	2,7	2,4	<b>ALO</b>
<b>5</b>	62,9	23,9	6,9	3,8	2,5	<b>ALO</b>
<b>6</b>	65,8	18,3	9,5	3,8	2,6	<b>ALO</b>
<b>7</b>	67,2	15,3	9,5	3,3	4,7	<b>ALO</b>
<b>8</b>	68,4	12,3	11	5,5	2,8	<b>ALO</b>
<b>9</b>	12,7	1,2	2,5	38,5	45,1	<b>S</b>
<b>10</b>	13,9	0	2,5	40,2	43,4	<b>S</b>
<b>11</b>	42,8	5,9	9,6	21,2	20,5	<b>A</b>
<b>12</b>	48,9	15,9	7,2	15,5	12,5	<b>ALO</b>
<b>13</b>	69,5	16,2	8,5	3,5	2,3	<b>ALO</b>
<b>14</b>	68,8	13,5	9,8	5,2	2,7	<b>ALO</b>
<b>15</b>	64,2	18,2	7,8	4,7	5,1	<b>ALO</b>
<b>16</b>	65,7	16,2	8,7	6,9	2,5	<b>ALO</b>
<b>17</b>	68,4	16,2	9,1	4,3	2	<b>ALO</b>
<b>18</b>	14,4	4,5	4,3	55,7	21,1	<b>S</b>
<b>19</b>	19,7	2,5	4,9	38,3	34,6	<b>S</b>
<b>20</b>	9,5	1,2	1,2	42,9	45,2	<b>S</b>
<b>21</b>	64,9	14,3	11,3	6,3	3,2	<b>ALO</b>
<b>22</b>	61,7	17,9	10,4	6,4	3,6	<b>ALO</b>
<b>23</b>	50,3	14,6	7,8	15,5	11,8	<b>ALO</b>
<b>24</b>	48,2	11,5	8,6	18,5	13,2	<b>ALO</b>
<b>25</b>	66,4	18,4	11,2	2,1	1,9	<b>ALO</b>
<b>26</b>	68,3	14,2	12,2	3,2	2,1	<b>ALO</b>
<b>27</b>	27,2	6,6	8,4	24,3	33,5	<b>SA</b>
<b>28</b>	16,2	1,2	2,3	42,9	37,4	<b>S</b>
<b>29</b>	47,6	16,3	8,2	9,5	18,4	<b>ALO</b>
<b>30</b>	56,7	20,5	9,8	4,7	8,3	<b>ALO</b>
<b>31</b>	64,3	15,8	9,8	6,7	3,4	<b>ALO</b>
<b>32</b>	75,6	13,7	6,4	3,1	1,2	<b>ALO</b>
<b>33</b>	72,6	14,6	8,4	2,8	1,6	<b>ALO</b>

Avec

**Ar : Argile**

**LF : limon fin**

**LG : limon grossier**

**SF : Sable fin**

**SG : Sable Grossier**

**SA : Sablo-argileux**

**ALO : Argile lourd**

**S : Sable**

La texture est une caractéristique importante du sol car elle affecte fortement la prise d'eau du sol (infiltration), le stockage de l'eau dans le sol, le labour facile du sol, l'aération totale (nécessaire pour la croissance racinaire) et la fertilité du sol. Pour **Duane et Raymond (2004)**, le sol de texture grossière (sableuse) est facile à cultiver, il a une aération assez fournie pour une bonne croissance racinaire, et une humidification facile, mais il se sèche rapidement et est facilement appauvri en nutriments, qui sont drainés par l'eau de percolation. Pour les sols riches en argile (plus de 30% d'argile), ils ont des particules fines qui sont en agrégation. Les argiles ont peu de macropores, ce qui veut dire qu'il y a juste des petites ouvertures permettant à l'eau de circuler dans le sol. Les micropores font que les sols très argileux sont difficiles à s'humidifier, difficiles à drainer et difficiles à labourer.

Selon les résultats obtenus des sols étudiés, on observe clairement que notre région se caractérise par une texture hétérogène. Elle présente quatre types de textures : Argileuse, argile lourd, sable et sablo-argileuse (Tableau 27). La texture la plus dominante est l'Argile lourd (23 sites, 70%). Les résultats obtenus sont proche à ceux trouvés par **Laghrou (2021)**, lorsque elle a étudié les effets du semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols dans la zone agricole de Merchouch à Zaer-Rabat, Elle a constaté que la plupart du sol a une texture argileuse.

Les sols argileux sont chimiquement riches et plus fertiles. Ces sols ont une bonne capacité à transporter de l'eau par action capillaire depuis les couches profondes, mais la diffusion est lente et donc les exigences en eau des végétaux ne sont pas couvertes. La couleur de ces sols est plus sombre et leurs agrégations sont plus distinctes (**Duane et Raymond, 2004**). L'agrégation diminue le risque de formation d'une croûte. Ces sols se travaillent facilement si la teneur en eau est correcte.

## **2. Calcaire total**

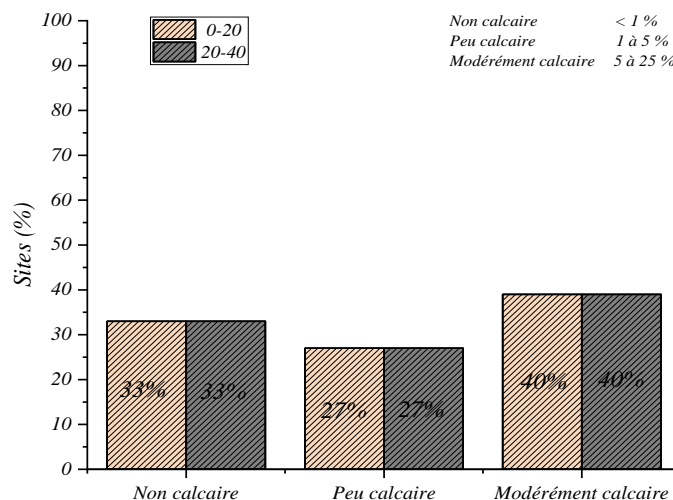
Les carbonates possèdent un double rôle dans les sols. D'une part, ils contrôlent partiellement le pH par leur équilibre de dissolution, une teneur élevée rendant le sol alcalin et favorisant certains modes de fixation (**Duchaufour, 1997**). D'autre part, leur surface peut être le siège de phénomènes de rétention des métaux principalement selon deux mécanismes : la

précipitation conduisant à une croissance de la phase solide et l'adsorption répondant à une accumulation de matière entre les phases solide et liquide (**Chatain, 2004**).

Le pourcentage du CaCO<sub>3</sub> total varie entre 0 et 17,33% pour l'horizon de surface, ainsi que de 0 à 17,63% en profondeur avec une moyenne de 5,70 et 5,45% pour les deux horizons respectivement. La répartition des classes du calcaire total des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb est présente dans le tableau 28.

**Tableau 28** : Répartition des classes de calcaire total des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon (**Baize, 2000**).

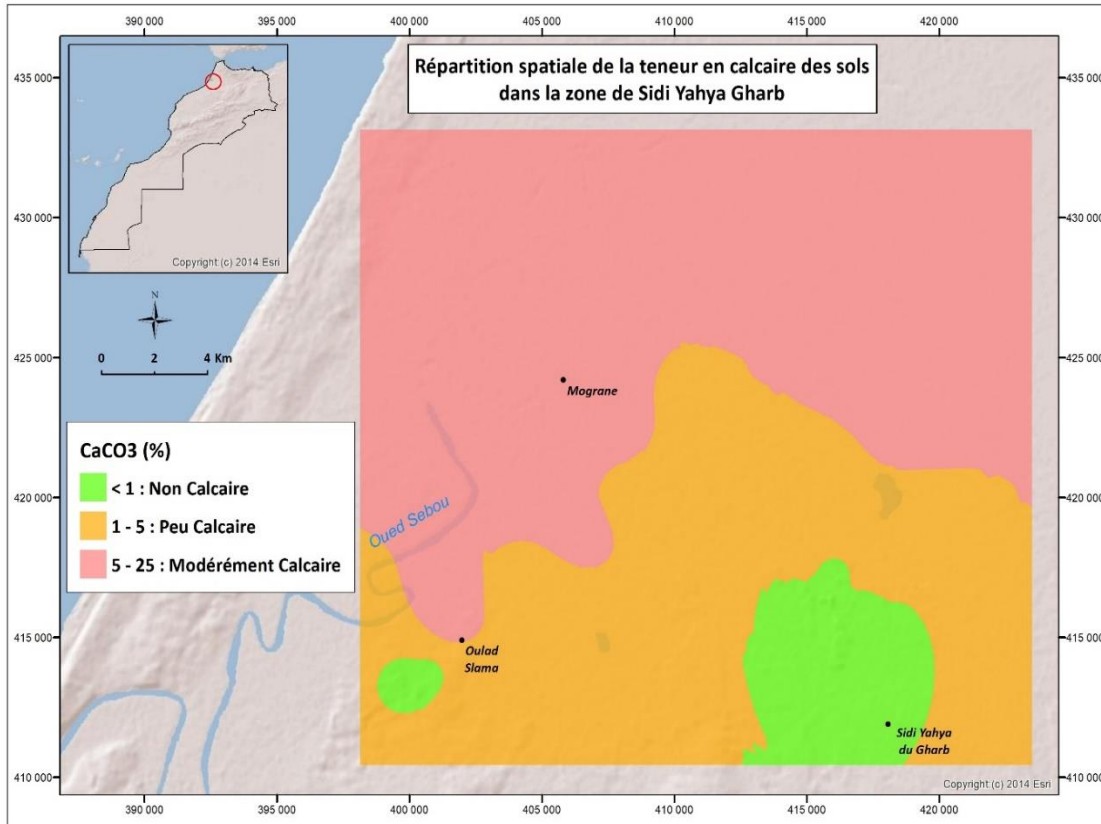
Classe du sol	Taux du calcaire	% sites 0-20cm	% sites 20-40cm
<b>Non calcaire</b>	< 1 %	33,3	33,3
<b>Peu calcaire</b>	1 à 5 %	27,3	27,3
<b>Modérément calcaire</b>	5 à 25 %	39,4	39,4



**Figure 23** : Diagramme de la teneur en calcaire total des sites étudiés en fonction des normes agronomiques (**BAIZE, 2000**).

Selon les normes données par **Baize 2000**, 33% des sols analysés correspondent à des sols non calcaires et 27% des sols sont peu calcaires et 39% des sols sont modérément calcaires pour les deux horizons (Figure 23).

La répartition spatiale du  $\text{CaCO}_3$  dans les sols de Sidi Yahya Gharb sur l'horizon de surface est présentée sur la carte de la figure 24.



**Figure 24** : Carte d'interpolation spatiale du calcaire total des sols du périmètre de Sidi Yahya Gharb.

L'examen des résultats des sols étudiés montre que le calcaire total varie dans une large gamme de 0 à 17,63 %. La répartition spatiale de calcaire révèle des plages de sol calcaire au nord et au nord-est de la région, alors que la partie du sud représente des sols non calcaires. Plus le taux de  $\text{CaCO}_3$  total est élevé dans le sol, plus il y a un risque de blocage des éléments traces et du phosphore.

Ces résultats sont en accord avec une étude de **Zaakour et al. (2020)**, sur la qualité environnementale des sols sous blé et vigne qui a été réalisée dans les villes de Mohammadia et Benslimane, et visant à évaluer la qualité environnementale des sols agricoles en culture de vigne et de blé dans la région. Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  au sein des différents sols étudiés sont généralement similaires dans toutes les stations.

### 3. pH du sol

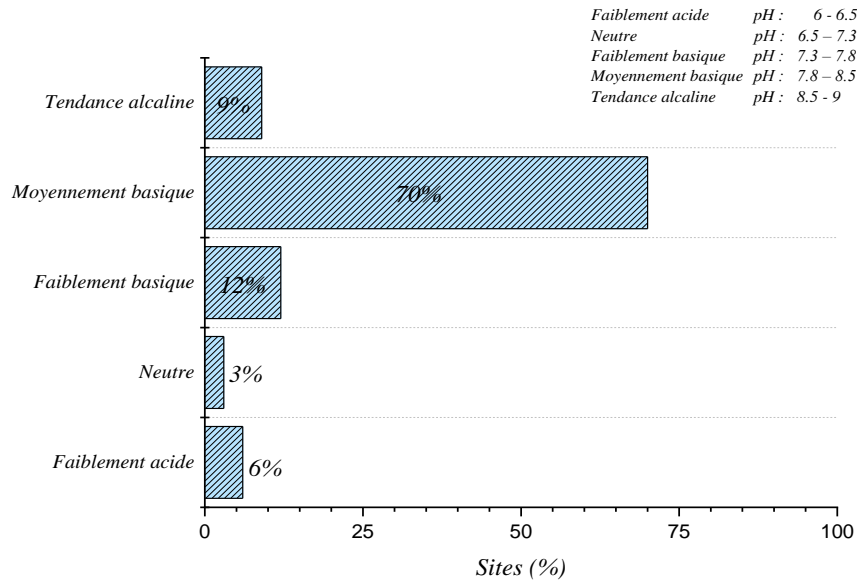
Le pH du sol est l'un des facteurs qui affectent la disponibilité des éléments minéraux dans le sol et leur absorption par les plantes. Pour évaluer le risque de mobilisation de ces éléments dans le sol, il apparaît aussi important de connaître le pouvoir tampon du sol, c'est-à-dire sa capacité à maintenir le niveau de pH naturel malgré l'apport de substances acides ou basiques (Yong et al. 1992), et conserver ainsi des conditions favorables à l'immobilisation des éléments.

D'après les analyses effectuées au laboratoire, le pH est, en général, moyennement basique ne présentant pas de grandes variabilités comme le montre le tableau 29 présenté la répartition des classes du pH des horizons (0-20cm) et (20-40cm).

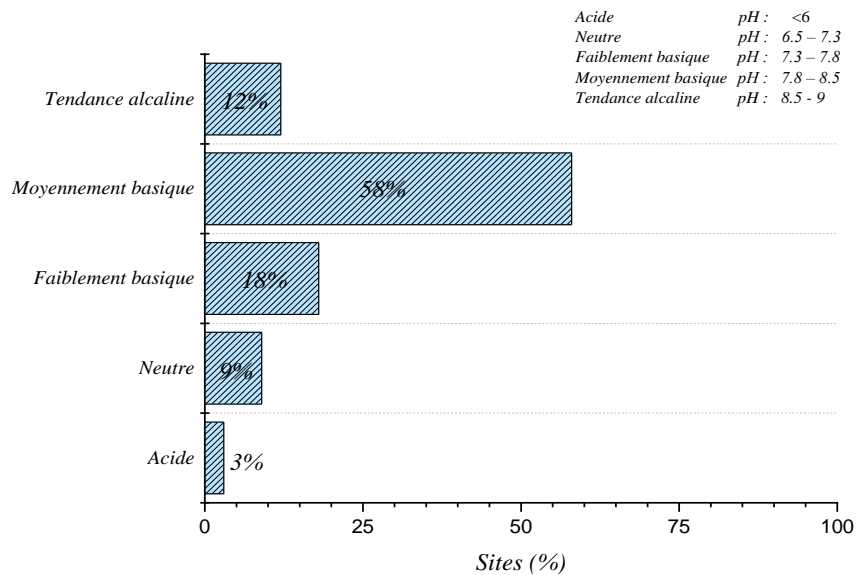
Il varie de 6,04 à 8,63 avec une moyenne de 7,94 dans le cas de l'horizon (0-20cm). Dans le cas de l'horizon (20-40cm), il varie de 5,61 à 8,86 avec une moyenne de 7,98.

**Tableau 29** : Répartition des classes de pH des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines (DIAEA /DRHA /SEEN, 2008).

Classe du sol	pH	% sites 0-20cm	% sites 20-40cm
Acide	<6	0,0	3,03
Faiblement acide	6 – 6,5	6,1	0,00
Neutre	6,5 – 7,3	3,0	9,09
Faiblement basique	7,3 – 7,8	12,1	18,18
Moyennement basique	7,8 – 8,5	69,7	57,58
Tendance alcaline	8,5 - 9	9,1	12,12
Très alcaline	> 9	0,0	0,00



**Figure 25 :** Diagramme du pH des sols étudiés horizon (0-20cm).

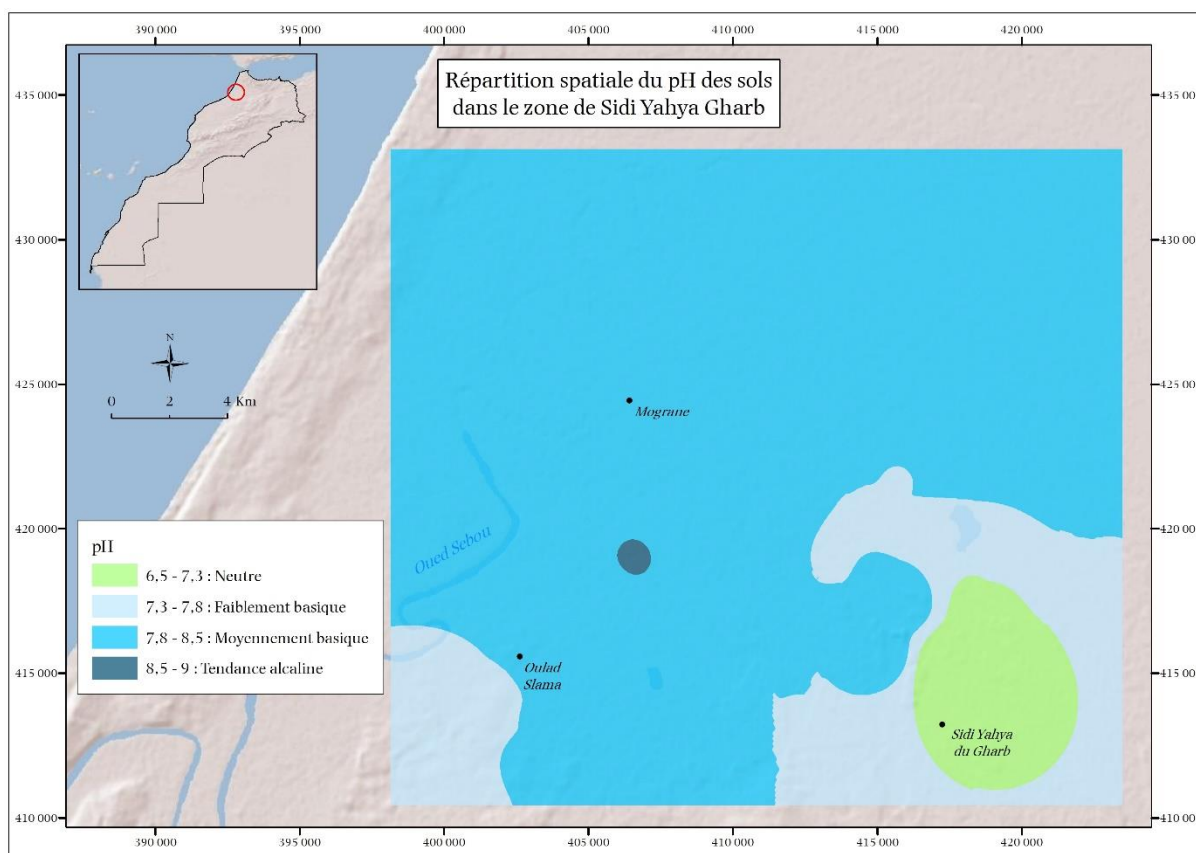


**Figure 26 :** Diagramme du pH des sols étudiés horizon (20-40cm).

D'après les figures 25 et 26, nous pouvons voir très clairement que les pH des zones étudiées sont basiques pour près de 70% et 58% respectivement pour les horizons 0-20cm et 20-40cm. Cela vient sûrement du fait que la faible pluviométrie de la région ralentit le processus d'acidification naturelle des sols. On peut supposer aussi un faible taux de matière organique dans ces sols, que l'on confirmera dans ce qui suit.

Dans le même contexte, une étude d'**EL Khodrani et al. (2017)**, sur le pH des sols zone agricole de Sfaaa (Sidi Slimane Gharb, MAROC). Les résultats du pH montrent que 29,42% des sols étudiés sont moyennement basiques, en revanche 5,88% sont faiblement acides.

La répartition spatiale du pH dans les sols de Sidi Yahya Gharb sur l'horizon de surface est présentée par la carte de la figure 27.



**Figure 27** : Carte d'interpolation spatiale du pH des sols du périmètre de Sidi Yahya Gharb.

La dominance de la classe des sols moyennement basiques est illustrée par la carte de répartition spatiale (Figure 27) montrant qu'elle se trouve dans presque toute la zone d'étude à l'exception des parties Sud-Est et Sud-Ouest. Un sol alcalin peut entraîner une solubilisation incomplète de certains éléments comme le fer et le manganèse et entraîner, par exemple, une chlorose ferrique. Pour réduire le pH des sols, il faut apporter un acidifiant à base de soufre pour neutraliser les sols calcaires sous forme d'amendement.

Les résultats expérimentaux obtenus sont similaires à ceux d'**El Oumlouki (2020)**, dans une étude de la qualité des sols dans les deux périmètres irrigués d'El Guerdane et d'Issen, elle

remarque que les pH moyennement basiques occupent toute la plaine avec l'existence de quelques zones ayant des sols de tendance alcaline, notamment dans la partie Nord du périmètre d'El Guerdane et d'Issen moderne alors que les sols neutres et faiblement basiques occupent le Nord et le Centre d'Issen traditionnel.

#### 4. pH KCl

Le pH **KCl** permet de connaître l'acidité potentielle du sol. Les valeurs du pH **KCl** sont relativement basses par rapport à celle du pH eau. La différence entre pH **KCl** et pH H<sub>2</sub>O varie entre 0,15 et 1,43 unités de pH avec une moyenne de 0,84 sur l'horizon de surface et de 0,07 à 1,53 sur l'horizon de profondeur avec une moyenne de 0,82 unités de pH. Ce qui nous permet de classer ces sols parmi les sols à acidité de réserve moyenne.

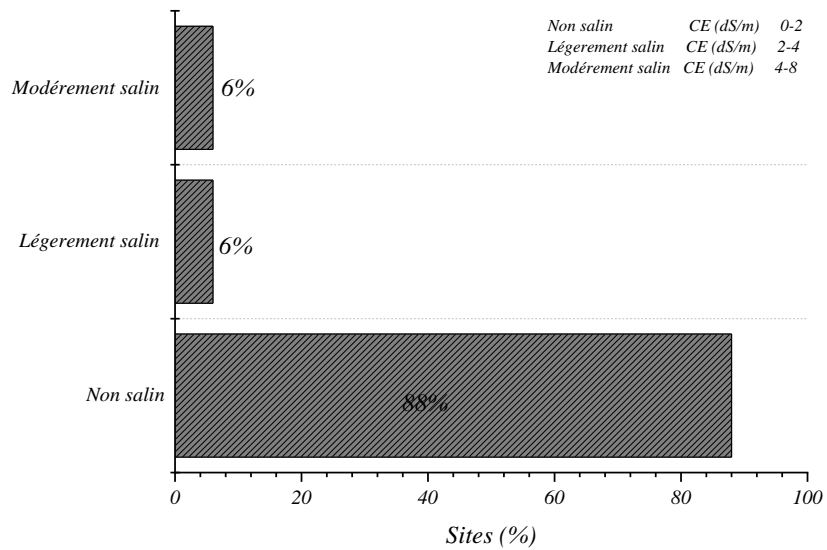
#### 5. Salinité

La salinité du sol est évaluée par la valeur de la conductivité électrique (CE) du mélange eau-sol qui indique la quantité de sel présente dans le sol. Tous les sols contiennent des sels, qui sont essentiels pour la croissance des plantes. Toutefois, l'excès de sel nuira à la croissance des plantes en modifiant l'équilibre en eau du sol. Les sols affectés par le sel sont en grande partie dans les zones arides et semi-arides, ce qui permet d'accumuler des sels dans le sol (**François, 2008**).

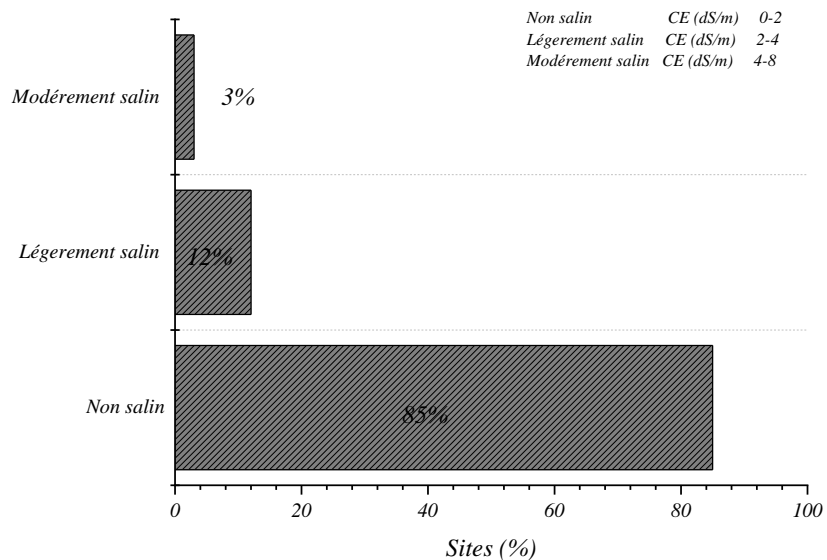
La salinité des sols étudiés a été mesurée par la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CEps). Le tableau 30 traduit la répartition des classes de la conductivité électrique des différents échantillons analysés pour les deux horizons (0-20cm) et (20-40cm). Nous constatons que la conductivité électrique varie dans une large gamme allant de 0,29 à 5,8 dS/m et 0,23 à 6,25 dS/m respectivement pour les horizons 0-20cm et 20-40cm avec des moyennes respectives de 1,25 et 1,05 dS/m.

**Tableau 30** : Répartition des classes de salinité des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes américaines (**FAO, 1988**).

Classe de salinité du sol	CE (dS/m)	% sites 0-20cm	% sites 20-40cm
<b>Non salin</b>	0-2	87,88	84,85
<b>Légerement salin</b>	2-4	6,06	12,12
<b>Modérément salin</b>	4-8	6,06	3,03
<b>Fortement salin</b>	8-16	0,00	0,00
<b>Très fortement salin</b>	>16	0,00	0,00



**Figure 28** : Diagramme de la salinité des sols étudiés (0-20cm).



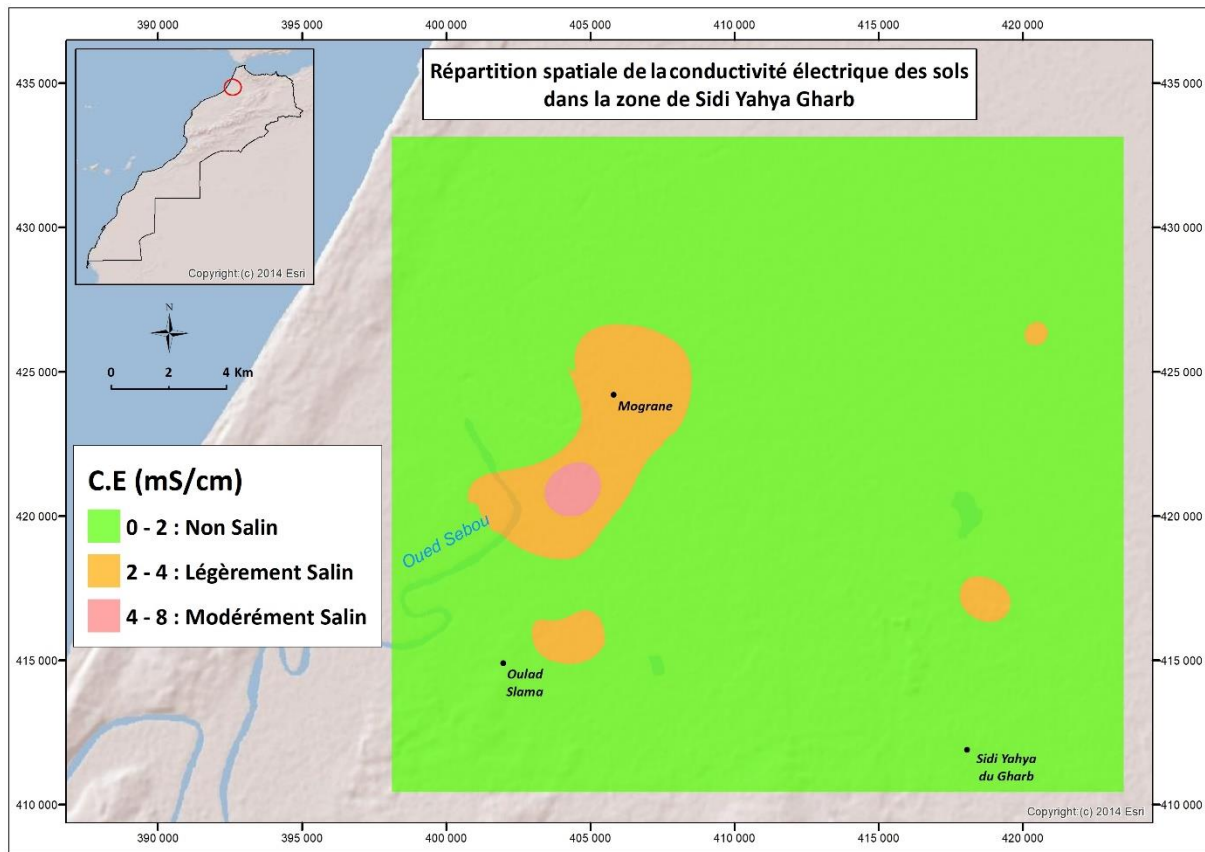
**Figure 29** : Diagramme de la salinité des sols étudiés (20-40cm).

Les signes les plus distincts des dommages dus à la salinité, sont une mauvaise croissance des récoltes et une baisse des rendements. Selon la classification américaine de la salinité des sols (FAO, 1988), et d'après les résultats des figures 28 et 29, 87,8% des sols des sites étudiés ne sont pas salins. En revanche, seuls 12,2% sont légèrement ou modérément salins pour l'horizon de

surface. En ce qui concerne l'horizon de profondeur, 84,8% des sols ne sont pas salins et 12,12% sont considérés légèrement salins, ainsi que 6% modérément salins.

Les deux horizons présentent presque le même niveau d'évolution de la conductivité électrique sauf pour les points 4 et 6 ayant des valeurs très élevées et peut être expliquée, par sa teneur en sodium ( $\text{Na}^+(\text{S4}) = 8,62 \text{ méq}/100\text{g}$ ,  $\text{Na}^+(\text{S15}) = 7,32 \text{ méq}/100\text{g}$ ).

La répartition spatiale de la conductivité électrique sur l'horizon de surface est représentée sur la figure 30.



**Figure 30** : Carte d'interpolation spatiale de la salinité du sol (CEps) dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

La carte de répartition spatiale montre que la majorité de la zone d'étude présente les niveaux de salinité les plus faibles (Figure 30). Par conséquent, le sol des sites étudiés ne présente aucun problème de salinité.

En comparant nos résultats à certains travaux de recherche il existe une grande différence dans le niveau de salinité des sols. En effet, d'après une étude de **Omrania et al. (2019)**, qui a été réalisée au M'nasra (Gharb, MAROC), évaluant la qualité physico-chimique des eaux et des sols de région d'étude. Ils ont constaté que 100% des échantillons de sol sont non salins.

On conclut que le phénomène de salinisation du sol agit négativement sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et se traduit de la même manière sur les rendements des plantes. La gestion des terres salinisées exige une combinaison de pratiques agronomiques spécifiques avec une étude préalable des caractéristiques du sol, de la qualité de l'eau et des conditions locales, incluant le climat, et les cultures.

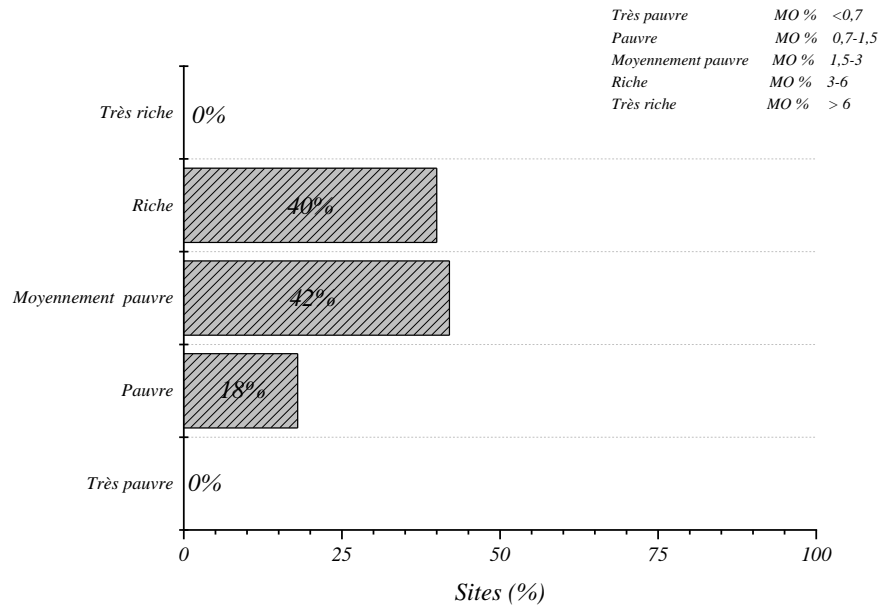
## 6. Matière organique

La matière organique du sol est un indicateur important de la qualité des sols ( **Laudicina et al., 2015; Novara et al., 2011; Mukhopadhyay et al., 2016; Parras-Alcantara et al., 2015**) de par sa contribution dans la stabilité du sol, l'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol, la fixation des éléments minéraux, et le substrat pour les microorganismes du sol. Le contenu en matière organique des sols est influencé globalement par les facteurs climatiques, la végétation, la texture du sol, les conditions topographiques, influençant le microclimat et le drainage et les pratiques culturales (**El Oumlouki et al., 2015**).

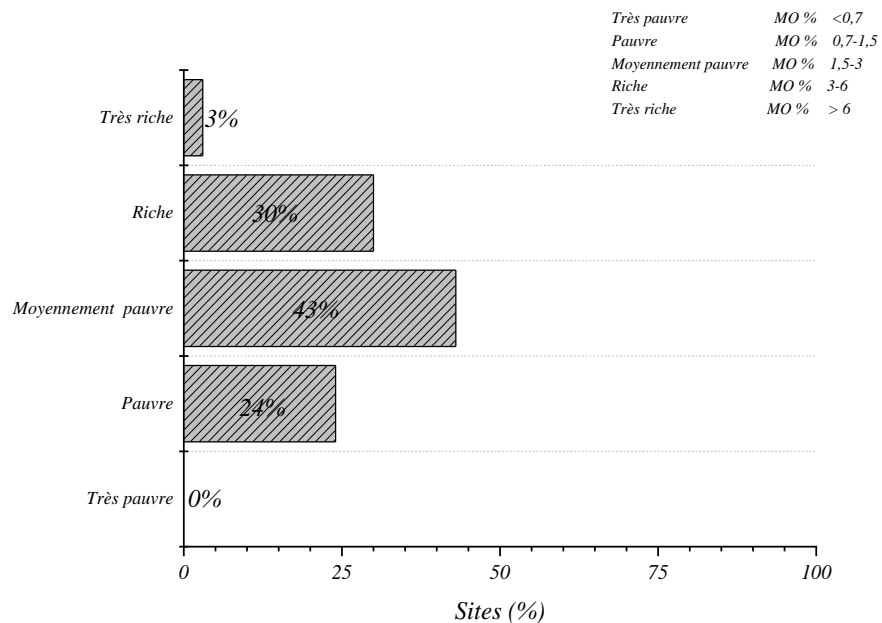
Le tableau 31 traduit la répartition des classes de la matière organique des différents échantillons analysés pour les deux horizons (0-20cm) et (20-40cm). L'examen des résultats des analyses de sols que nous avons effectués dans la région a montré que la teneur en matière organique varie entre 0,97 et 5,1% avec une moyenne de 2,72% pour l'horizon de surface et entre 0,91 et 6,25% avec une moyenne de 2,54% pour l'horizon de profondeur.

**Tableau 31** : Répartition des classes de la matière organique (MO) des sols dans le périmètre Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines (**DIAEA /DRHA /SEEN, 2008**).

Classe du sol	MO (%)	% sites 0-20cm	% sites 20-40cm
<b>Très pauvre</b>	<0,7	0,00	0,00
<b>Pauvre</b>	0,7-1,5	18,18	24,24
<b>Moyennement pauvre</b>	1,5-3	42,42	42,42
<b>Riche</b>	3-6	39,39	30,30
<b>Très riche</b>	>6	0,00	3,03



**Figure 31 :** Diagramme des teneurs de la matière organique des sols étudiés Horizon (0-20cm).

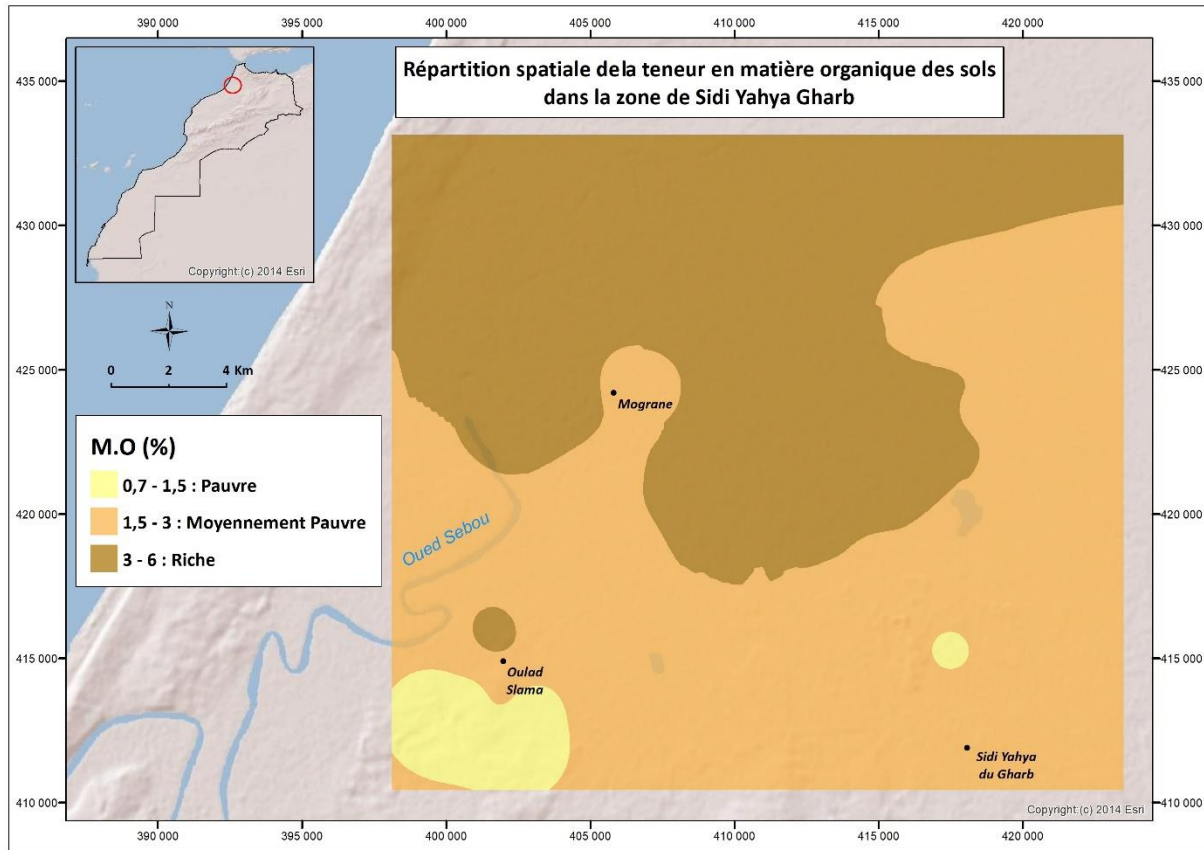


**Figure 32 :** Diagramme des teneurs de la matière organique des sols étudiés Horizon (20-40cm).

D'après les figures qui présentant la répartition des teneurs en matière organique en fonction des normes d'interprétation, 60,6% des sols étudiés ont des niveaux faibles à moyens (Figures 31, 32). Ils occupent la majeure partie de la zone d'étude (Figure 33). En revanche, 39,4% des sols sont riches en matière organique pour l'horizon (0-20cm), et 67% ont des niveaux faibles à moyens,

alors que 33,3% sont riches en matière organique pour l'horizon (20-40cm). Ce résultat est dû aux apports d'engrais organiques (compost ou fumier), ou au résidu des racines qui restent dans le sol après les cultures.

La répartition de la matière organique sur l'horizon de surface dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb est présentée par la figure 33.



**Figure 33 :** Carte d'interpolation spatiale de la teneur en matière organique des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La répartition spatiale de la matière organique révèle des plages de sols riches au nord et au centre de la région, alors que la partie du sud représente des sols pauvres. Cela peut être expliqué par l'influence du climat aride et semi-aride ainsi que les pratiques culturales exercées au niveau de la région d'étude.

Les résultats expérimentaux obtenus sont similaires à ceux trouvés par **El Oumlouki (2020)**, dans une étude de la qualité des sols dans les deux périmètres irrigués d'El Guerdane et d'Issen, il s'agit que la majorité des sols analysés dans les deux périmètres étudiés varient d'une qualité du sol très pauvre à moyennement pourvu en matière organique. Et la carte d'interpolation spatiale

montre que la répartition spatiale de la matière organique révèle des plages du sol moyennement pauvre à l'Est et au Centre d'El Guerdane et aussi au Centre d'Issen moderne. Alors qu'à l'Ouest et au Sud d'El Guerdane ainsi qu'à l'Est d'Issen moderne et dans l'Issen traditionnel existent des sols pauvres. Il met en action d'un constat très alarmant vu l'importance de la matière organique dans la préservation de la qualité des sols. De ce fait, l'utilisation des apports organiques comme amendement améliore la situation dégradée de ces sols.

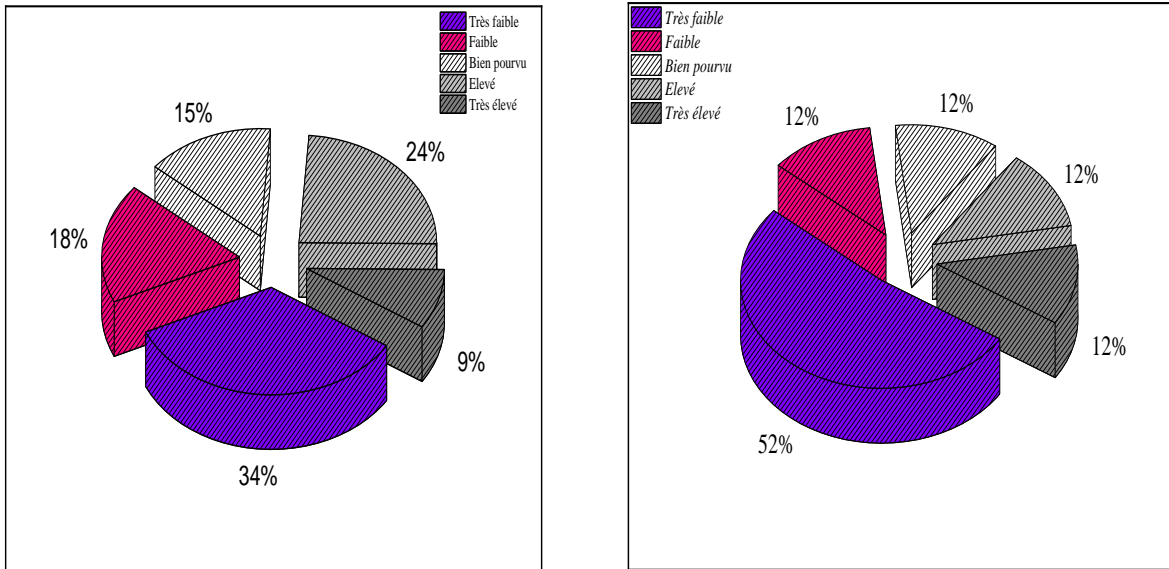
## 7. Phosphore assimilable

Le phosphore est un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des végétaux. Il joue en particulier un rôle essentiel dans la mise en place du système racinaire, la photosynthèse et la reproduction du végétal. Sa teneur dépend des propriétés physico-chimiques du sol (El Alaoui, 2007).

L'examen des résultats des analyses de sols que nous avons effectués dans la région a montré que les valeurs du phosphore varient de 4,32 à 195,6 ppm avec une moyenne de 42,9 ppm pour l'horizon (0-20cm), et de 1,35 à 157,3 ppm avec une moyenne de 34,1 ppm pour l'horizon (20-40cm). La teneur du sol en phosphore assimilable est relativement plus élevée en surface qu'en profondeur (Tableau 32).

**Tableau 32** : Répartition des classes de phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb (Delaunoy, 2008).

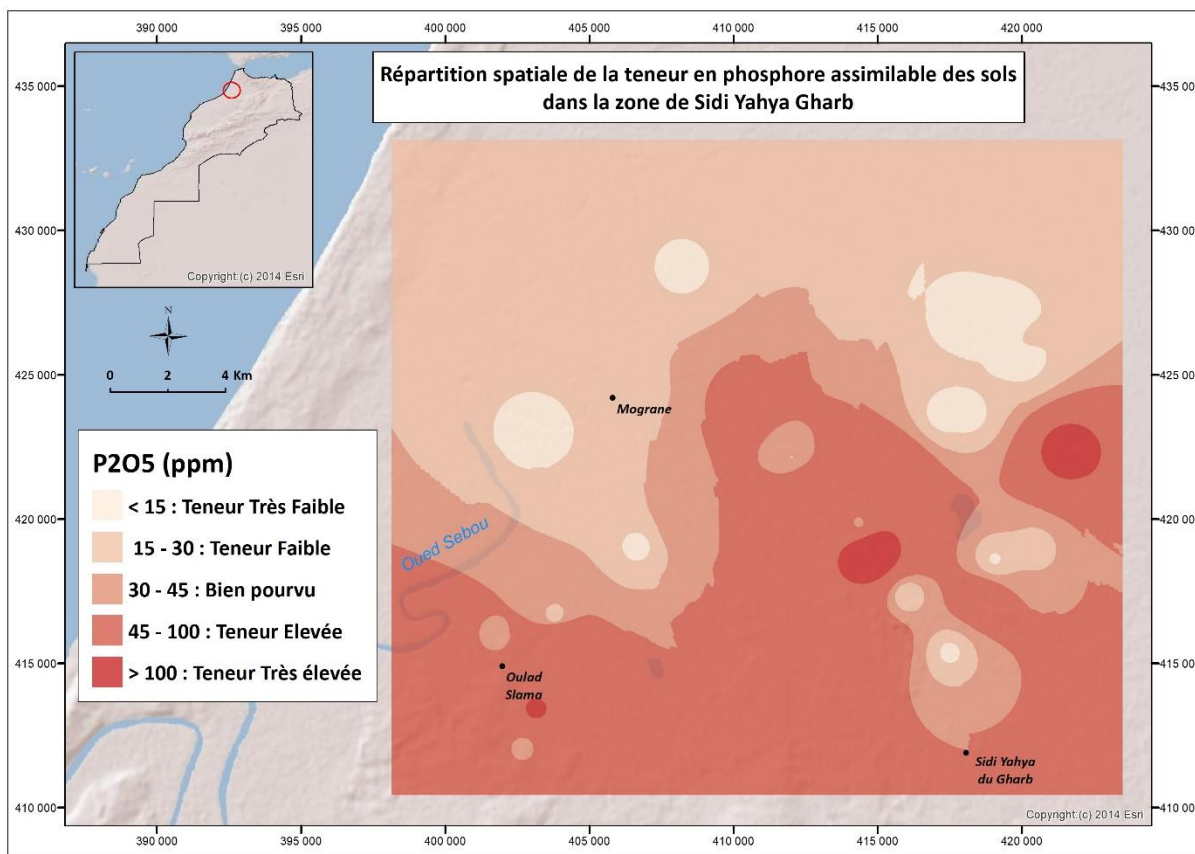
Classe du sol	$P_2O_5$ (ppm)	%sites 0-20cm	%sites 20-40cm
Très faible	<15	33,33	51,52
Faible	15-30	18,18	12,12
Bien pourvu	30-45	15,15	12,12
Elevé	45-100	24,24	12,12
Très élevé	>100	9,09	12,12



**Figure 34** : Diagramme des teneurs en phosphore assimilable des sols étudiés (0-20cm) et (20-40cm)

D'après le figure 34, 51,5% des sols ont des teneurs faibles à très faibles en  $P_2O_5$ , 15% des sols sont bien pourvus en phosphore et 33,3% des sols présentent des teneurs élevées à très élevées pour l'horizon de surface. Tandis que 64,6% des sols ont des teneurs faibles à très faibles en  $P_2O_5$ . En outre, 12,1% des sols sont bien pourvus en phosphore et 24,2% des sols présentent des teneurs élevées à très élevées pour l'horizon de profondeur.

Selon la classification de **Delaunois (2008)**, la répartition de la teneur du phosphore dans les échantillons collectés sur l'horizon de surface est présentée par la carte de la figure 35.



**Figure 35** : Caret d'interpolation spatiale du phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La carte de répartition spatiale du phosphore montre qu'il existe un gradient Nord-Sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au Sud (Figure 35). Cet excès peut être dû à l'utilisation massive d'engrais phosphatés (DAP ; phosphate diammonique). Seules quelques zones où la teneur en phosphore assimilable est très faible, ce qui donne à penser que ces champs peuvent représenter un risque de restriction de la croissance des plantes (Coale et al., 2002).

Dans le même contexte une étude de Boulmane et al. (2017), sur *Eucalyptus camaldulensis* et fertilité des sols dans la plaine de Sidi Yahya Gharb (Nord Ouest du Maroc). Les résultats montrent que le calcul des stocks de sols et des besoins des arbres révèle un déficit potentiel en phosphore et en calcium. Par conséquent, il est possible que les rotations suivantes voient des chutes de productivité si rien n'est entrepris pour compenser les déficiences. En effet, La minéralomasse exportée doit être mise en regard du stock de minéraux de sols. Le calcul du prélèvement exprimant le besoin annuel des taillis constitue la meilleure approche pour estimer l'impact de la plantation sur le stock du sol à un instant donné.

Cet élément provient principalement des pratiques agricoles et n'est pas très mobile dans le sol ; il peut également être facilement transporté par ruissellement contribuant ainsi à la pollution de l'environnement en favorisant l'eutrophisation des eaux de surface. Plusieurs études se sont concentrées sur l'impact agricole de ce phénomène (Coale et al., 2002). Le phosphore représente un risque de dégradation de la qualité des sols en cas d'apport excessif, ce qui peut avoir des répercussions sur la qualité des eaux souterraines ou de surface (risque d'eutrophisation). Ainsi l'analyse du sol peut contribuer à une meilleure rationalisation de l'apport de cet élément.

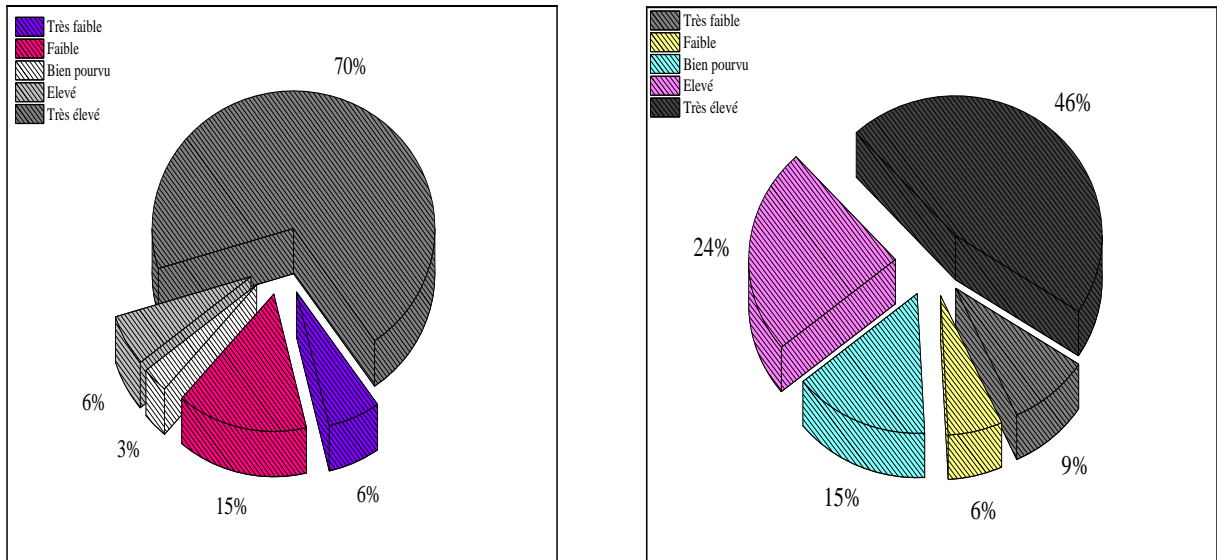
## 8. Potassium échangeable

Le potassium est absorbé par la plante sous sa forme ionique  $K^+$ . Il est essentiel pour la translocation des sucres et pour la formation de l'amidon. Il intervient dans la régulation osmotique et ionique, ainsi que dans le processus d'ouverture et de fermeture des stomates. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates. Sa teneur dépend des propriétés physico-chimiques du sol (Laghrou et al., 2016).

D'après les analyses effectuées au laboratoire, le tableau 33 traduit la répartition des classes de potassium échangeable des différents échantillons analysés pour les deux horizons (0-20cm) et (20-40cm). L'examen des résultats des sols montre que la teneur en potassium échangeable varie dans une gamme allant de 54,23 à 1024,42 ppm avec une moyenne de 346,86 ppm pour l'horizon de surface. Et pour l'horizon de profondeur les teneurs en potassium échangeable varient entre 39,3 et 623,69 ppm avec une moyenne de 282,21 ppm. Il y avait deux sites avec une teneur élevée en potassium (25 avec 903,9 ppm) et une teneur excessivement élevée (31 avec 1024,4 ppm). Ce qui illustre la mauvaise maîtrise de la fertilisation potassique, due entre autre au faible recours aux analyses des sols, ce qui constitue une menace sérieuse pour l'environnement.

**Tableau 36** : Répartition des classes de potassium échangeable ( $K_2O$ ) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines (Delaunois, 2008).

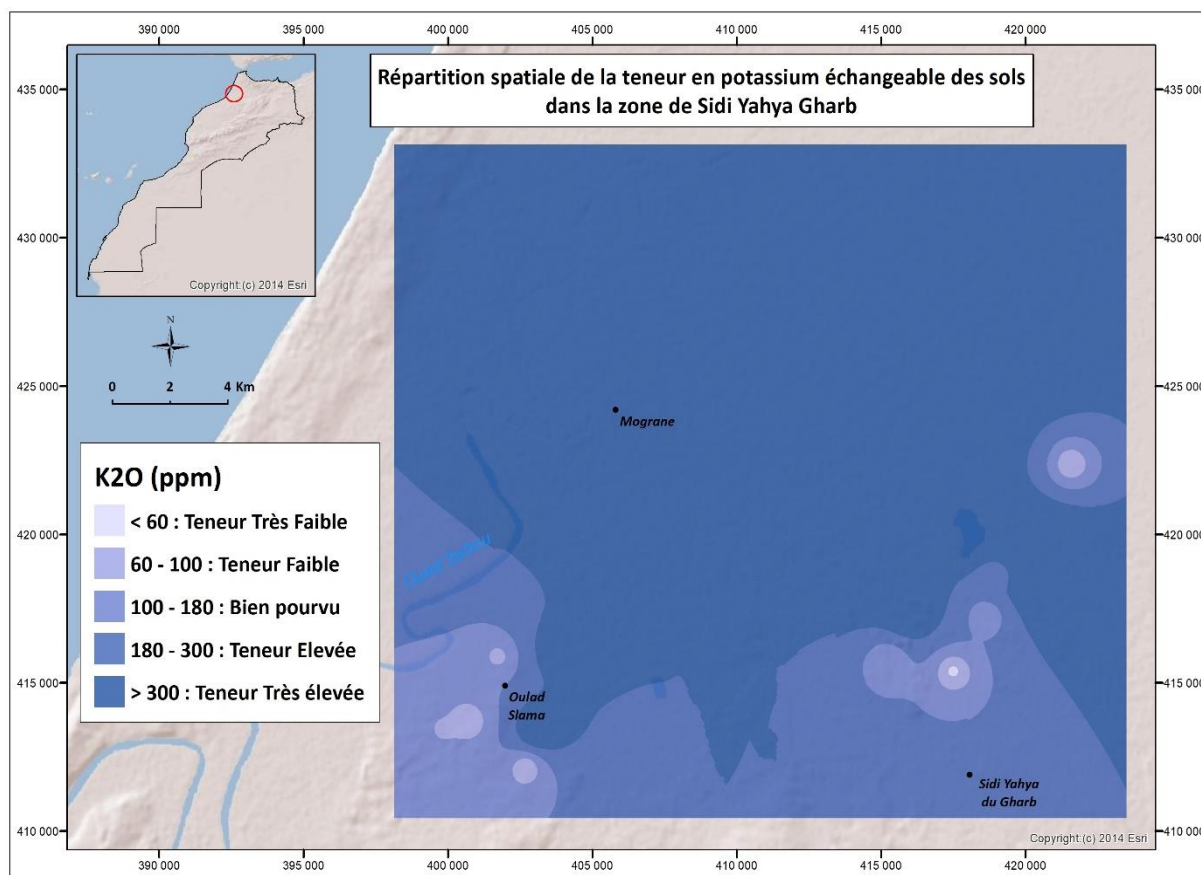
Classe du sol	$K_2O$ (ppm)	%sites 0-20cm	%sites 20-40cm
Très faible	<60	6,06	9,09
Faible	60-100	15,15	6,06
Bien pourvu	100-180	3,03	15,15
Elevé	180-300	6,06	24,24
Très élevé	>300	69,70	45,45



**Figure 36 :** Diagramme des teneurs en potassium échangeable des sols étudiés (0-20cm) et (20-40cm)

Les résultats montrent que près de 70% des échantillons ont une teneur en potassium très élevée pour l'horizon de surface. Et 46% des échantillons ont une teneur en potassium très élevée pour l'horizon de profondeur (Figure 36). Ces niveaux sont expliqués, d'une part par la nature des sols du Gharb caractérisés par des taux élevés d'argile (Tableau 27) et, d'autre part, par un mauvais raisonnement de la fertilisation potassique. L'excès de potassium peut être transformé en sel et ainsi polluer les eaux souterraines par infiltration et percolation, ce qui peut également entraîner une carence en magnésium pour les cultures (Koné et al., 2009).

La répartition spatiale du potassium échangeable sur l'horizon de surface est représentée par la figure 37.



**Figure 37** : Carte d'interpolation spatiale du potassium ( $K_2O$ ) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La carte de répartition spatiale montre que des niveaux élevés de potassium occupent la majeure partie de la zone d'étude (Figure 37). C'est pour cela qu'il paraît nécessaire de faire des analyses de sols pour connaître la richesse du sol et pour fertiliser intelligemment en adaptant des doses d'engrais sans qu'il n'y ait ni manque ni excès en fertilisants.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux trouvés par **Boulmane et al. (2017)**, lorsqu'ils ont évalué la qualité du sols dans la même région de Sidi Yahya (Gharb), ils ont constaté que la fertilité en potassium est moyenne du fait que son stock est compris entre 0,51 et 0,85 t.ha<sup>-1</sup>. Le stock du sol à une profondeur de 60 cm doit être 20 fois supérieur au prélèvement pour les éléments mobiles K, Ca et Mg et 50 fois plus élevé pour le phosphore.

Cette forte teneur en potassium semble bénéfique pour la croissance des plantes mais s'avère désastreuse pour les zones proches des eaux de surface, où elle peut être à l'origine de l'apparition du phénomène d'eutrophisation.

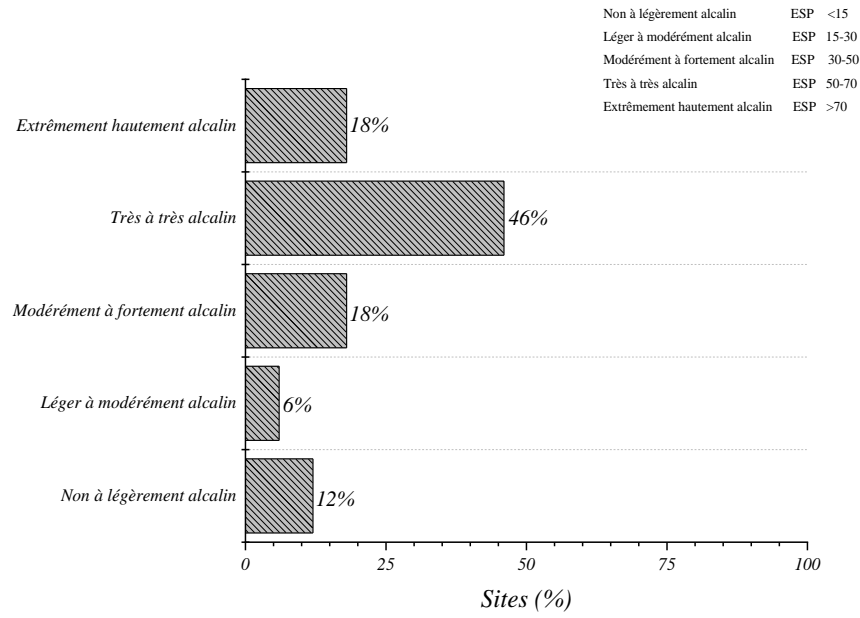
## 9. Alcalinité du sol

L'alcalinité du sol est le résultat de l'accumulation de sels solubles dans le sol, en particulier Na (**Day et Ludeke, 1993**). L'alcalinité du sol est mesurée à partir du pourcentage de sodium échangeable (ESP).

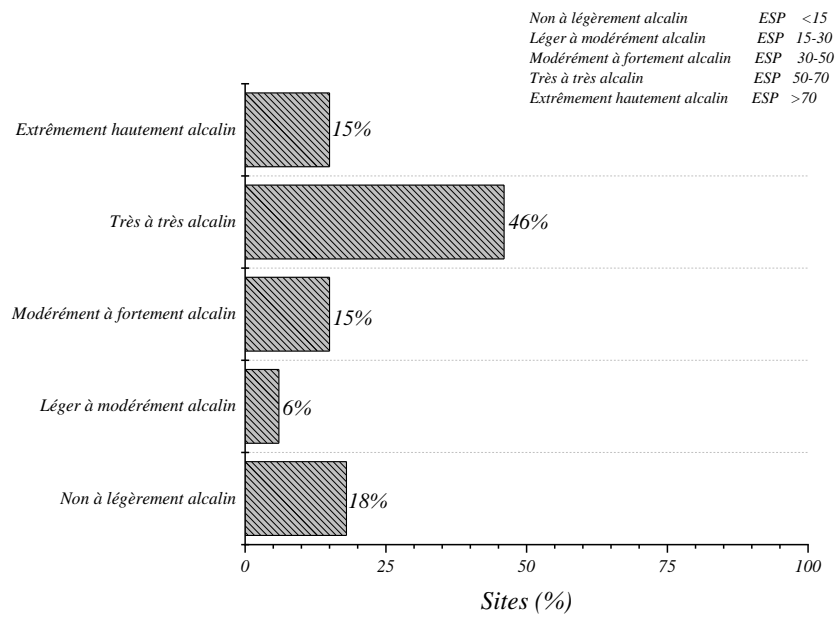
Les valeurs ESP variaient de 5,9 à 92,5, avec une valeur moyenne de 51,4 pour l'horizon de surface. Concernant l'horizon de profondeur ces valeurs variaient de 4,67 à 87,9 avec une valeur moyenne de 48,7. Lorsque l'ESP dépasse 10%, le sol devient sodique et l'excès de sodium échangeable conduit à la détérioration de la structure du sol par un effet dispersant sur les colloïdes du sol conduisant à une diminution du taux d'aération et d'infiltration (**Badraoui et Merzouk, 1994**). La sodicité provient soit de l'apport en sodium de l'eau d'irrigation (SAR élevé: rapport d'adsorption du sodium), soit de la remontée capillaire des eaux souterraines chargées en Na. La répartition des classes d'alcalinité des sols du périmètre de Sidi Yahya Gharb est présentée dans le tableau 34.

**Tableau 34** : Répartition des classes d'alcalinité des sols du périmètre de Sidi Yahya selon les normes (**FAO, 1988**).

Classe d'alcalinité du sol 0-20	ESP	%sites 0-20cm	%sites 20-40cm
Non à légèrement alcalin	<15	12,12	18,18
Léger à modérément alcalin	15-30	6,06	6,06
Modérément à fortement alcalin	30-50	18,18	15,15
Très à très alcalin	50-70	45,45	45,45
Extrêmement hautement alcalin	>70	18,18	15,15

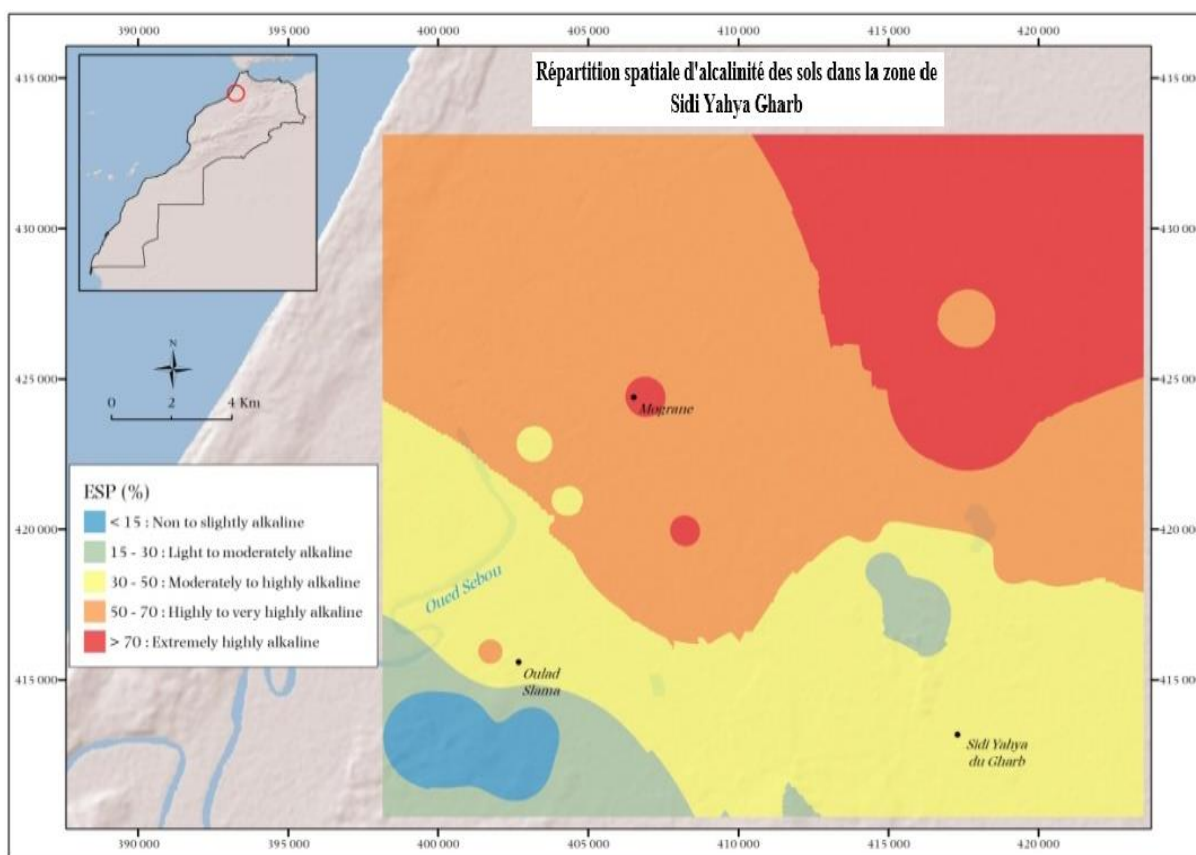


**Figure 38 :** Diagramme d'alcalinité des sols étudiés Horizon (0-20cm).



**Figure 39 :** Diagramme d'alcalinité des sols étudiés Horizon (20-40cm).

La répartition spatiale du pourcentage de sodium échangeable (ESP) sur l'horizon de surface est représentée par la figure 40.



**Figure 40** : Carte d'interpolation spatiale du pourcentage du sodium échangeable (ESP) des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

Les résultats montrent qu'une petite partie des échantillons de sol, 12,1% est non alcaline et seulement 6% peuvent être considérés comme légèrement ou modérément alcalins. D'un autre côté, 63,7% des échantillons de sol sont fortement à extrêmement alcalins pour l'horizon de surface (Figure 38). En ce qui concerne l'horizon de profondeur, 18,18% des sols ne sont pas alcalins et 6,06% sont considérés légèrement ou modérément alcalins, ainsi que 75,76% des échantillons de sol sont fortement à extrêmement alcalins (Figure 39). En outre, il existe une tendance claire à la diminution d'ESP du Nord-Est au Sud-Ouest (Figure 46).

Dans le même contexte une étude de **Zare et al. (2014)**, qui avait pour objectif de déterminer la relation entre le pourcentage de sodium échangeable (ESP) et les taux d'adsorption du sodium (SAR) dans certains sols affectés par sel de la plaine de Marvdasht à Fars en Iran. En effet cette étude a été menée sur 50 échantillons de sol qui ont été prélevés au hasard en deux horizons (0-10

cm) et (10-20 cm), après de différents domaines du site expérimental. Les résultats statistiques de l'étude ont indiqué que pour prédire l'ESP du sol sur la base du SAR, le modèle de régression linéaire  $ESP=0,941+1,119 SAR$  avec  $R^2= 0,806$  peut être recommandé.

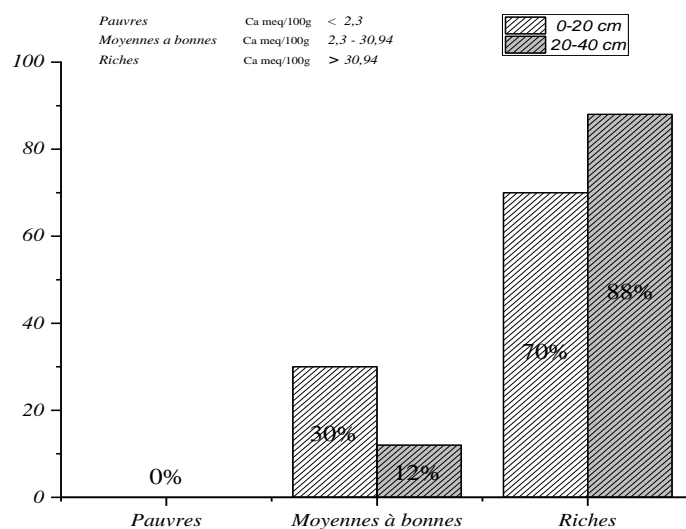
D'une manière générale, la grande partie de la région est fortement à extrêmement alcaline. Ceci peut être expliqué, d'une part, par des CEC faibles comparées au taux de sodium échangeable et d'autre part, par l'utilisation excessive des eaux d'irrigation chargées en sodium.

## 10. Calcium échangeable

Les résultats des analyses de la teneur en calcium des sols étudiés (Tableau 35) montrent que leur teneur varie entre 3,23 et 77,02 méq/100g avec une moyenne de 40,3 méq/100g pour l'horizon (0-20cm). En ce qui concerne l'horizon (20-40cm), la teneur en calcium varie entre 3 et 68,06 méq/100g avec une moyenne de 38,1 méq/100g.

**Tableau 35** : Répartition des classes de calcium échangeable (Ca) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb (Horneck et al., 2011).

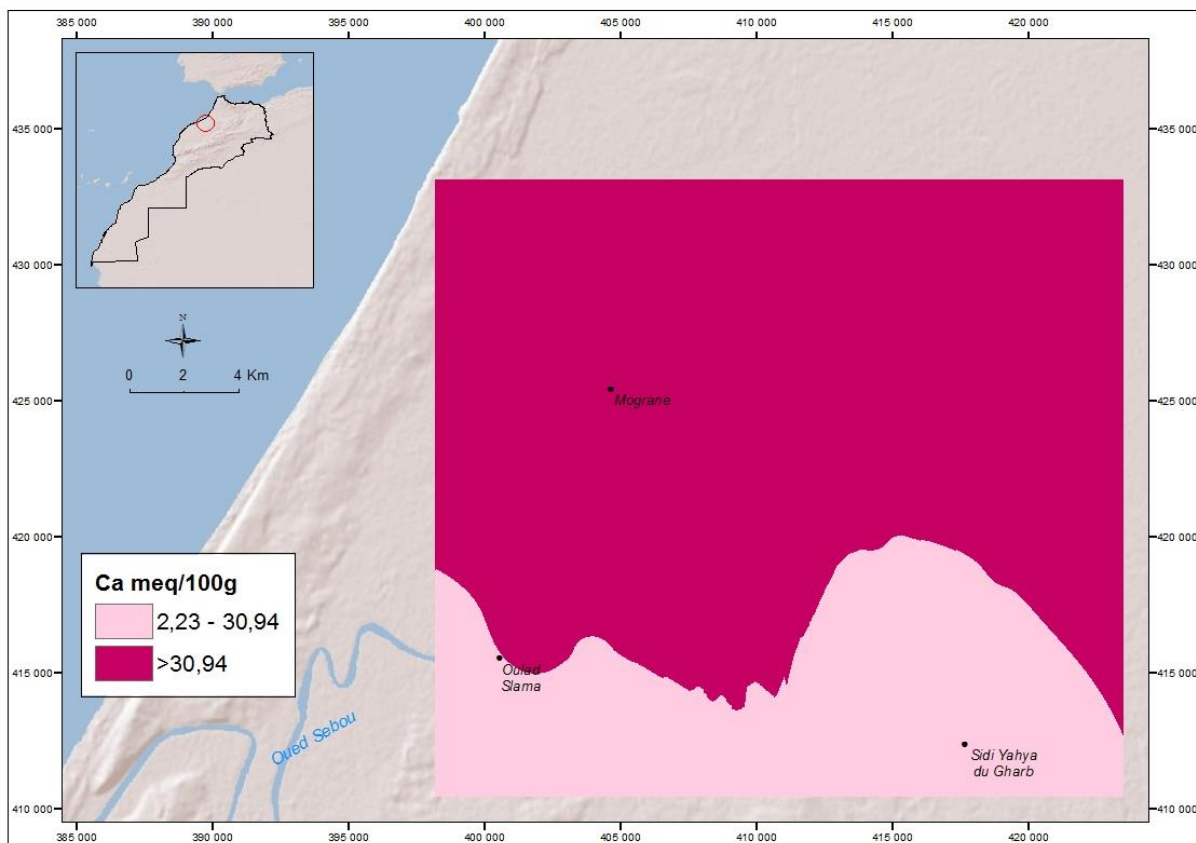
Classe du sol	Ca meq/100g	%sites 0-20cm	%sites 20-40cm
<b>Pauvres</b>	<2,23	0,00	0,00
<b>Moyennes à bonnes</b>	2,23-30,94	30,30	12,12
<b>Riches</b>	>30 ,94	69,70	87,88



**Figure 41** : Diagramme de la teneur en calcium échangeable de sols étudiés (0-20cm) (20-40cm).

En se référant aux normes de (**Horneck et al., 2011**), la plupart des échantillons du sol étudié reflètent une teneur de calcium moyenne à élevée pour les horizons de surface (0-20cm) et de profondeur (20-40cm) (Figure 41), cela peut s'expliquer par la nature des sols du Gharb caractérisés par des taux élevés d'argile. Le calcium participe notamment à la création de ponts entre les argiles et les particules de matière organique tandis que le sodium a un effet dispersant (**Bronick et Lal, 2005**). Cette étude est similaire à celle trouvée par **Boulmane, (2017)** dans la même région de Sidi Yahya Gharb.

La répartition spatiale du calcium sur l'horizon de surface est représentée par la figure 42.



**Figure 42** : Carte d'interpolation spatiale de la teneur du sol en calcium dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

La carte d'interpolation spatiale montre la répartition spatiale de la teneur du sol en calcium. Elle révèle que les niveaux élevés de calcium occupent la majeure partie de la zone d'étude, le Centre et le Nord, alors que la partie du Sud représente des sols moyennement pauvres en calcium.

Des carences en calcium peuvent faire mourir les points végétatifs. Elles peuvent aussi provoquer la chute prématurée des fleurs et des bourgeons. Certaines cultures peuvent souffrir de

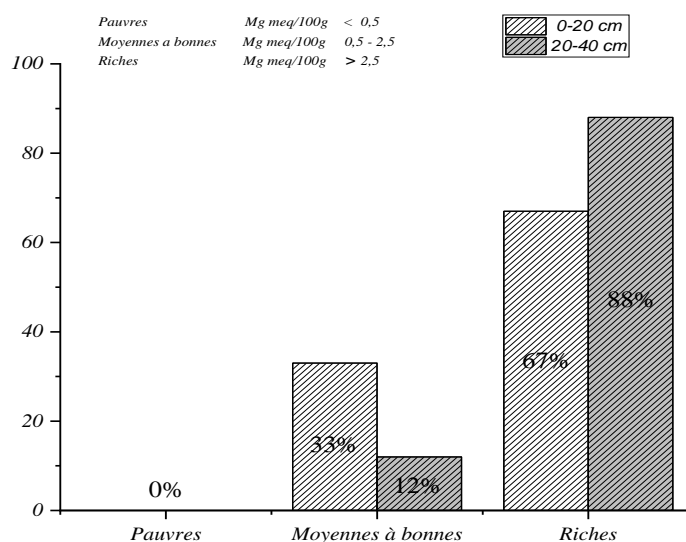
désordres liés au calcium, par exemple, la brûlure de la pointe chez le fraisier, la gommose chez le prunier et les taches amères chez certains cultivars de pommier. Plusieurs pratiques de gestion réduisent l'incidence des désordres liés au calcium. En évitant tout apport excessif d'azote, on contribue à prévenir une croissance végétative excessive et à éviter ainsi une dilution du calcium dans le végétal. De bonnes pratiques de gestion du sol garantissent une bonne croissance racinaire qui, à son tour, favorise une bonne assimilation de l'eau et des éléments nutritifs. Des arrosages effectués au bon moment favorisent la circulation du calcium dans les plants (Page et al., 2008).

## 11. Magnésium échangeable

L'examen des résultats des analyses de la teneur du sol en magnésium (Tableau 36) montre que leur teneur varie dans une large gamme entre 1,5 et 24,75méq/100g avec une moyenne de 10,06méq/100g pour l'horizon (0-20cm) et entre 0,2 et 18,55méq/100g avec une moyenne de 9,66méq/100g pour l'horizon (20-40 cm).

**Tableau 36** : Répartition des classes du magnésium échangeable (Mg) des sols étudiés du périmètre de Sidi Yahya Gharb (Horneck et al. 2011).

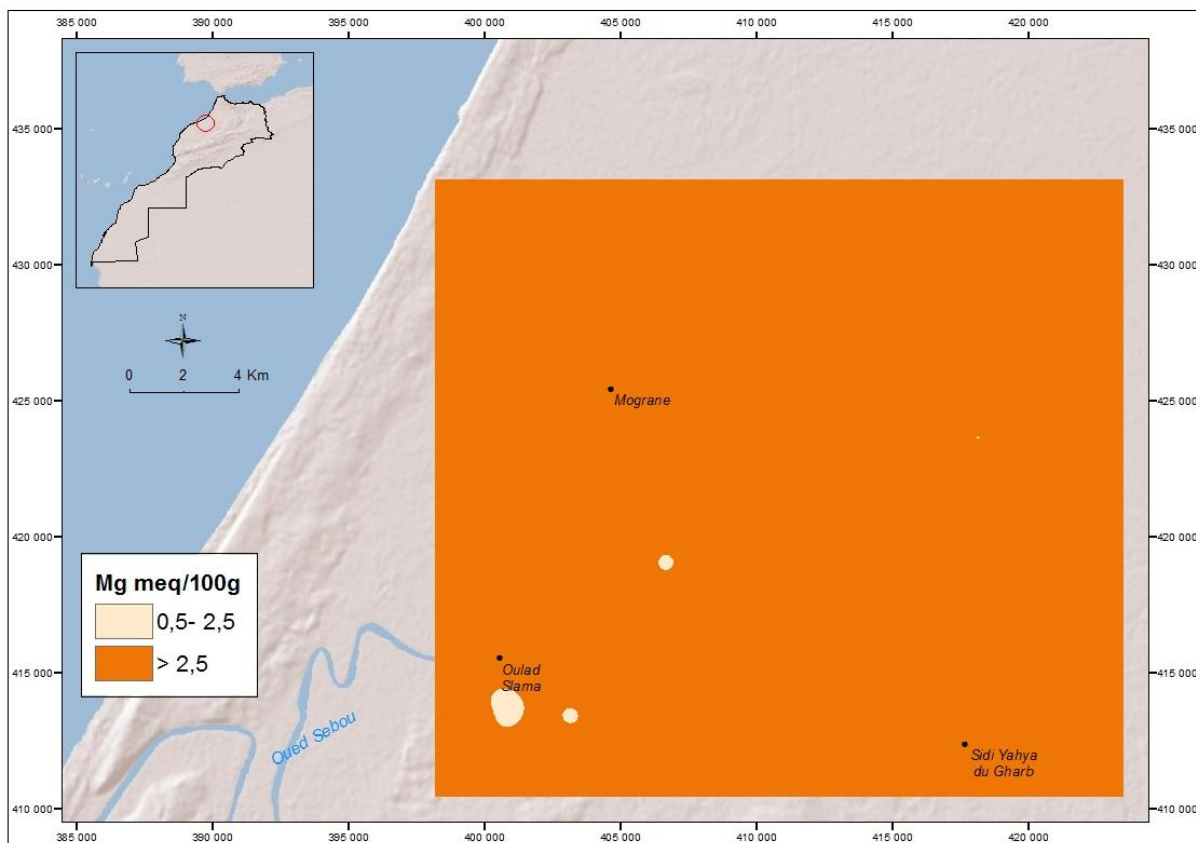
Classe du sol	Mg meq/100g	%sites 0-20cm	%sites 20-40cm
<b>Pauvres</b>	<0,5	0,00	0,00
<b>Moyennes à bonnes</b>	0,5-2,5	33,33	12,12
<b>Riches</b>	>2,5	66,67	87,88



**Figure 43** : Diagramme de la teneur en magnésium échangeable de sols étudiés (0-20cm) (20-40cm)

En se référant aux normes d'interprétation de **Horneck et al. (2011)**, nous avons trouvé que 67% des sols sont riches en magnésium et 33% des sols ont une teneur moyenne en Magnésium pour l'horizon de surface. Concernant l'horizon de profondeur 88% des sols sont riches en magnésium alors que 12% des sols ont une teneur moyenne (Figure 43). Ce résultat a été confirmé par **Boulmane et al. (2017)**, lorsqu'ils ont évalué la qualité du sol dans la même région de Sidi Yahia Gharb.

La répartition spatiale des teneurs en Mg sur l'horizon de surface est représentée par la figure 44.



**Figure 44** : Carte d'interpolation spatiale du pourcentage du magnésium des sols dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La carte de répartition spatiale montre que la richesse en magnésium occupe la majeure partie de la zone d'étude (Figure 44). Le magnésium du sol est très sensible au lessivage. L'intensité du lessivage dépend du drainage de l'eau et de la teneur en calcium et magnésium du sol; elle peut être augmentée par une couverture végétale insuffisante (sauf lorsque la perméabilité du sol diminue) et des engrais chimiques, principalement des engrais azotés (**Bolou-Bi et al., 2012**).

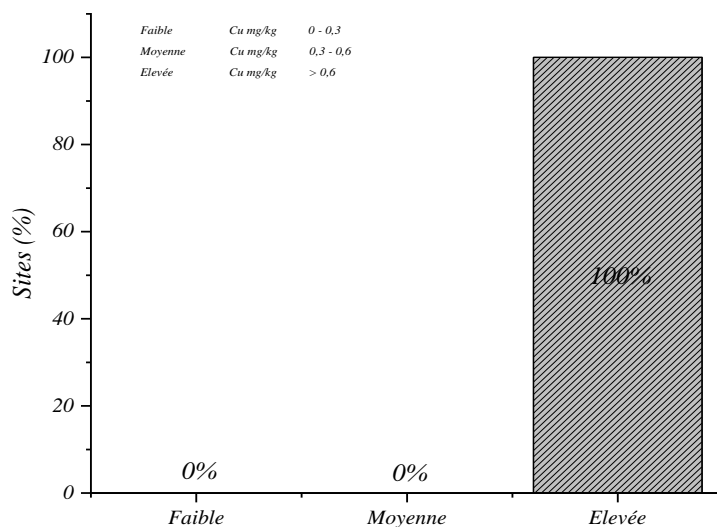
Comme le magnésium est mobile à l'intérieur des végétaux et se diffuse vers les tissus en croissance, les carences en magnésium se manifestent habituellement d'abord sur les feuilles les plus vieilles, puis par translocation sur les plus jeunes feuilles. Les tissus des feuilles entre les nervures jaunissent, tandis que les nervures restent vertes. Les carences graves provoquent l'enroulement du pourtour des feuilles. Chez les pommiers, une carence en magnésium peut causer une chute prématurée des fruits, surtout s'il s'agit de McIntosh. Une application foliaire permet de corriger une carence en magnésium dans l'année de l'application seulement, ce qui oblige à la doubler d'une application au sol pour corriger le problème à plus long terme (Schmitt et al., 2012).

## 12. Oligoéléments des sols

### 12.1. Cuivre

Les sols agricoles sont enrichis en cuivre par l'utilisation abusive de certains fertilisants et des produits agrochimiques tels que les insecticides, les fongicides, les algicides qui sont à la base de sels de cuivre, notamment les sulfates de cuivre ou autres fertilisants (ISO11047, 1998; Li et al., 2008).

Les résultats d'analyse oligominérale des sols ont montré que les teneurs en cuivre assimilable oscillent entre 0,64 ppm et 4,64 ppm avec une moyenne 1,8 ppm.



**Figure 45** : Diagramme des teneurs en cuivre assimilable des sols étudiés.

Les teneurs en cuivre dans les sols de la région de Sidi Yahya sont moins importantes (Figure 45), toutes les valeurs sont en dessous du seuil (100 mg/kg) proposé par le Conseil Canadien pour la Protection de l'Environnement et le Conseil de l'Union Européenne (directive 86/278/EEC) (CCME, 2007 ; **The Council of the European Union, 2013**).

Au niveau de la région de Sidi Yahya, sur l'ensemble des sites échantillonnés, les teneurs moyennes en cuivre sont de 1,80 mg/Kg, mais les concentrations de cuivre dans l'alimentation des animaux ou dans le sol doivent être maintenues à un certain niveau pour permettre un développement et une reproduction normale des organismes.

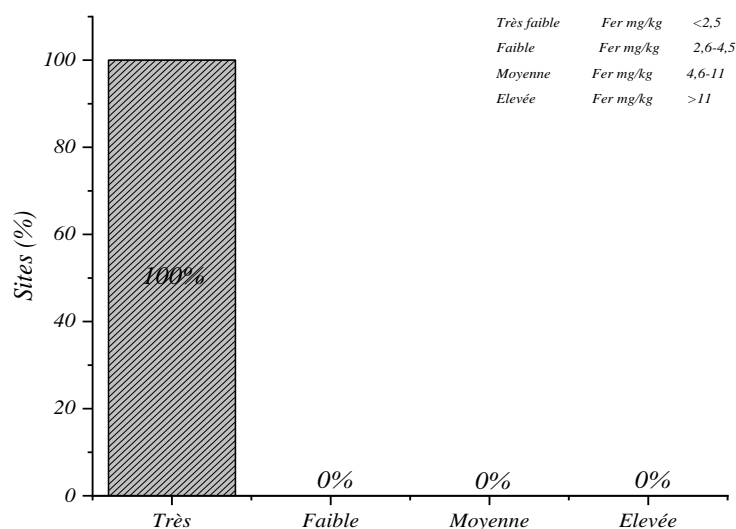
Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par **Zaakour et al. (2020)**, dans une étude de la qualité environnementale des sols sous blé et vigne dans la région de Mohammadia Benslimane (Maroc), ils ont trouvé que le sol sous la vigne présente des niveaux de Cu élevés ou très élevés par rapport à l'autre sous le blé. Les concentrations maximales de Cu ont été enregistrées dans les sols d'Ouled Taleb (66,70 ppm). La différence de concentrations de cuivre entre les stations est très significative. Le cuivre peut provoquer une phytotoxicité dans les sols plantés de vigne qui ont été traités avec du sel de cuivre, qui a été utilisé comme fongicide pendant de nombreuses années.

De ce fait l'apport raisonné du cuivre dans la fertilisation des cultures dans la région de Sidi Yahia est vivement recommandé. En outre l'adsorption du cuivre dans le sol dépendrait fortement du pH du milieu. En effet, une diminution du pH entraîne une réduction de la quantité de cuivre fixé et ensuite sa libération pour le lessivage vers la profondeur ou par ruissellement (**Chopin et al., 2008 ; Arai, 2011**).

## **12.2. Fer**

Le fer est très abondant dans la croûte terrestre, et fait partie des constituants du sol sous formes d'oxydes. D'ailleurs, il est difficile d'estimer les valeurs guides dans les milieux naturels. En plus de cette forme d'oxyde (fer), tous ces oxydes font partie des facteurs essentiels conditionnant la mobilité des contaminants métalliques et organiques dans le sol (**Carrillo-Gonzalez et al., 2006**).

D'après les analyses, les teneurs des sols étudiés varient de 0,34 ppm à 0,62 ppm, avec une moyenne de 0,50ppm.



**Figure 46** : Diagramme des teneurs en fer assimilable des sols étudiés.

Au niveau de la région de Sidi Yahya, sur l'ensemble des sites échantillonnés, la teneur moyenne en fer est de 0,5 mg/Kg (Figure 46). La fraction assimilable du fer est souvent sujette aux effets d'autres paramètres du sol qui peuvent réduire ou augmenter sa disponibilité pour les plantes. En effet, le fer est négativement influencé par la hausse du pH.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par **Zaakour et al. (2020)** dans la région de Mohammadia Benslimane, ils ont constaté que les concentrations de Fe dans les sols qui sont comparables entre les sols sous vignes et sous blé à Mansouria, Bouznika, Cherrat, Ouled Taleb et Skhairate. Ces teneurs sont très faibles par rapport aux teneurs moyennes maximales recommandées par l'OMS (0,01 -50g/kg). Ces valeurs ont permis de détecter une carence en fer dans ces sols.

Une carence en fer peut être induite lorsque la valeur du pH du sol est élevée, lors d'une mauvaise aération, ou lorsqu'il y a des niveaux élevés de zinc (**Rengel et Romheld, 2000**). Les cultures céréalières sont considérées par plusieurs auteurs comme assez insensibles à la carence en fer (**Kalayci et al., 1999**). En revanche, la vigne est plus sensible, la chlorose ferrique affecte principalement les jeunes plantations de deux à trois ans.

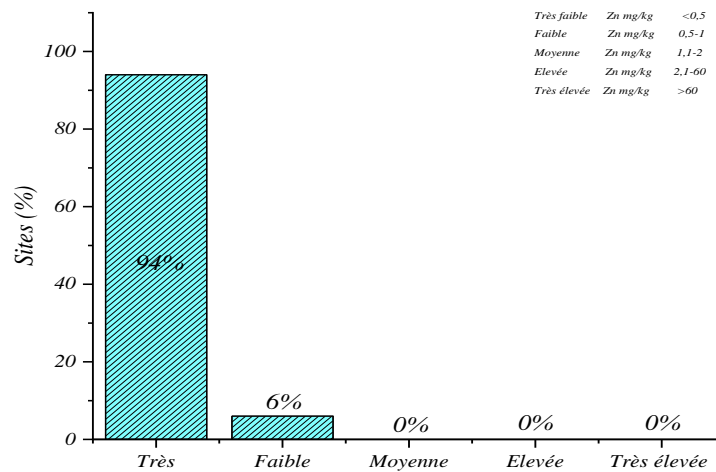
En général, la majorité des sols de la région est moyennement basique. En effet, le sol alcalin peut entraîner une solubilisation incomplète de certains éléments comme le fer et le manganèse et

entraîner, par exemple, une chlorose ferrique. Pour réduire le pH des sols, il faut apporter un acidifiant à base de soufre pour neutraliser les sols calcaires sous forme d'amendement.

### 12.3. Zinc

Le zinc est un des éléments les plus courants dans la croûte terrestre, il est présent de façon naturelle dans l'air, l'eau et le sol. Le zinc est considéré comme facilement soluble par rapport aux autres éléments traces métalliques dans les sols, il est très mobile et disponible dans les sols légers et acides (**Magnani et al., 2018**).

La moyenne des teneurs en zinc enregistrées dans les sols du périmètre est de 0,16 ppm avec un maximum de 0,54 ppm et un minimum de 0,31 ppm.



**Figure 47** : Diagramme des teneurs en zinc assimilable des sols étudiés.

Les minima et maxima de zinc dans les sols du milieu agricole dans la région de Sidi Yahya sont rangés entre 0,16 – 0,54 mg/kg (figure 47). En effet, les teneurs en zinc, sont d'une part inférieure aux teneurs naturelles dans la croûte terrestre (70 – 120 mg/kg), selon **Baize (1997)** et nettement inférieures à la valeur guide (200 mg/kg) du conseil canadien pour la protection de l'environnement et celle du conseil de l'Union Européenne (300 mg/kg) (**CCME, 2007 ; Commission de l'Union Européenne, 1998**).

Dans le même contexte une étude d'**EL Khodrani et al. (2019)**, sur la distribution spatiale et cartographie des métaux lourds dans les sols agricoles de la région de Sfafa (Gharb, Maroc).

Les résultats montrent que les minima et maxima de zinc dans les sols du milieu agricoles dans la région de Sfafaâ sont rangés entre 35,60 – 89,81 mg/kg.

L'apport de zinc dans les sols agricoles de la région peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais qui le plus souvent renferment le zinc (Hao et al., 2016). Le zinc métal en soit ne présente pas de toxicité particulière. Les effets toxiques observés sont surtout le fait d'oxyde ou de chlorure de zinc utilisés dans l'industrie (fièvre des fondeurs) (Antoniadis et al., 2017).

Chez l'homme on observe une toxicité aiguë par le Zn, mais à très forte concentration, se manifestant par des nausées, des vomissements, une rigidité musculaire et une irritation des muqueuses ; alors qu'il occasionne dans l'eau une très forte astringence dès 5mg/l. Les sels de zinc sont nocifs pour l'homme s'ils sont administrés par voie orale. Mais en faible dose, le danger d'intoxication est inexistant (Azimi et al., 2004).

#### 12.4. Manganèse

Le manganèse est moyennement mobile dans les sols, sa mobilité diminue avec l'alcalinité du sol. L'activité microbienne du sol peut aussi altérer l'état d'oxydation du manganèse et modifier ainsi sa mobilité (Navas et Lindhorfer, 2005). L'oxydation du manganèse par les micro-organismes (bactéries, champignons) joue également un rôle non négligeable dans les cycles biogéochimiques d'autres éléments, dont le fer, l'azote, le carbone (Campos et al., 2016).

Les sols du périmètre de Sidi Yahya présentent des teneurs de manganèse assimilable qui varient entre 0,94 ppm et 9,26ppm avec une moyenne de 5,1ppm.

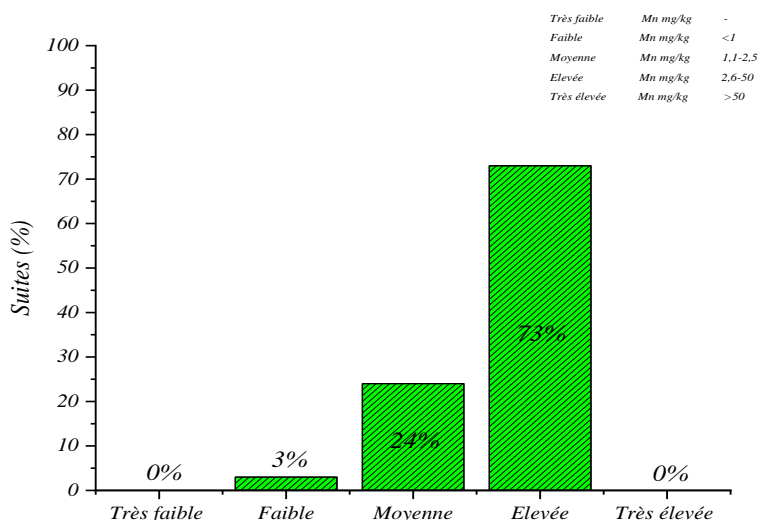


Figure 48 : Diagramme des teneurs en manganèse assimilable des sols étudiés.

L'évaluation de la richesse en manganèse des sols étudiés a montré que 73% des sols présentent des teneurs élevées en manganèse dont 24% ont des teneurs adéquates (moyenne à élevée). Toutefois 3% des sols ont des teneurs faibles en manganèse assimilable (Figure 48).

La concentration du manganèse dépend essentiellement des caractéristiques géothermiques mais aussi de la transformation des composés du manganèse dans le milieu ambiant, de l'activité des micro-organismes présents dans le sol et de la fixation du manganèse par les plantes (**Qiang et al., 2011**).

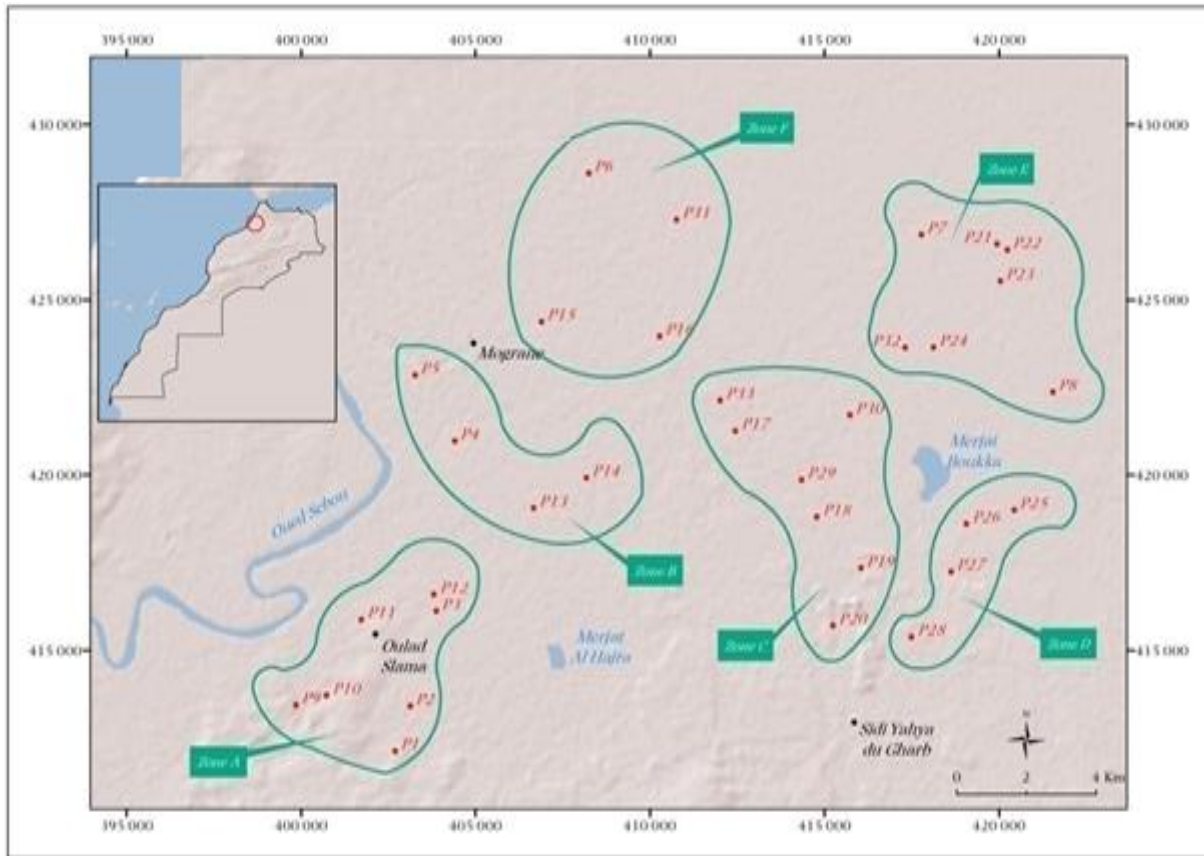
Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par **Maher et al. (2020)**, lorsqu'ils ont étudié l'effet du semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols de la région d'El Koudia, Rabat (Maroc). Ils ont trouvé que l'élément le plus variable est Mn avec un coefficient de variation de 136,4%, avec une valeur moyenne de 3,98 et des valeurs comprises entre 0,59 et 15,05 ppm.

Les substances organiques associées à un pH élevé peuvent produire des complexes organiques de manganèse divalent, d'où un manque de manganèse disponible pour des plantes sensibles telles que les pois ou les céréales. Le vieillissement des oxydes de manganèse diminue leur disponibilité (**Liu et al., 2014**). Le manganèse peut devenir toxique dans des végétaux poussant sur des sols renfermant plus de 1000 mg/kg de poids sec; cela arrive en général dans des sols très acides et l'on peut habituellement y remédier par chaulage (**Hui et al., 2014**). On notera que la teneur totale du sol en manganèse n'a que peu d'importance sur le plan biologique, puisque seule une petite quantité est présente sous forme disponible.

## **13. Etudes statistiques**

### **13.1. Analyse de variance (ANOVA)**

Nous avons prospecté 33 échantillons répartis en 6 zones : A, B, C, D, E et F (Figure 46). Les résultats des différents paramètres physico-chimiques des analyses des sols sont présentés dans le tableau 37. Dans ce tableau, nous avons exprimé les teneurs en moyennes  $\pm$  écarts-types.



**Figure 46** : Présentation des 6 zones d'étude

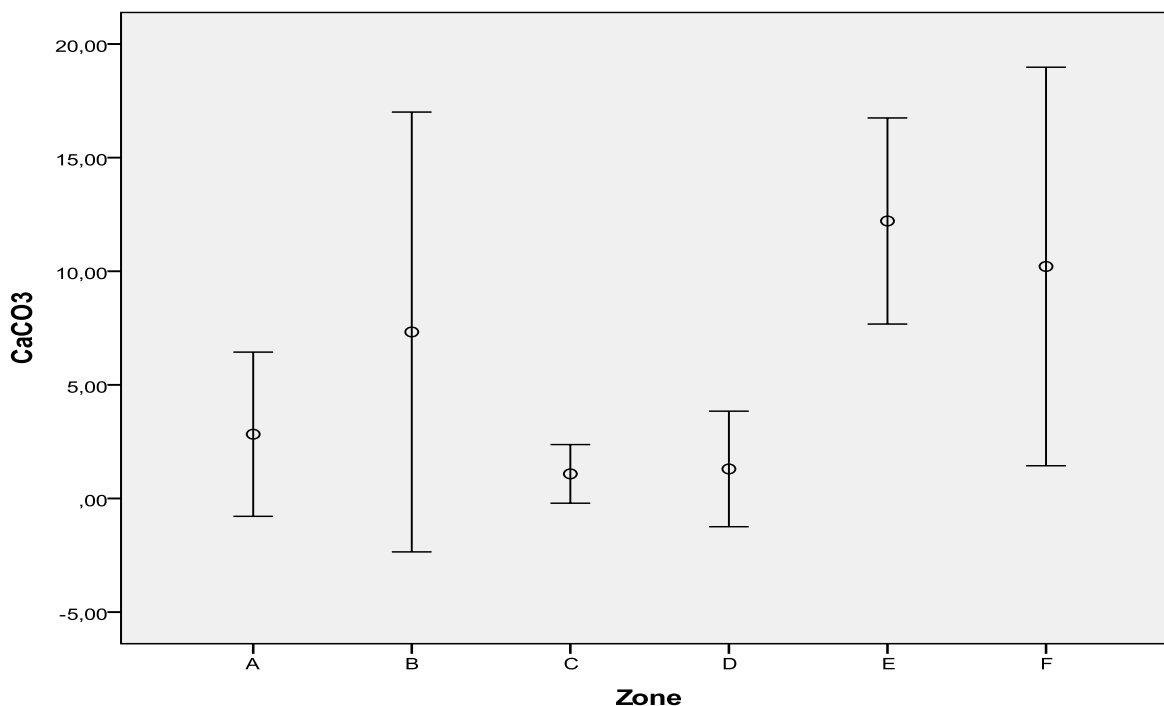
Il n'y a pas de différences significatives entre les six zones concernant CE,  $P_2O_5$  et  $K_2O$ , ces paramètres ne seront plus discutés alors que les paramètres pour lesquels des différences significatives ont été trouvées seront présentés en détail ci-dessous ; rappelant que la différence est considérée comme statistiquement significative quand la valeur p est inférieure au seuil de signification de 0.05.

**Tableau 37** : Moyennes  $\pm$  écarts-types et résultats de l'ANOVA pour les paramètres physiques et chimiques du sol pour les 6 zones.

Paramètres	Zones						Signification	
	A	B	C	D	E	F	Valeur F	Valeur p
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	2,8 $\pm$ 3,9	7,3 $\pm$ 6,1	1,1 $\pm$ 1,4	1,3 $\pm$ 1,6	12,2 $\pm$ 4,9	10,2 $\pm$ 5,5	7,95	<0,001
<b>pH</b>	7,8 $\pm$ 0,3	8,3 $\pm$ 0,3	8,0 $\pm$ 0,4	6,9 $\pm$ 0,8	8,3 $\pm$ 0,1	8,1 $\pm$ 0,2	7,75	<0,001
<b>CE (dS/m)</b>	1,1 $\pm$ 1,5	1,178 $\pm$ 2,7	0,9 $\pm$ 0,7	1,2 $\pm$ 1,3	1,2 $\pm$ 0,9	0,7 $\pm$ 0,2	0,32	0,90
<b>MO (%)</b>	1,8 $\pm$ 1,0	3,1 $\pm$ 1,0	3,0 $\pm$ 1,0	2,3 $\pm$ 0,8	2,8 $\pm$ 0,7	4,0 $\pm$ 0,8	3,59	0,01
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ppm)</b>	59,3 $\pm$ 30,7	19,6 $\pm$ 16,9	70,3 $\pm$ 60,0	29,9 $\pm$ 29,6	28,1 $\pm$ 51,1	32,8 $\pm$ 22,0	1,34	0,28
<b>K<sub>2</sub>O (ppm)</b>	211,3 $\pm$ 172,4	360,8 $\pm$ 17,8	345,0 $\pm$ 139,3	330,7 $\pm$ 390,8	351,7 $\pm$ 133,0	576,2 $\pm$ 305,3	1,61	0,19
<b>ESP (%)</b>	24,9 $\pm$ 21,7	58,3 $\pm$ 11,3	46,0 $\pm$ 23,4	42,2 $\pm$ 13,0	74,2 $\pm$ 12,9	70,0 $\pm$ 16,9	6,50	<0,001

### ❖ Calcaire total

Le résultat de l'ANOVA a montré qu'il y avait une différence très hautement significative entre les six zones concernant leurs teneurs moyennes en calcaire (valeur  $F = 7,95$  et valeur  $p = <0,001$ ) (Figure 50).



**Figure 50** : Répartition des moyennes de CaCO<sub>3</sub> en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Par la suite nous avons effectué une comparaison de moyenne par le test de Duncan (**Duncan, 1955**), qui a révélé l'existence de trois groupes (Tableau 38) :

- Le premier groupe contient les zones A, C et D avec les plus faibles teneurs en CaCO<sub>3</sub>.
- Le deuxième groupe contient les zones A et B avec des teneurs moyennes.
- Le troisième groupe correspond aux zones B, E et F avec les teneurs les plus élevées.

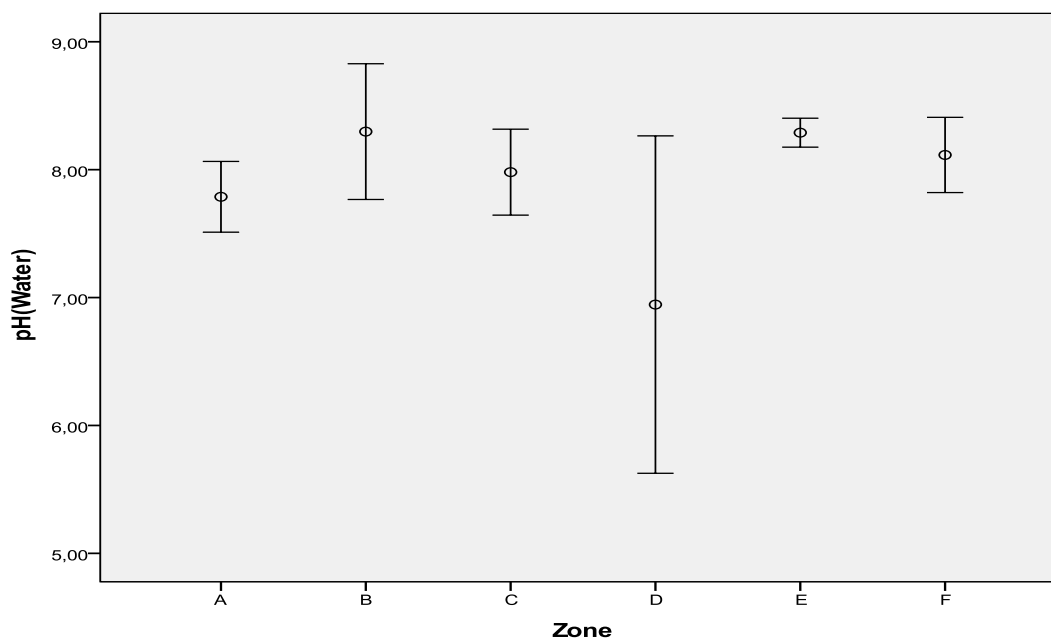
**Tableau 38** : Résultats de comparaison de moyennes de CaCO<sub>3</sub> en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
<b>C</b>	7	1,08		
<b>D</b>	4	1,30		
<b>A</b>	7	2,83	2,83	
<b>B</b>	4		7,33	7,33
<b>F</b>	4			10,21
<b>E</b>	7			12,21
<b>Signification</b>		0,529	0,092	0,083

Les sols des zones B, E et F sont modérément calcaires avec respectivement 7,3, 10,2 et 12,29% alors que les zones A, C et D sont moins calcaires (respectivement 1,1, 1,3 et 2,8%) (Tableau 38).

❖ **pH du sol**

D'après les résultats de l'ANOVA (Tableau 37 et Figure 51), les valeurs moyennes de pH diffèrent significativement entre les six zones (valeur F = 7,75 et valeur p < 0,001).



**Figure 51** : Répartition du pH des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Le test de Duncan a indiqué la présence de deux groupes distincts de zones (Tableau 39): la zone D seule avec une valeur moyenne de pH de 6,9 alors que toutes les autres zones forment

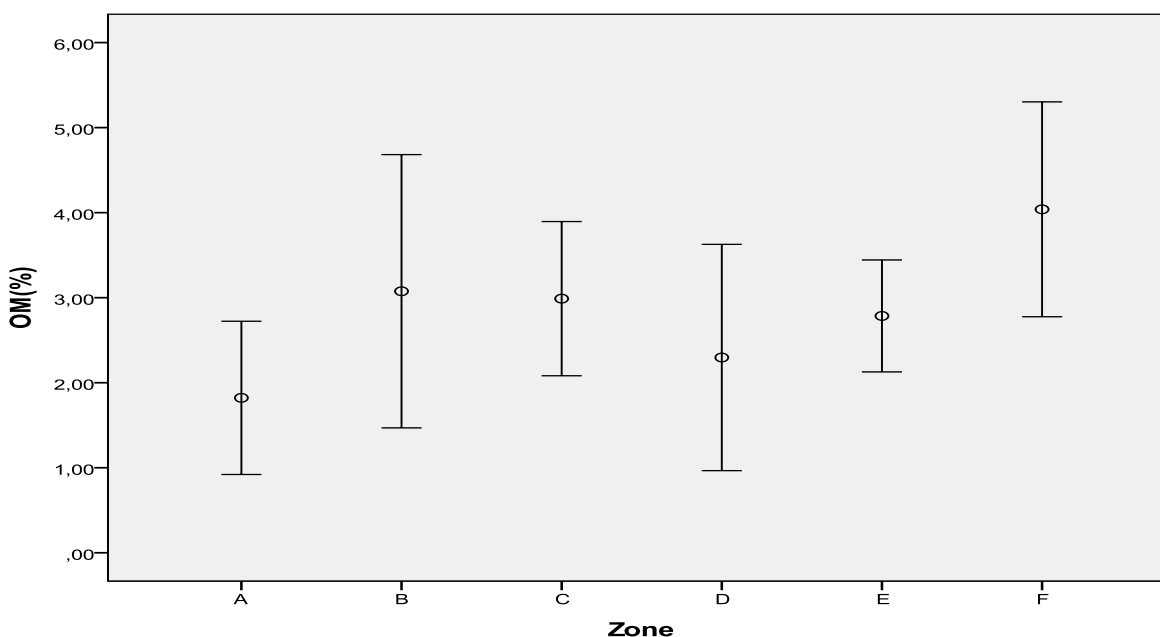
ensemble un groupe homogène avec des valeurs moyennes de pH allant de 7,8 (zone A) à 8,3 (zone B).

**Tableau 39** : Résultats de comparaison de moyennes de pH du sol en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
D	4	6,95	
A	7		7,79
C	7		7,98
F	4		8,12
E	7		8,29
B	4		8,30
Signification		1,000	0,065

#### ❖ Matière organique

D'après les résultats de l'ANOVA (Tableau 37), il est clair que les six zones ont des niveaux de MO significativement différents (valeur F = 3,59 et valeur p = 0,01). La zone F a, de loin, les sols les plus riches en MO (Figure 52) avec une valeur moyenne de  $4,0 \pm 0,8\%$ , suivie des zones B, C et E avec  $3,1 \pm 1,0$ ,  $3,0 \pm 1,1$  et  $2,8 \pm 0,7\%$ , respectivement.



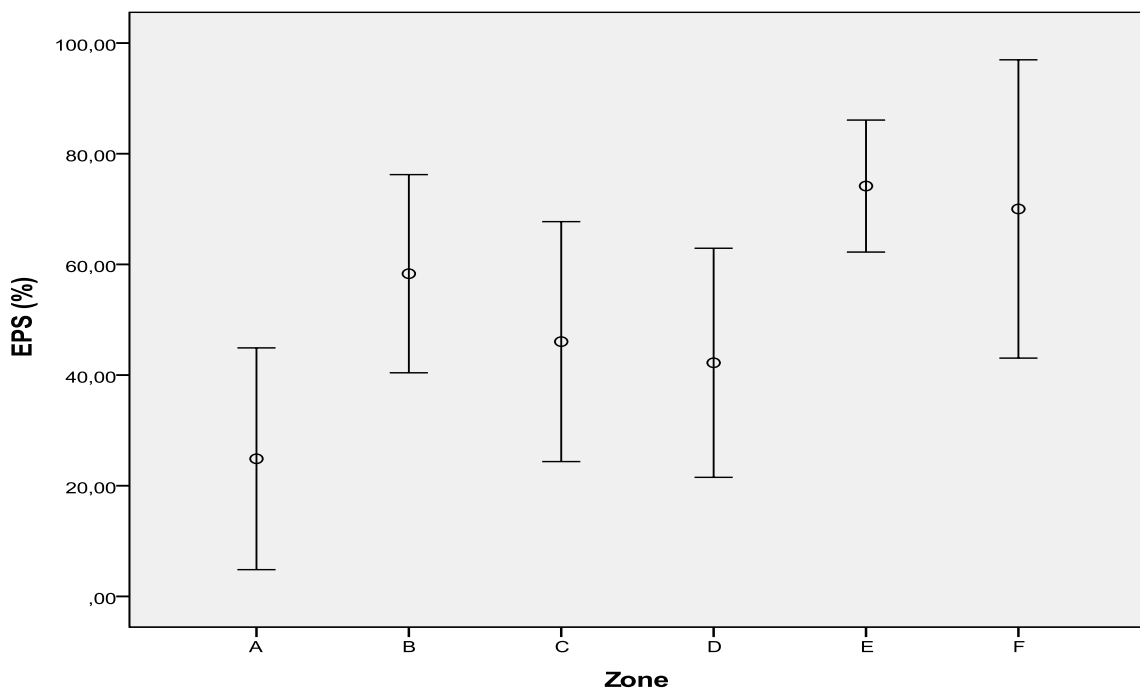
**Figure 52** : Répartition de la MO des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Le test de Duncan a montré que trois groupes de zones peuvent être identifiées sur la base de la teneur moyenne en MO :

- Le premier groupe contient les zones A, D et E avec les teneurs les plus faibles (1,8 à 2,8%).
- Le deuxième groupe comprend uniquement la zone F avec la teneur la plus élevée (4,0%).
- Le troisième groupe comprend les zones B et C avec des teneurs intermédiaires (3,0 et 3,1%).

#### ❖ Alcalinité

Les six zones étaient significativement différentes en ce qui concerne ESP (valeur  $F = 6,50$  et valeur  $p = <0,001$ ) (Tableau 37). En fait, 12,1% des échantillons de sol ne sont pas alcalins et appartiennent à la zone A, seulement 6% peuvent être considérés légèrement ou modérément alcalins et viennent des zones B, C et D tandis que 63,7% des échantillons de sol sont fortement alcalins et sont situés dans les zones E et F (Figure 53).



**Figure 53** : Répartition de l'ESP des sols en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Après nous avons effectué une comparaison de moyenne par le test Duncan qui a révélé l'existence de quatre groupes qui ne sont pas très distincts (Tableau 40) :

- Le premier groupe contient les zones A, D, et C avec les niveaux les plus faibles de l'ESP.
- Le deuxième groupe comprend les zones B, C et D avec des niveaux moyens.

- Le troisième groupe contient les zones B, C et F avec des niveaux intermédiaires.
- Le quatrième groupe correspond aux zones B, E et F avec les niveaux les plus élevés.

**Tableau 40** : Résultats de comparaison de moyennes de l'ESP en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
		1	2	3	4
A	7	24,87			
D	4	42,21	42,21		
C	7	46,04	46,04	46,04	
B	4		58,31	58,31	58,31
F	4			70,01	70,01
E	7				74,16
<b>Signification</b>		0,088	0,191	0,055	0,198

### 13.2. Analyse en composantes principales (ACP)

La méthode statistique multivariée d'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur la base de la matrice de corrélation de Pearson entre les différentes paires de propriétés du sol et en utilisant la rotation varimax (Khlosi et al., 2013; Moutassem et al., 2019; Aboutayeb et al., 2020).

#### ❖ Matrice de corrélations

La matrice des coefficients de corrélation entre les différentes paires de propriétés physico-chimiques du sol est présentée dans le tableau 41. Il existe de nombreux coefficients de corrélation hautement significatifs (valeur  $p < 0,01$ ).

Les plus élevés sont entre les éléments de texture du sol (-0,99 entre le sable et l'argile, -0,94 entre le sable et le limon et 0,89 entre l'argile et le limon). L'ESP a également un coefficient de corrélation très élevé avec la texture du sol (négative avec le sable et positive avec l'argile et le limon). En outre, l'OM a un coefficient de corrélation relativement élevé avec la texture du sol et l'ESP.

D'autres corrélations intéressantes sont entre  $K_2O$  et ESP, limon et MO, pH et argile et sable et finalement  $P_2O_5$  et ESP. En outre, il y avait également quelques coefficients de corrélation significatifs (valeur  $p < 0,05$ ) tels que  $K_2O$  / sable (-0,43), pH /  $K_2O$ , pH / ESP,  $P_2O_5$  / sable, et  $K_2O$  / argile (0,39),  $P_2O_5$  / argile (-0,39), pH / limon (0,37) et  $P_2O_5$  / limon (-0,35).

**Tableau 41** : Matrice de corrélation pour les propriétés du sol.

	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>MO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>ESP</b>	<b>Argile</b>	<b>Limon</b>	<b>Sable</b>
<b>pH</b>	1								
<b>CE</b>	-0,02	1							
<b>MO</b>	0,19	0,02	1						
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-0,14	-0,05	-0,18	1					
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,39*	0,07	0,48**	-0,14	1				
<b>ESP</b>	0,39*	0,08	0,68**	-0,44**	0,44**	1			
<b>Argile</b>	0,46**	0,12	0,60**	-0,39*	0,39*	0,81**	1		
<b>Limon</b>	0,37*	0,16	0,69**	-0,35*	0,47**	0,80**	0,89**	1	
<b>Sable</b>	-0,44**	-0,13	-0,64**	0,39*	-0,43*	-0,83**	-0,99**	-0,94**	1

\*\* : Les coefficients de corrélation sont significatifs au niveau de 0,01

\* : Les coefficients de corrélation sont significatifs au niveau de 0,05

Tous les autres coefficients de corrélation n'étaient pas significatifs (valeur  $p > 0,05$ ). En particulier, la CE n'est corrélée à aucune des autres propriétés du sol. Cela apparaîtra clairement dans les résultats de l'ACP comme une composante principale distincte.

Sur la base du critère de Kaiser (valeur propre  $> 1$ ), seules deux composantes principales doivent être conservées (Tableau 42). L'information extraite s'élèverait à 65,6%, ce qui n'est pas suffisant. Si l'on considère également la troisième composante principale, dont la valeur propre est proche de 1 (0,9), l'information totale extraite passe à 76,1%, ce qui semble suffisant.

**Tableau 42** : Valeurs propres, variances, et variances cumulées des composantes principales.

Composante principale (PC)			
	Valeurs propres	% Variance	% Variance cumulées
1	4,9	54,0	54,0
2	1,0	11,5	65,6
3	0,9	10,5	76,1
4	0,8	9,3	85,4
5	0,7	7,6	92,9

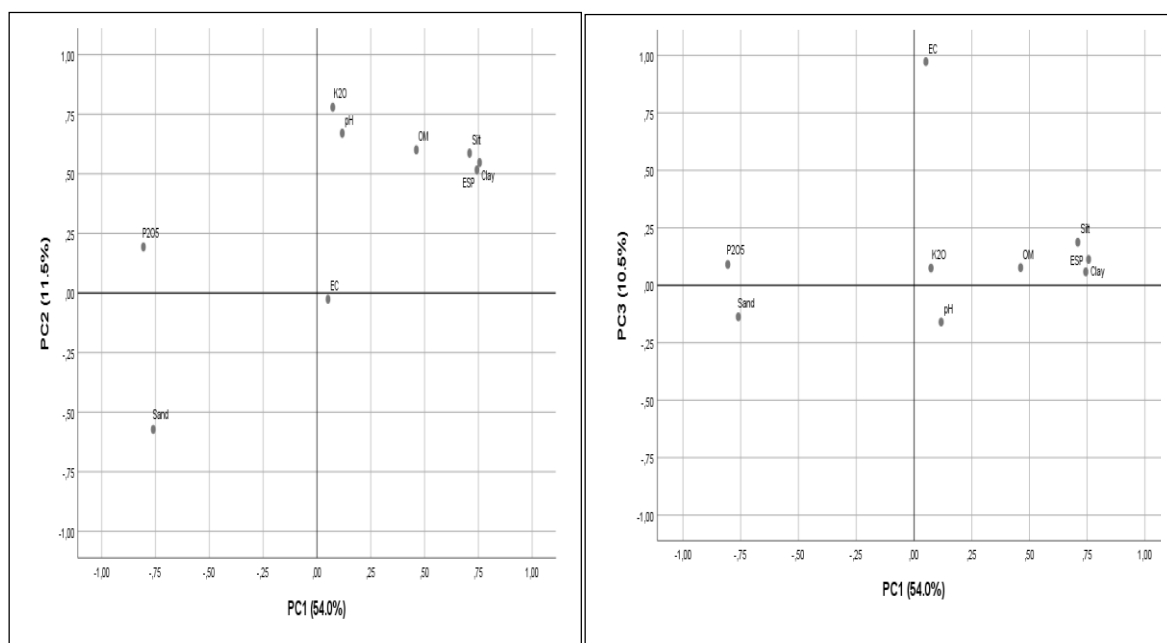
La première composante principale (PC1) a conservé 54% de l'information totale qui était contenue dans l'ensemble des 9 propriétés initiales du sol, tandis que la deuxième composante (PC2) a conservé 11,5% de cette information et la troisième composante principale a conservé 10,5% (Tableau 42).

La première composante principale (PC1) était principalement corrélée positivement à l'ESP, à l'argile et au limon (de 0,71 à 0,76) et corrélée négativement à P2O5 (-0,81) et au sable (-0,76) (Tableau 43, Figure 54).

**Tableau 43** : Chargements des propriétés physico-chimiques du sol sur les composantes principales.

Propriétés du sol	Composantes principales (PC)		
	PC1	PC2	PC3
pH	0,12	<b>0,67</b>	-0,16
CE	0,05	-0,03	<b>0,97</b>
MO	0,46	<b>0,60</b>	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>-0,81</b>	0,19	0,09
K <sub>2</sub> O	0,07	<b>0,78</b>	0,07
ESP	<b>0,74</b>	0,52	0,06
Argile	<b>0,76</b>	0,55	0,11
Limon	<b>0,71</b>	0,59	0,19
Sable	<b>-0,76</b>	-0,57	-0,14

Les valeurs en gras correspondent à des chargements supérieurs à 0,6.

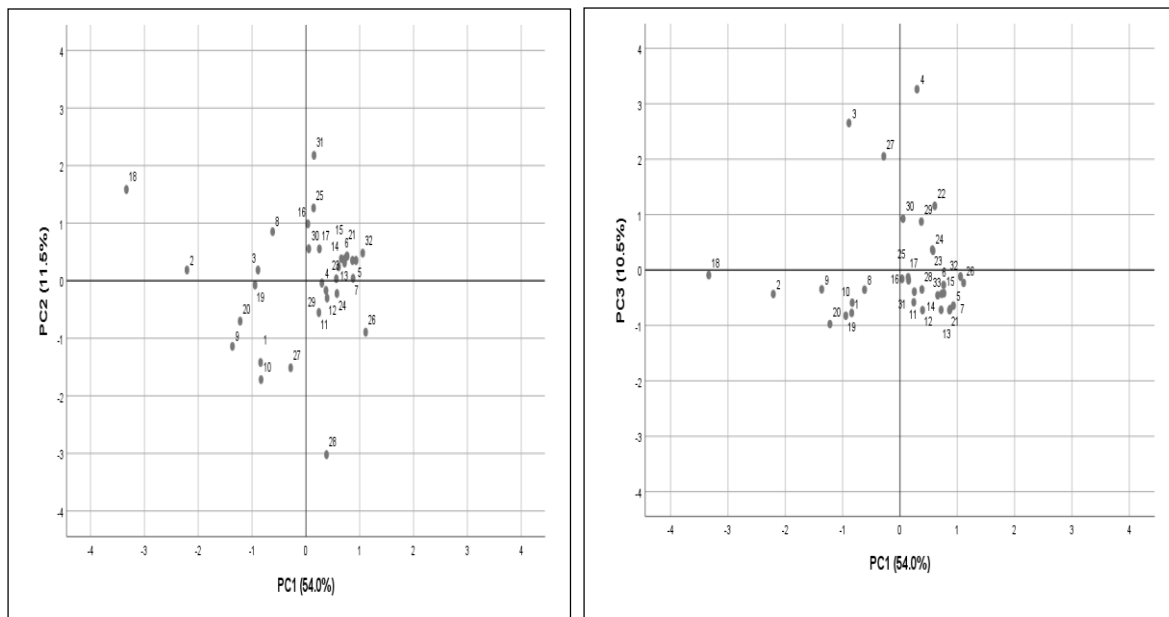


**Figure 54** : Graphique de chargement pour l'analyse en composantes principales : Plans PC1-PC2 (gauche) et PC1-PC3 (droite).

Elle oppose les sols à texture fine et alcalins à faible teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> à ceux à texture grossière, non alcalins et à forte teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. La deuxième composante principale (PC2) était fortement

corrélée positivement avec  $K_2O$  (0,78), pH (0,67) et MO (0,60). Il oppose les sols alcalins à forte teneur en  $K_2O$  et en MO aux sols acides à faible teneur en  $K_2O$  et en MO. Enfin, la troisième composante principale (PC3) est uniquement et positivement corrélée avec la CE (0,97) (Tableau 43). Elle permet de différencier les sols salins des sols non salins. Ceci est en accord avec ce qui a été trouvé dans l'analyse de corrélation ci-dessus.

Quelques échantillons de sol spécifiques sont apparus (Figure 55) :



**Figure 55** : Tracé des scores pour les échantillons de sol dans les plans PC1-PC2 (à Gauche) et PC1-PC3 (à droite).

- Les échantillons 2 et 18 sont caractérisés par les plus hauts niveaux de  $P_2O_5$  (108,1 et 195,6 ppm) et parmi les plus hauts niveaux de sable (80,7 et 80,4%) ainsi que les plus bas niveaux d'argile (14,4 et 14%), de limon (4,8 et 5,6%) et d'ESP (7,3 et 20,5). Ces deux échantillons sont donc des sols sableux, riches en  $P_2O_5$  et non alcalins.
- Les échantillons 28 et 31. Le premier est caractérisé par les niveaux les plus bas de pH (6.0),  $K_2O$  (54.2 ppm) et MO (1.2%) tandis que le second est caractérisé par le contraire : les niveaux les plus élevés de pH (8.3),  $K_2O$  (1024.4 ppm) et MO (5.1%). Par conséquent, l'échantillon 28 est un sol acide, pauvre en  $K_2O$  et en MO, tandis que l'échantillon 31 est un sol alcalin, riche en  $K_2O$  et en MO.

- Les échantillons 3, 4 et 27 sont caractérisés par les niveaux les plus élevés de CE (3,2 à 5,8 dS m<sup>-1</sup>). Ils proviennent des sols les plus salins de la zone d'étude.
- De nombreux échantillons qui se trouvent autour de l'origine des plans PC (8, 11, 12, 13, 17, 24, 29, 30, etc.) sont caractérisés par des niveaux intermédiaires des différentes propriétés du sol. Les sols ont une texture moyenne (ni fine ni grossière), avec un pH neutre, une salinité et une fertilité moyennes.

## Conclusion

L'étude de la qualité physico-chimique des sols de la région de Sidi Yahya nous a permis de s'enquérir de l'état actuel de la qualité des sols de cette région particulièrement connue pour des activités agricoles intensives. Ainsi, nous pouvons conclure que la majorité des sols de la région sont basiques et modérément calcaire. La répartition spatiale montre que la majorité de la zone d'étude présente les niveaux de salinité les plus faibles. Par conséquent, le sol des sites ne présente pas de problème de salinité. En revanche, les teneurs en phosphore assimilable sont élevées dans les horizons de surface pour les parcelles cultivées, alors que le sol présente des teneurs faibles au niveau profond dans toutes les parcelles.

La carte de répartition spatiale montre que des niveaux élevés de potassium occupent la majeure partie de la zone d'étude, ce qui constitue une bonne nutrition des plantes en cet élément essentiel à leur croissance. Toutefois, la texture fine du sol (argileuse) peut constituer un risque de non disponibilité en cet élément, surtout pendant la période estivale en raison de la rétrogradation du potassium en sol argileux. Les teneurs en calcium et magnésium correspondent à un état de fertilité élevée, et ce pour la plupart des parcelles et les horizons étudiés. Ces sols argileux favorisent la rétention du calcium et du magnésium. En fin, les sols du périmètre sont riches en oligoéléments cuivre et manganèse, mais ils présentent des teneurs faibles en zinc et en cuivre.

La répartition spatiale de la matière organique révèle des plages de sol riche au nord et au centre de la région, alors que la partie sud représente des sols pauvres. Cela peut être expliqué par l'influence du climat aride et semi-aride ainsi que par les pratiques culturales exercées au niveau de la région.

L'étude statistique par analyse de variance (ANOVA) a révélé que les sols agricoles de la région montrent une différence significative entre les 6 zones étudiées (A, B, C, D, E, et F) en termes de calcaire total, pH, M.O et ESP. La corrélation des propriétés du sol à l'ACP a permis de réduire les 9 dimensions initiales à seulement 3 composantes principales. Les méthodes statistiques multivariées telles que l'ACP et les méthodes d'interpolation spatiale telles que l'IDW ont permis de délimiter les sols homogènes en vue de leur gestion optimale et durable.

A travers ces résultats, nous pouvons conclure que les sols de la zone d'étude sont moyennement fertiles. Pour assurer une bonne production végétale et améliorer les propriétés physiques et chimiques de ces sols, un apport raisonnable en éléments nutritifs est nécessaire au développement des plantes, surtout l'apport en azote, phosphore et potassium.

**CHAPITRE II :**  
**ETUDE DE LA QUALITE PHYSICOCHEMIQUE**  
**DES EAUX SOUTERRAINES**

## Introduction

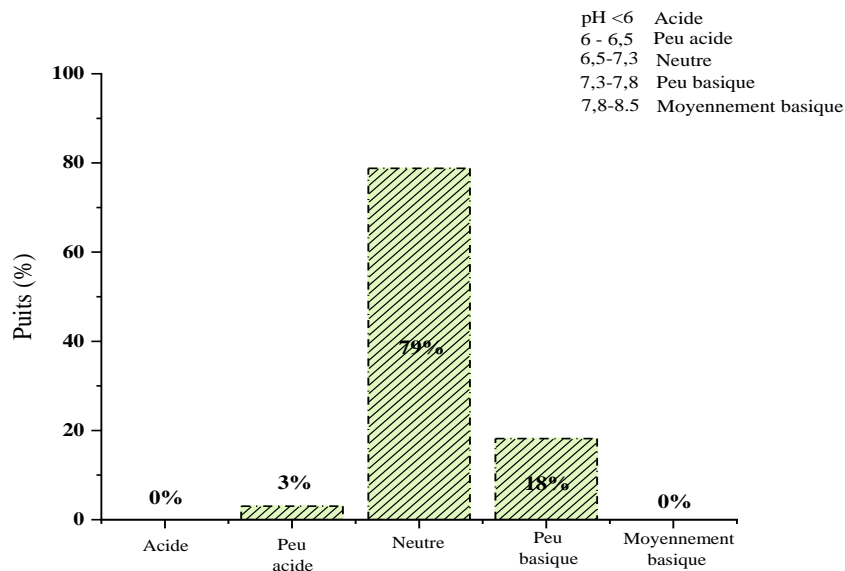
Cette partie fera l'objet d'une approche analytique des résultats obtenus au laboratoire de l'INRA-RABAT, a fin de caractériser les ressources en eau et définir ainsi leur qualité, les types de faciès, le bilan ionique des eaux souterraines et les possibilités d'irrigation des sols de la zone par les eaux étudiées.

### 1. pH des eaux

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons  $H^+$  contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Ezzaouaq, 1991 ; El Blidi et Fekhaoui, 2003 ; Himmi et al., 2003). Dans le cas de la région d'étude, les valeurs du pH enregistrées ne montrent pas de variations notables (Tableau 44, Figure 56), avec un minimum de 6,3, un maximum de 7,7 et une moyenne de 7,1.

**Tableau 44** : Répartition des classes de pH des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb (Baize et Girard, 2001).

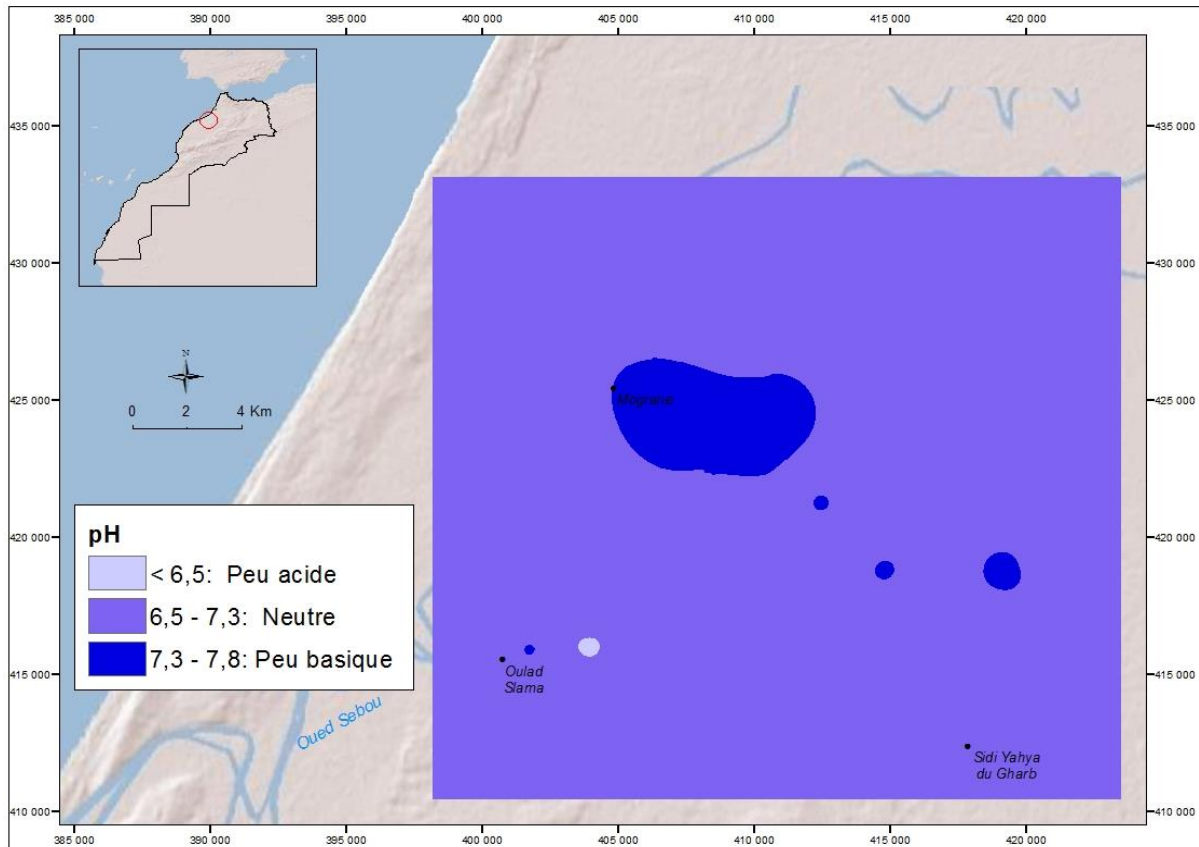
Qualité d'eau	pH	N° de puits	Puits%
Acide	<6	0	0
Peu acide	6-6,5	1	3
Neutre	6,5-7,3	26	79
Peu basique	7,3-7,8	6	18
Moyennement basique	7,8-8,5	0	0



**Figure 56** : Diagramme de pH des eaux souterraines de la zone d'étude.

On observe que la majorité des puits ont des pH compris entre 6,5 et 7,3 à l'exception du puits E3 qui présente un pH de 6,3 et qui est considéré comme étant faiblement acide. A noter que 79% de ces eaux sont neutres, 18% sont faiblement basiques et 3% sont faiblement acides. En se référant aux normes marocaines ( $6,5 < \text{pH} < 8,5$ ) pour l'eau potable, on remarque que 100% des eaux analysées sont conformes à la consommation.

La répartition spatiale du pH des eaux souterraines est illustrée dans la carte de la figure 57.



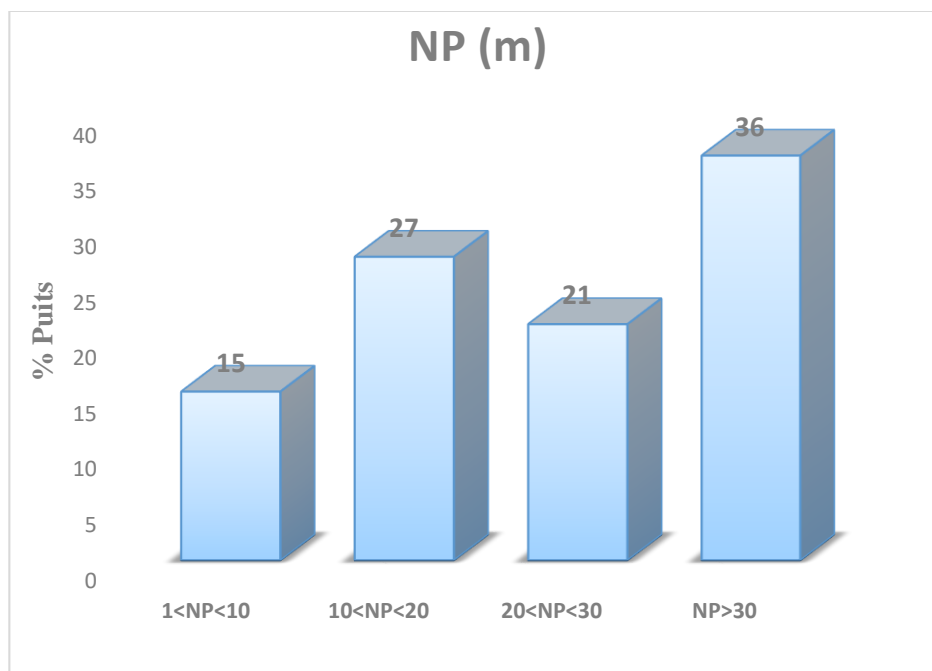
**Figure 57** : Carte d'interpolation spatiale du pH des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

La carte de répartition spatiale du pH des eaux montre qu'il existe un gradient Nord-Sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au Centre. Puisque ce paramètre influence la forme et la disponibilité des nutriments dans l'eau d'irrigation, la solubilité de la plupart des microéléments dans ces conditions est faible. Une faible alcalinité indique la présence de sels basiques faibles dans le sol (**Jameel, 2002**). La nature légèrement alcaline suggère qu'environ 95% du  $\text{CO}_2$  dans l'eau est sous forme de bicarbonate (**Azeez et al., 2000**).

Les résultats obtenus sont semblables à ceux trouvés par **Sehlaoui et al. (2020)**, dans une étude de qualité de 120 puits dans la région de Benslimane, où ils ont trouvé que la majorité des échantillons (71 %) ont un pH alcalin. Il oscille entre 6,2 et 8,1 avec une moyenne de 7,2 et un très faible coefficient de variation de 4,4 %. Étant donné que ce paramètre influence la forme et la disponibilité des nutriments dans l'eau d'irrigation, la solubilité de la plupart des microéléments dans ces conditions est faible.

## 2. Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est largement variable, elle oscille entre 6 et 96 m. La profondeur de la majorité des puits est supérieure à 30 m comme le montre la figure 58. Ce qui met en évidence la surexploitation de ces eaux dans l'irrigation causant un abattement continu du niveau de la nappe.



**Figure 58** : Diagramme de la profondeur des eaux de puits de Sidi Yahya Gharb.

## 3. Salinité

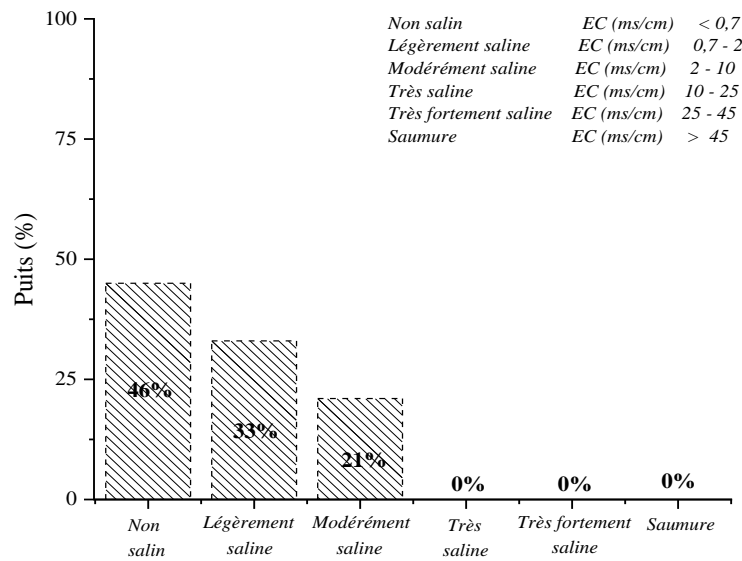
Les mesures de la conductivité électrique permettent d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau, donc sa minéralisation (**Haddad et Ghoualem, 2014**). Les valeurs enregistrées durant la période d'étude sont plus importantes au niveau de certains points de prélèvement, comme il est montré par les couleurs distinctes sur les cartes de distribution (Figure 60). Cette forte minéralisation des eaux dépend de la composition du sol traversé, de la décomposition de la matière

organique dans ce même compartiment, ainsi que de la localisation des puits par rapport aux activités anthropiques.

On note que les valeurs de la conductivité électrique enregistrées sont variables de 0,12 mS/cm à 6,9 mS/cm avec une moyenne de 1,38 mS/cm. D'après la classification des eaux analysées selon les normes de classification des eaux d'irrigation (**Maillard, 2001**) (Tableau 45, Figure 59). Il ressort que 46 % des eaux des puits échantillonnés de type d'eau potable et irrigable (non salin) et 33% sont considérées comme étant des eaux de type d'eau d'irrigation (légèrement salin), tandis que 21% de ces échantillons étudiés sont de type d'eau souterraine (modérément salin). La majorité des puits ont des valeurs de conductivité électrique inférieures à 2 mS/cm.

**Tableau 45** : Répartition de la salinité des eaux d'irrigation du périmètre de Sidi Yahya Gharb (**Maillard, 2001**).

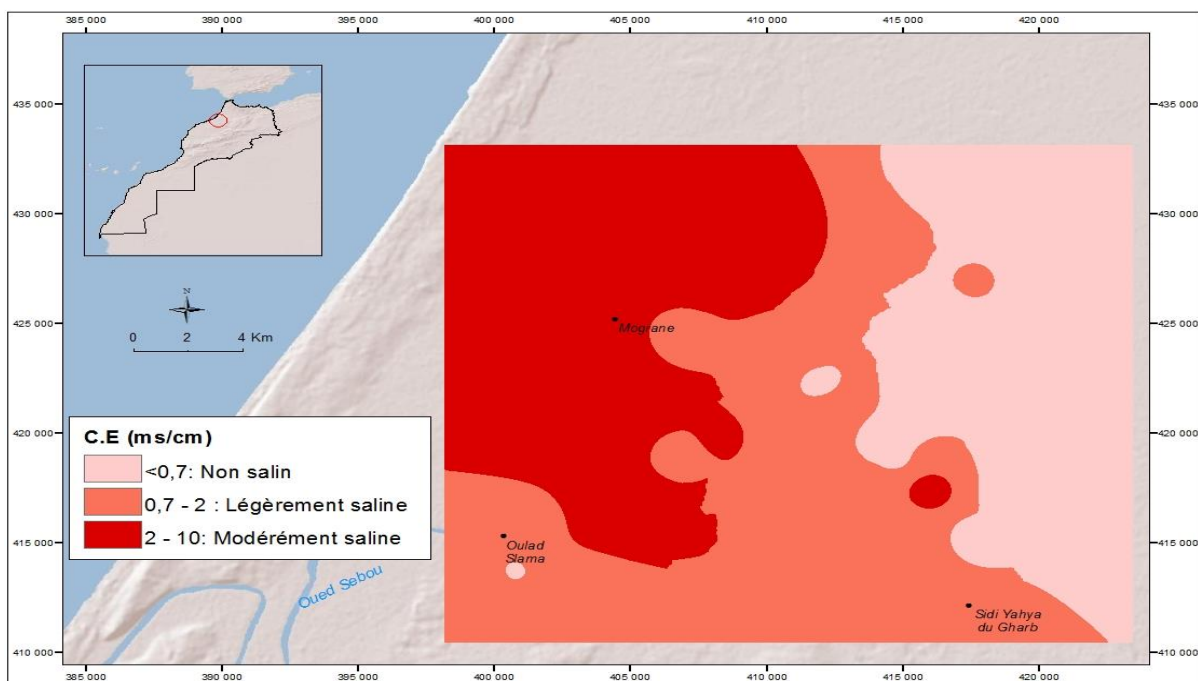
Classe	CE en mS/cm	Type d'eau	N°	% de Puits
Non saline	< 0,7	Eau potable et irrigable	15	46
Légèrement saline	0,7-2	Eau d'irrigation	11	33
Modérément saline	2 -10	Première eau de drainage et eau souterraine	7	21
Très saline	10 –25	Seconde eau de drainage et eau souterraine	0	0
Très fortement saline	25 –45	Eau souterraine très salée	0	0
Saumure	> 45	Eau de mer	0	0



**Figure 59** : Diagramme de la salinité des eaux d'irrigation de la zone d'étude.

Puisque la conductivité électrique permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et par suite donner une idée sur la minéralisation totale d'une eau, ces eaux souterraines sont considérées moyennement salines, par conséquent les eaux des points étudiés sont moyennement minéralisées.

La répartition spatiale de la salinité des eaux souterraines est représentée par la figure 60.



**Figure 60** : Carte d'interpolation de la salinité des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya

La carte de répartition spatiale de la salinité montre qu'il existe un gradient nord-sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au nord-ouest (Figure 60). La salinité des eaux peut être due à la surexploitation de la nappe, ainsi qu'à la présence d'une décharge dans ce secteur qui contribue à l'augmentation de la concentration des sels dissous dans l'eau, comme elle peut être due aussi à la salure des roches moyennement profondes (**Bouksila et al., 2013**).

En comparant nos résultats à certains travaux de recherche, il existe une grande différence dans le niveau de salinité des eaux. En effet, d'après une étude d'**Omrania et al. (2019)**, qui a été réalisée dans la zone agricole de Mnasra au nord-ouest du Maroc sur la caractérisation physico-chimique des eaux et des sols, et qui a concerné 18 puits, les résultats ont montré que 61,1% des puits analysés ont une salinité légère à modérée avec  $0,7 < CE < 3$ .

Le mélange entre les eaux souterraines et les eaux de barrage permet de réduire la concentration des sels dans les eaux d'irrigation, c'est pour cela que la salinité des sols irrigués est faible (**Ezlit et al., 2010**).

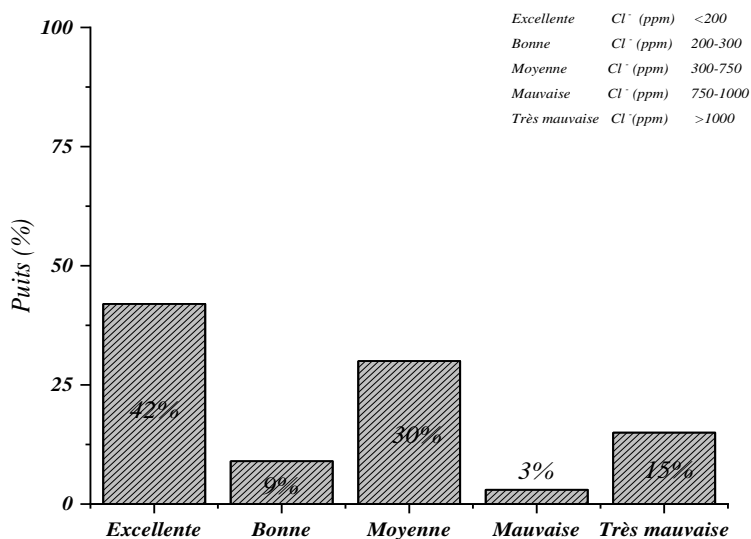
#### **4. Risque lié aux chlorures**

Les chlorures sont également omniprésents dans la nature sous différentes formes, soit liés avec le sodium (chlorure de sodium), soit avec le potassium (chlorure de potassium). D'après les différentes études, les chlorures proviendraient de l'altération météorique et de la lixiviation des roches sédimentaires et des sols, d'activités anthropiques, de l'infiltrations des eaux d'irrigation ainsi que de la dissolution des dépôts de sel (**Amharref et al., 2007 ; El Asslou et al., 2007 ; Nechad et al., 2014 ; Er-Raioui et al., 2011**).

Les teneurs en chlorures des échantillons d'eau analysés (Figure 61) affichaient des valeurs oscillantes entre 49,6 ppm et 2197,9 ppm avec une moyenne égale 649,4 ppm. 51% des points de la plaine du Sidi Yahya Gharb sont conformes aux normes marocaines des eaux souterraines (**Ministère chargé de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement, 2001**), c'est-à-dire ne dépasse pas 300 ppm. Donc aucun problème de toxicité ne peut avoir lieu, tandis que 18% des eaux souterraines sont de qualité mauvaise à très mauvaise car la concentration des ions chlorures dans ces eaux dépasse les 1000 ppm (Tableau 46), par conséquent elles sont laxatives et corrosives et peuvent causer une réduction des rendements des cultures sensibles surtout pour les cultures fruitières (brûlures des feuilles, ...).

**Tableau 46** : Répartition de la teneur des ions chlorures des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les normes marocaines (MDMEMEE,2014).

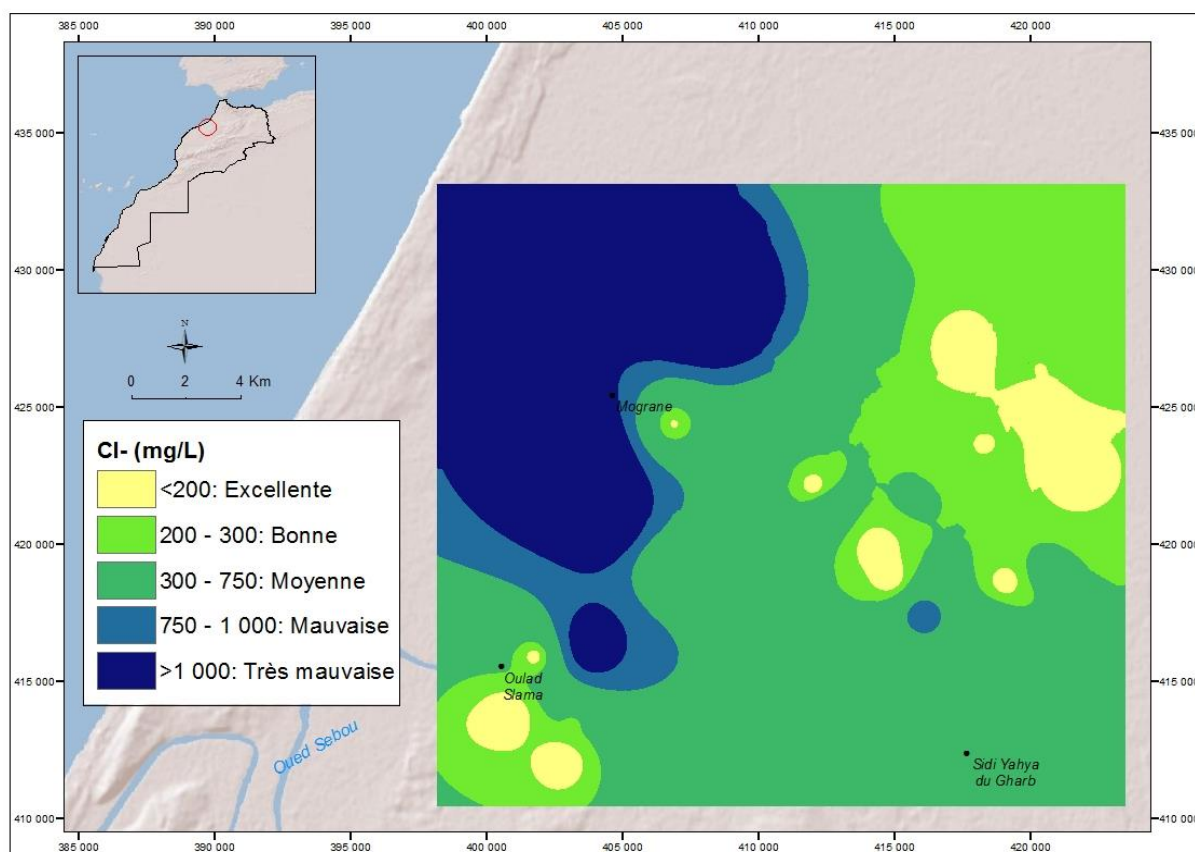
Qualité d'eau	Cl-(ppm)	N°	Puits%
Excellente	<200	14	42
Bonne	200-300	3	9
Moyenne	300-750	10	30
Mauvaise	750-1000	1	3
Très mauvaise	>1000	5	15



**Figure 61** : Diagramme de la teneur des ions chlorures des eaux souterraines de la zone d'étude.

Au niveau de la région d'étude, les teneurs en chlorures sont inférieures à la valeur maximale admissible, qui est fixée à 750 mg/l selon les normes Marocaines pour les eaux potables, sauf pour P3, P4, P5, P6, P12 et P19. Ces teneurs élevées pourraient avoir pour origine les engrais utilisés par les agriculteurs de la région, mais aussi par une présence naturelle due aux dépôts du Permian-Triassic à caractère évaporitique (salifère et gypsifère).

La répartition spatiale des chlorures du périmètre est représentée par la carte de la figure 62.



**Figure 62** : Carte d'interpolation spatiale de chlorure des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La carte de répartition spatiale des chlorures montre que la zone du nord-ouest est caractérisée par un niveau de qualité des eaux très mauvais vis-à-vis du chlorure, par contre le nord-est est caractérisé par un bon niveau des teneurs en chlorures. Quant au centre les teneurs en chlorures sont moyennes. Un autre facteur naturel qui pourrait aussi expliquer ces teneurs, c'est l'évaporation des nappes perchées qui caractérise les horizons supérieurs des aquifères du Gharb (Kholtei et al., 2003).

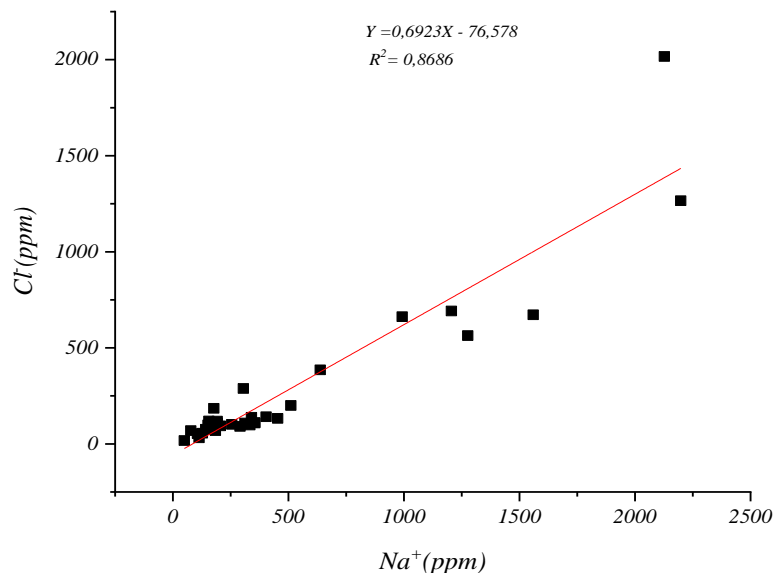
Dans le même contexte, une étude de Bouderkha et al. (2016), sur l'évaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du Gharb a montré que les teneurs en chlorures des eaux analysés affichent des valeurs oscillant entre 110 et 2734 mg/l. Les points d'eau situés en amont de la plaine du Gharb sont conformes aux normes marocaines des eaux souterraines, étant donné que la concentration en chlorures est inférieure à 750 mg /l. Les

autres niveaux élevés ont été expliqués par l'utilisation des engrais mais aussi par une présence naturelle due aux dépôts du Permo-Trias à caractère évaporitique (salifère et gypsifère).

## 5. Chlorures et sodium

L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'évaporation dans les milieux fermés (systèmes endoréiques). L'halite se dissout en donnant le cation  $\text{Na}^+$  et l'anion  $\text{Cl}^-$ , d'autres origines, comme la lixiviation des formations géologiques contenant les chlorures de sodium et/ou la décomposition des roches silicatées. Comme différents auteurs le précisent, le sodium avec d'autres minéraux dans l'eau souterraine, jouent un rôle sur les caractéristiques de la conductivité électrique (**Fatima et al., 2014 ; Baedecker et Back, 1979**).

L'examen des valeurs de ces deux éléments montre que les concentrations sont très fortes dans l'eau souterraine au niveau de Sidi Yahya Gharb. L'eau de puits P6 est la plus excessivement salée, tandis que l'eau du puit P29 présente l'eau la moins salée. La relation entre ces deux éléments est caractérisée par un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,86$  (Figure 63).



**Figure 63** : Courbe de corrélation entre les concentrations des chlorures et du sodium des eaux souterraines.

Les résultats obtenus sont similaires à ceux trouvés par **Nouayti et al. (2015)**, lorsqu'ils ont évalué la qualité des eaux souterraines dans les nappes du Haut Atlas central au Maroc. Ils ont constaté que l'application d'outils géostatistiques a montré un lien entre la conductivité électrique

et les éléments chimiques, qui ont permis de montrer une forte participation des sulfates, chlorures et sodium dans l'acquisition de la minéralisation. Les teneurs élevées en sodium des eaux de la nappe ont la même origine que celle des chlorures.

En effet, le sodium accompagne généralement la pollution due aux chlorures (**Pesson, 1979**). Il y a toujours une corrélation linéaire entre ces deux éléments (Figure 63).

## 6. Risques lié aux bicarbonates

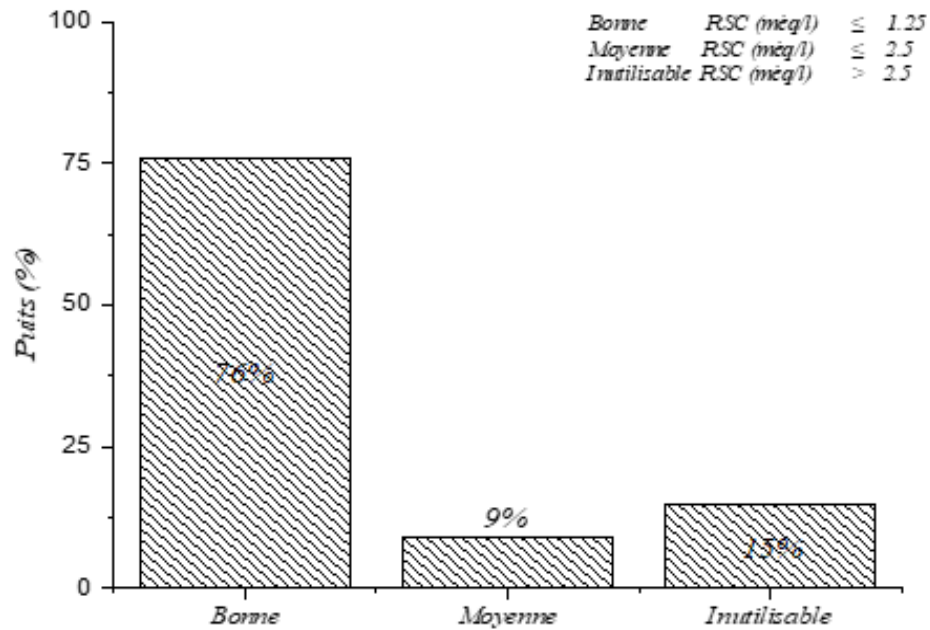
Les risques de sodicité du sol s'accroissent si l'eau d'irrigation est riche en espèces carbonatées. En effet, l'utilisation d'une telle eau favorise la précipitation du calcium et du magnésium présent dans la solution du sol en carbonates de calcium et de magnésium, ce qui entraîne un accroissement du taux de sodium échangeable. L'effet de la concentration des ions bicarbonates sur la qualité de l'eau est évalué par le carbonate de sodium résiduel (RSC) (**Eaton, 1950**).

$$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Selon Eaton (1950), les eaux ayant moins de 1,25 meq/l de RSC n'auraient aucune influence sur le sol. Celles qui en auraient plus de 2,5 meq/l seraient dangereuses. Dans notre cas, cet indice est négatif dans 76% des eaux analysées. De ce fait, ces eaux d'irrigation ne présentent pas de danger de sodicité du sol (Tableau 47, Figure 64).

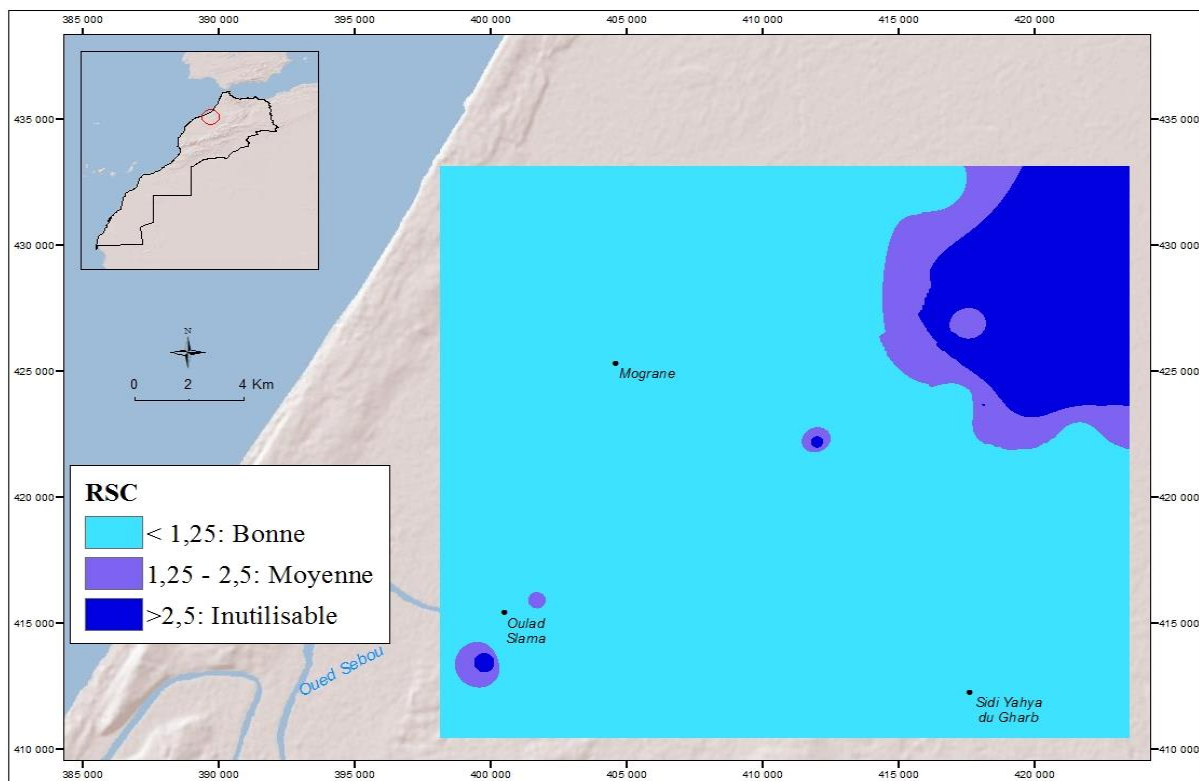
**Tableau 47** : Répartition des classes du RSC des eaux souterraines de périmètre de Sidi Yahya Gharb (**Durand, 1983**)

Qualité de l'eau	RSC (méq/l)	N°	Puits%
Bonne	≤ 1,25	28	76
Moyenne	≤ 2,5	3	9
Inutilisable	> 2,5	2	15



**Figure 64** : Diagramme du RSC des eaux des eaux souterraines de la zone d'étude.

La répartition spatiale de la RSC des eaux souterraines est présentée par la carte de la figure 65.



**Figure 65** : Carte d'interpolation spatiale du RSC des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

La carte de RSC montre que la zone du nord-ouest et la zone sud sont caractérisées par un niveau de RSC faible donc il n'y a pas de risque liée aux bicarbonates dans ces zones. Par contre, la zone située au nord-est est caractérisée par un niveau de sodicité relativement élevée qualifiant ces eaux d'inutilisable pour l'irrigation.

Dans le même contexte, une étude de **Sehlaoui et al. (2020)** qui a été réalisée à Benslimane (Région de Casablanca-Settat), pour l'étude hydrochimique des eaux souterraines afin de révéler les principaux facteurs influençant leur qualité et leur aptitude à l'irrigation, et l'identification de quelques mesures de protection et de gouvernance des eaux souterraines pour les agriculteurs et les aménageurs agricoles de la zone étudiée, ils ont trouvé que le RSC des échantillons variait entre - 52,9 et 1,2 meq/l . Ils ont tous une valeur inférieure à 1,25 meq/l. Ils ont constaté que ces eaux ne présentent donc aucun risque d'alcalinité.

L'eau riche en carbonates présente un risque majeur d'alcalinisation et donc de dégradation de la structure du sol (**Marlet et Job, 2006**). Le dépôt de carbonates sur le sol entraîne une diminution de sa perméabilité, ce qui affecte par la suite la croissance des plantes (**Ehya et Saeedi, 2018**).

## **7. Dureté de l'eau**

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. Par contre, là où on trouve de la contamination par l'eau de mer, la concentration en magnésium peut être plus élevée que celle du calcium (**Henry et Beaudry, 1984**).

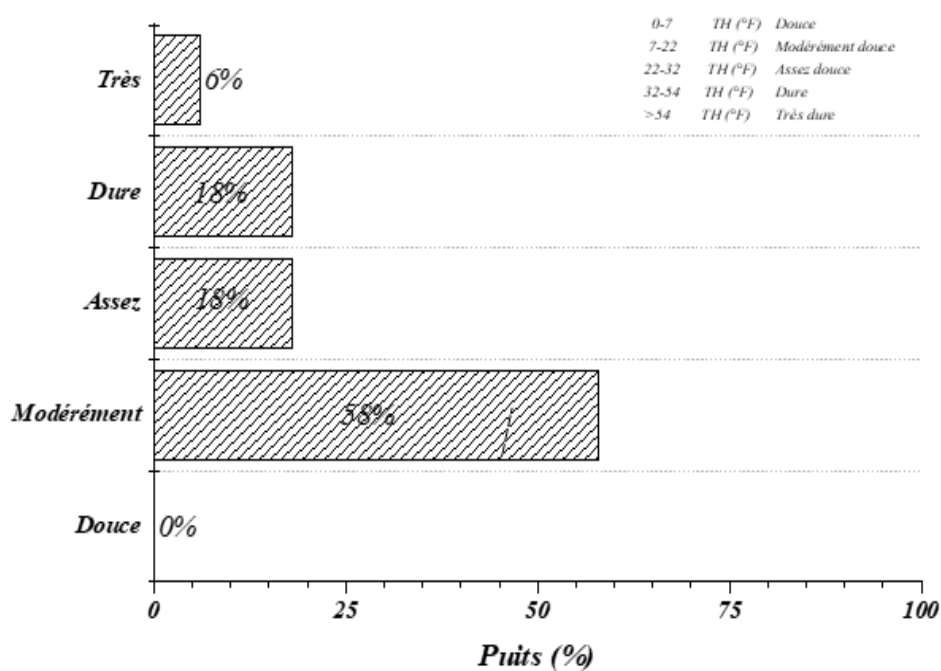
En général, une eau dure n'est pas souhaitable pour l'usage domestique car elle réduit de beaucoup l'efficacité des savons. Par contre, en agriculture, une eau dure aide le sol à conserver une bonne structure par les ponts calciques.

Les résultats des mesures de la dureté des eaux de la zone de Sidi Yahya Gharb montrent une certaine variabilité, les valeurs du titre hydrotimétrique des échantillons varient entre 11,22 et 66,25 °F avec une moyenne de 25,46 °F.

D'après la classification des eaux analysées (Tableau 48), il ressort que 58% des eaux échantillonnées appartiennent à la classe C2 et 18% correspondent à la classe C4, tandis que 18% sont classés dans la classe C3.

**Tableau 48** : Répartition de la dureté des eaux souterraines de périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme (I'O.M.S, 2008)

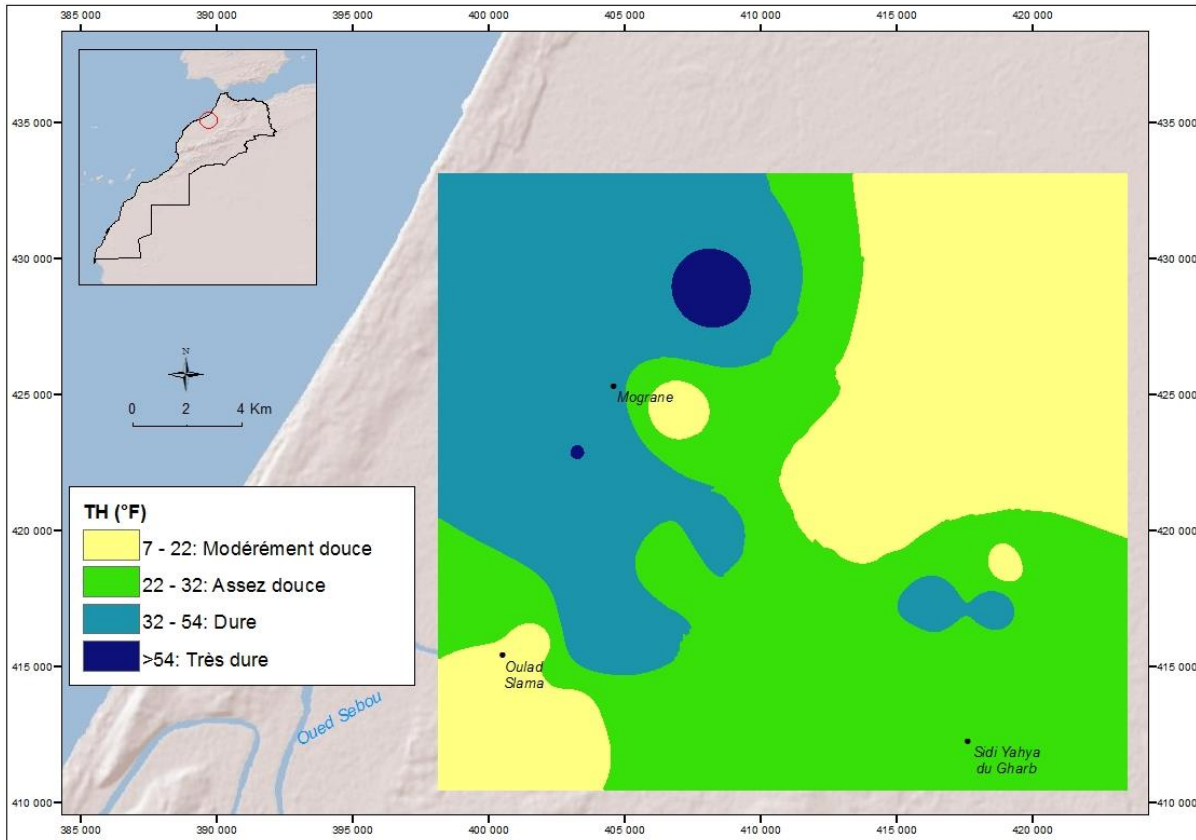
Classement	Dureté de l'eau	TH (°F)	Puits%
C1	Douce	0-7	0
C2	Modérément douce	7-22	58
C3	Assez douce	22-32	18
C4	Dure	32-54	18
C5	Très dure	>54	6



**Figure 66** : Diagramme du TH des eaux souterraines de la zone d'étude

La majorité des eaux souterraines de la zone d'étude sont souhaitables pour l'usage domestique par contre 24% des puits sont de caractère dur à très dur et par conséquent elles peuvent être utilisées en agriculture (Figure 66).

La répartition spatiale de la dureté des eaux est représentée par la carte de la figure 67.



**Figure 67** : Carte d'interpolation spatiale de la dureté des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

Les eaux du périmètre de Sidi Yahya se classent dans la catégorie des eaux moyennement à assez dures, 58% des eaux souterraines sont modérément douces situées principalement au sud de la zone, alors que 18% sont des eaux assez douces, localisées notamment dans la partie Nord-Est. Les eaux très dures se situent dans la partie Nord-Ouest de la zone. Ces résultats ne sont pas étonnants puisqu'on se trouve sur des sols d'alluvions calcaires. Elle peut causer des problèmes de colmatage dans le système de micro-irrigation, donc il faut passer l'eau par des bassins de décantation avant de rejoindre les canaux d'irrigation (Zarei et al., 2014).

La dureté totale des eaux souterraines est causée par le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  dissous dans l'eau exprimés en  $\text{CaCO}_3$ . La dureté de l'eau est divisée en dureté temporaire et permanente. La dureté temporaire se produit lorsque le carbonate de calcium présent dans l'eau est éliminé par l'eau bouillante. La dureté permanente est la preuve de la présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dans l'eau et elle est éliminée par un processus d'échange d'ions (Vasanthavigar et al., 2010). L'OMS (2008) indique

que la consommation excessive d'eau dure pouvait augmenter les maladies cardiaques. Une dureté élevée peut également mettre à l'échelle les pots, les chaudières et les tuyaux d'irrigation.

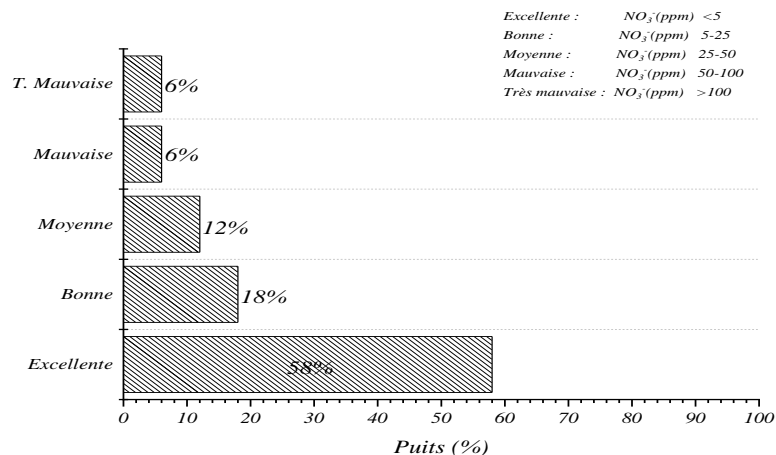
## 8. Risque lié aux nitrates

Les nitrates présents dans les eaux souterraines sont soit d'origine naturelle, soit proviennent de la décomposition des matières organiques (végétales et/ou animales) et/ou des activités anthropiques à travers l'irrigation ou les produits fertilisants (Singh et al., 2013 ; Ghazali et Zaid, 2013 ; Zghibi et al., 2013).

Les nitrates sont importants à suivre. En effet, retrouvés en excès, ils sont un marqueur incontestable de pollution. Au niveau des eaux étudiées (Tableau 49, Figure 68), la concentration moyenne en nitrates est 17.66 mg/l ce qui est conforme à la norme de 50 mg/l fixée par l'OMS (1986), en termes de potabilité. Les teneurs en nitrates varient entre 0,18 et 111,3 mg/l, elles sont en général conformes aux normes, sauf pour les puits E1, E10, E11 et E13 où des valeurs élevées ont été enregistrées à Sidi Yahya Gharb.

**Tableau 49** : Répartition de la teneur des nitrates des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme marocaines (MDMEMEE, 2014).

Qualité d'eau	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	N°	% de puits
<b>Excellente</b>	<5	19	58
<b>Bonne</b>	5-25	6	18
<b>Moyenne</b>	25-50	4	12
<b>Mauvaise</b>	50-100	2	6
<b>Très mauvaise</b>	>100	2	6

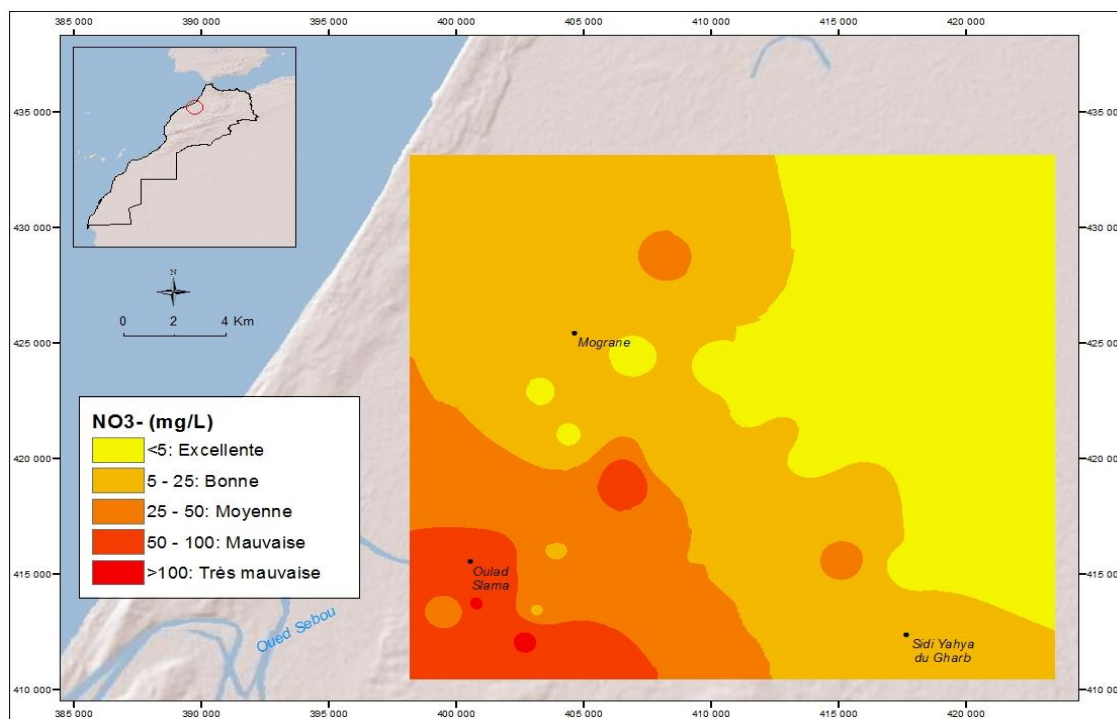


**Figure 68** : Diagramme des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la zone d'étude.

Cette altération de la qualité de ces quatre puits par les nitrates pourrait être attribuée aux rejets ponctuels et dispersés des produits d'élevage et par l'usage des fertilisants chimiques et des pesticides lié aux activités agricoles (Wang et al., 2016), qui s'infiltrent par la suite à travers le sol jusqu'à la nappe phréatique. Bien que les nitrates n'aient pas d'effets toxiques directs sauf à des doses élevées, ils se transforment facilement par réduction bactérienne en nitrites, dont les effets sur la santé ne seraient pas neutres.

En comparant nos résultats à certains travaux de recherche, il existe une grande différence dans la teneur de la pollution nitrique d'une région à l'autre. Par exemple, d'après une étude de Petit et al. (2018), sur la vulnérabilité de la pollution nitrique de la masse d'eau des Sables de Bruxellien/Yprésien en Région de Bruxelles Capitales(RBC) de 50 sites de surveillance, pour étudier la contamination aux nitrates, distribués sur la zone d'étude entre 2006 et 2016. Les données montrent que la qualité de la masse d'eau est dégradée, particulièrement dans les zones urbanisées. Une analyse statistique montre que l'état de dégradation diminue légèrement dans les zones urbanisées et inversement dans les zones encore peu polluées par les nitrates.

La répartition spatiale des nitrates des eaux souterraines est présentée par la carte de la figure 69.



**Figure 69** : Carte d'interpolation spatiale des nitrates des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

La carte de répartition spatiale des nitrates montre qu'il existe un gradient Nord-Sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au Sud-Ouest (Figure 69). 12% des eaux souterraines présentent un risque de nitrates, et se concentrent sur la rive gauche du périmètre. Ce taux de nitrate peut être dû à l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en amendements à base azotée vers la nappe (Schoonover et Williard, 2003).

L'implantation de bandes riveraines peut aussi jouer un rôle considérable sur le lessivage des  $\text{NO}_3^-$  dans l'environnement. Des études montrent que les bandes riveraines peuvent diminuer les concentrations en  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau souterraine de 75-99% (Mayer et al., 2005). Au niveau des sols, des pratiques agro-environnementales telles que la fragmentation de l'application des engrais azotés, l'application de cultures de couverture, l'utilisation d'engrais azotés à « minéralisation lente » et le chaulage peuvent réduire le lessivage des  $\text{NO}_3^-$  (Woodward et al., 2009).

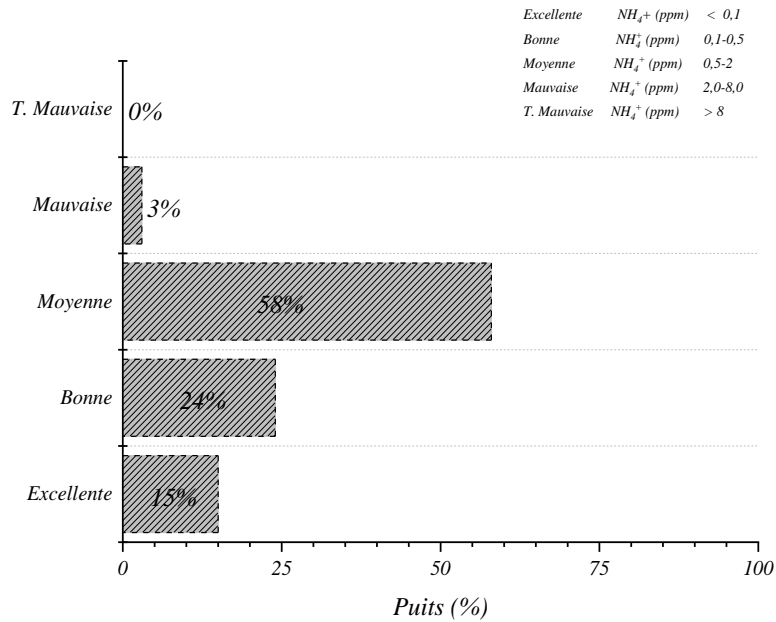
### 9. Risque lié à l'ion ammonium

L'azote ammoniacal constitue un bon indicateur de pollution des cours d'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industrielle (Sebilo, 2003).

Dans notre zone d'étude, les teneurs en ammonium sont globalement satisfaisantes (Tableau 50, Figure 70), et varient entre un minimum de 0 mg/l au niveau du puits E29 et un maximum de 5,59 mg/l au niveau du puits E5. La valeur maximale admissible est fixée à 0,5 mg/l dont c'est un seuil fixé par les normes internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

**Tableau 50** : Répartition de la teneur des ions ammonium des eaux souterraines du périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme marocaines (MDMEMEE, 2014).

Qualité d'eau	$\text{NH}_4^+$ (ppm)	N°	% de puits
<b>Excellente</b>	< 0,1	5	15
<b>Bonne</b>	0,1-0,5	8	24
<b>Moyenne</b>	0,5-2	19	58
<b>Mauvaise</b>	2-8	1	3
<b>T. Mauvaise</b>	> 8	0	0

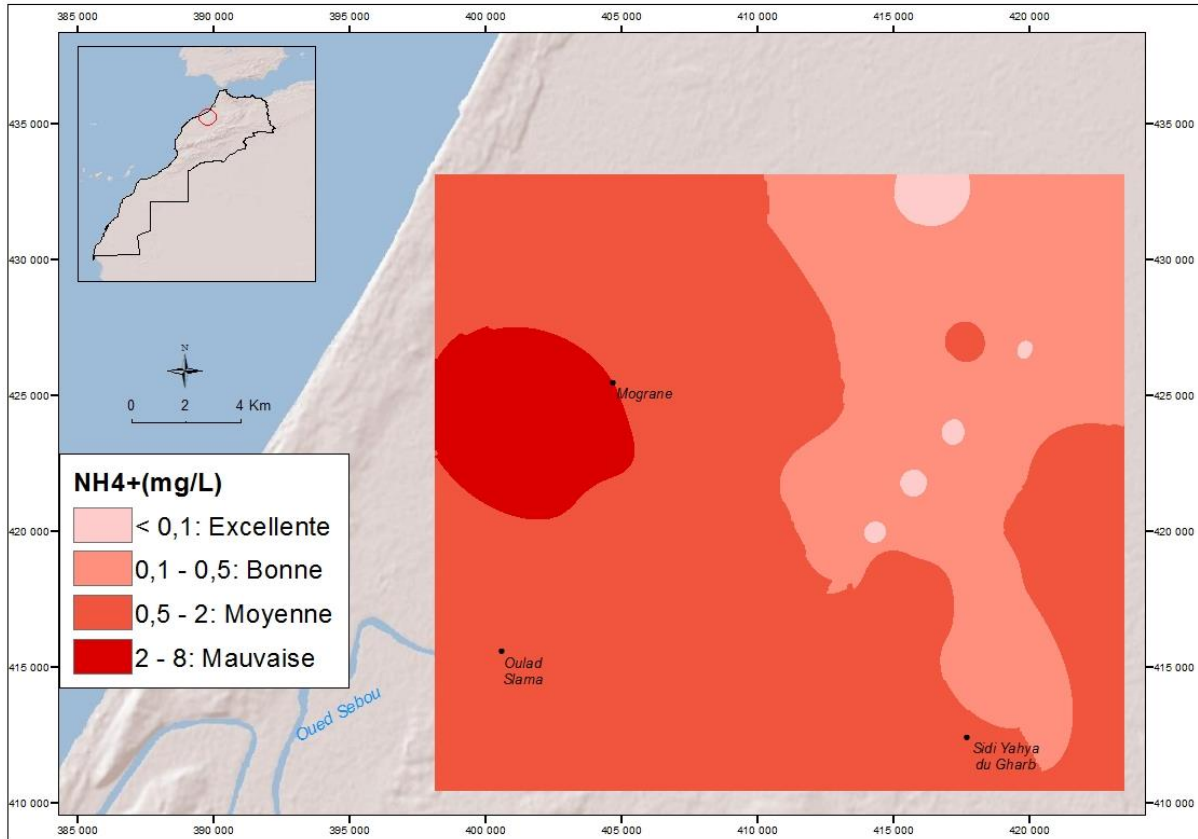


**Figure 70 :** Diagramme des teneurs d’ammonium des eaux souterraines de la zone d’étude.

Une trop grande assimilation du  $NH_4^+$  peut être néfaste sur la croissance de plusieurs espèces végétales lorsque celui-ci est absorbé comme principale source d’azote (**Kotsiras et al., 2005 ; Kende, 2010**).

D’après l’étude réalisée par **Al-Qawati et al. (2015)**, sur l’analyse et le contrôle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines à Sidi Allal Tazi-Gharb-MAROC, ils ont montré que les concentrations en ammonium dans 95% des puits et en Nitrates dans 68,2% des puits sont plus élevées que les normes OMS, ce qui indique la présence d’une pollution azotée qui peut provenir des déchets organiques, des engrais utilisés excessivement dans l’agriculture et des rejets domestiques ou industriels. Donc, l’eau de la nappe de cette région n’est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation.

La répartition spatiale d’ammonium des eaux souterraines est présentée par la carte de la figure 71.



**Figure 71** : Carte d'interpolation spatiale des teneurs en ammonium des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

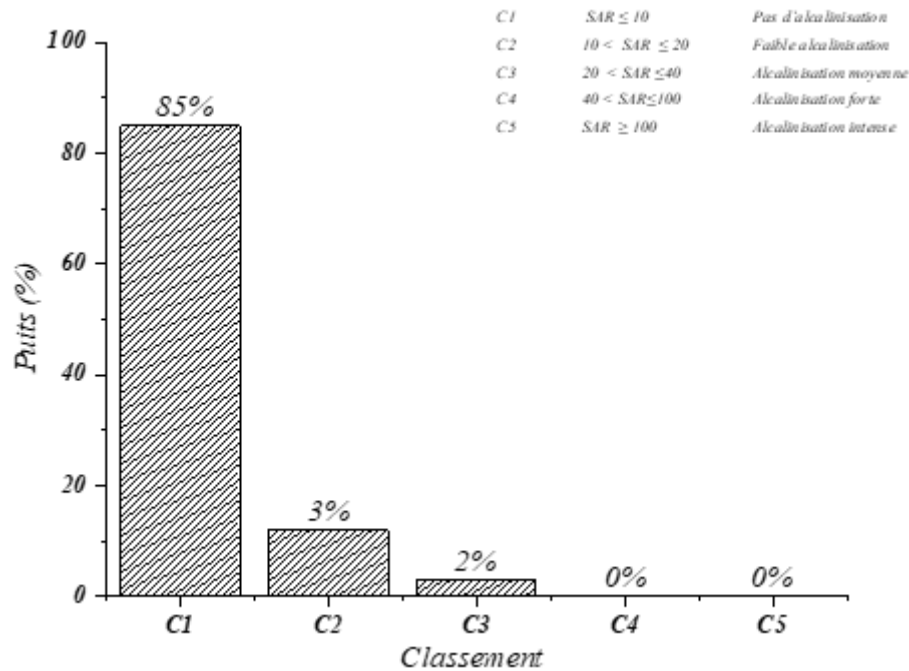
D'après la carte de répartition spatiale de l'ammonium dans les eaux d'irrigation, on constate que les eaux qui contiennent les teneurs les plus élevées en cet élément sont situées dans la partie ouest de la zone. L'ammonium est lui-même peu toxique mais il peut provoquer plusieurs problèmes tels que la corrosion des conduites, la reviviscence bactérienne à l'intérieur de celles-ci, la diminution de l'efficacité du traitement au chlore et le développement de microorganismes responsables de saveurs et d'odeurs désagréables (Arauzo et Valladolid, 2013).

Au niveau du milieu naturel, sur les plantes, cela entraîne un déséquilibre dans leur alimentation et augmente leur fragilité vis-à-vis d'autres facteurs secondaires de stress (Dejoux et al., 2000). Suivant les caractéristiques physico-chimiques des sols et des eaux cela peut déboucher, soit sur un enrichissement en azote, soit sur une acidification avec disparition de la faune et de la flore dans les cas extrêmes (Michaud, 2009).

## 10. Alcalinité des eaux

L'alcalinité des eaux d'irrigation est évaluée en utilisant le SAR. Plus le SAR est grand, plus l'eau présente un risque de sodicité du sol du fait de l'échange qui s'opérera à l'équilibre entre  $\text{Na}^+$  de la solution du sol et  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  du complexe absorbant (Mdani, 2008).

Les valeurs du SAR, calculées à partir des bilans ioniques (Annexe), sont variables. Elles oscillent entre 0,5 et 27  $\text{mol}^{1/2} \cdot \text{L}^{-1/2}$  avec une moyenne de 5,17  $\text{mol}^{1/2} \cdot \text{L}^{-1/2}$ .



**Figure 72** : Diagramme du SAR des eaux souterraines de la zone d'étude.

D'après le graphe de distribution du SAR (Figure 72), on constate que 85 % des eaux d'irrigation analysées ont un SAR inférieur à 10 et par conséquent, n'ont pas un pouvoir alcalinisant, alors que 12% de ces puits ont un pouvoir alcalinisant relativement faible, puis 3% des échantillons analysés sont considérés comme étant des puits qui ont une alcalinisation moyenne.

Le sodium échangeable a un impact significatif sur les propriétés physiques et chimiques des sols. À mesure que la teneur en sodium échangeable augmente, le sol a tendance à se disperser, devient moins perméable à l'eau et difficile à travailler (Ouyse, 2005).

Les résultats obtenus dans la région d'étude montrent que la majorité des eaux souterraines sont non alcalinisées (85%). Nos valeurs sont similaires à celles trouvées en Arabie Saoudite par

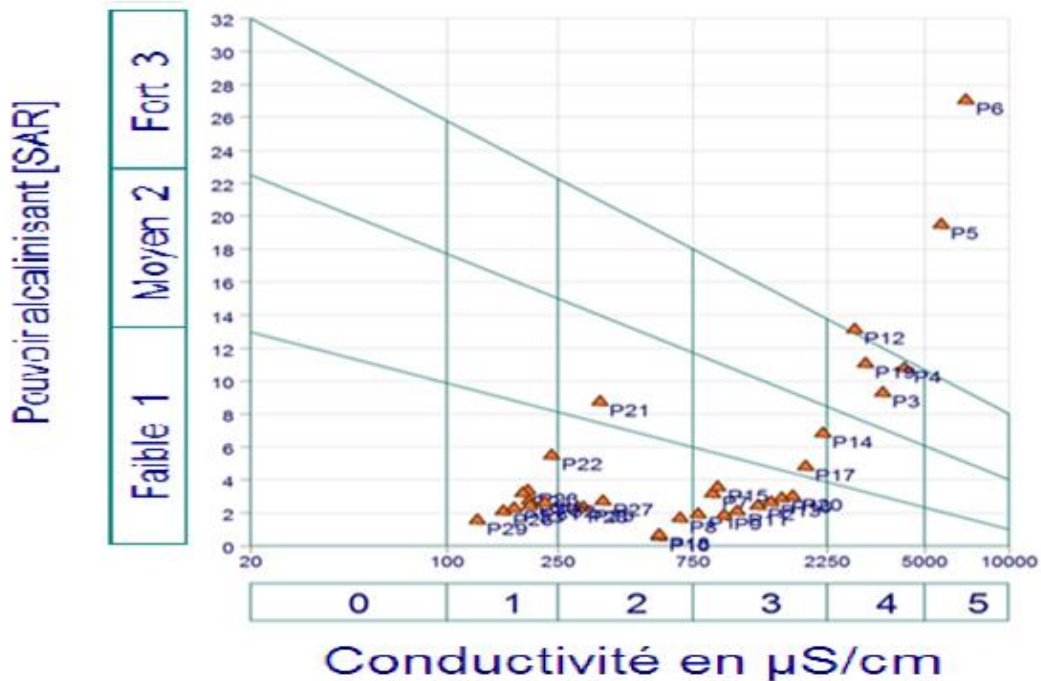
**Al-Ahmadi (2013)**. Il s'agit de valeurs allant de 0,3 à 3,5 mol<sup>1/2</sup>. L<sup>-1/2</sup>, avec une moyenne de 1,7 5 mol<sup>1/2</sup>. L<sup>-1/2</sup>. Cette eau est ainsi impropre à la consommation humaine mais reste utilisable dans le domaine agricole, sans risque pour le sol et les cultures.

L'utilisation du diagramme de classification américaine (**Richards 1954**), permet d'affecter à chaque eau une qualité en termes de risques de salinisation et d'alcalinisation courus lorsque cette eau est utilisée pour l'irrigation (Figure 73). C'est une des méthodes la plus couramment employées pour évaluer le potentiel de risque par détermination de coefficient d'absorption de sodium (SAR) (**Aggouni et al., 2012**). La répartition des classes de salinité et d'alcalinité des eaux étudiées est rassemblée dans le tableau 51. On remarque que les classes qui dominant sont C1-S1, C3-S1, C2-S1, et C4-S3.

**Tableau 51** : Répartition des classes de salinité et d'alcalinité des eaux d'irrigation de périmètre de Sidi Yahya Gharb selon les norme américaines (**Richards, 1954**).

Classe de salinité et d'alcalinité	Nombre de puits	% puits
<b>C1-S1</b>	9	27,3
<b>C2-S1</b>	6	18,2
<b>C2-S2</b>	1	3,0
<b>C3-S1</b>	9	27,3
<b>C3-S2</b>	2	6,0
<b>C4-S3</b>	4	12,2
<b>C5-S4</b>	2	6,0

Il s'ensuit que la qualité des eaux d'irrigation de Sidi Yahya Gharb est généralement admissible pour être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols.



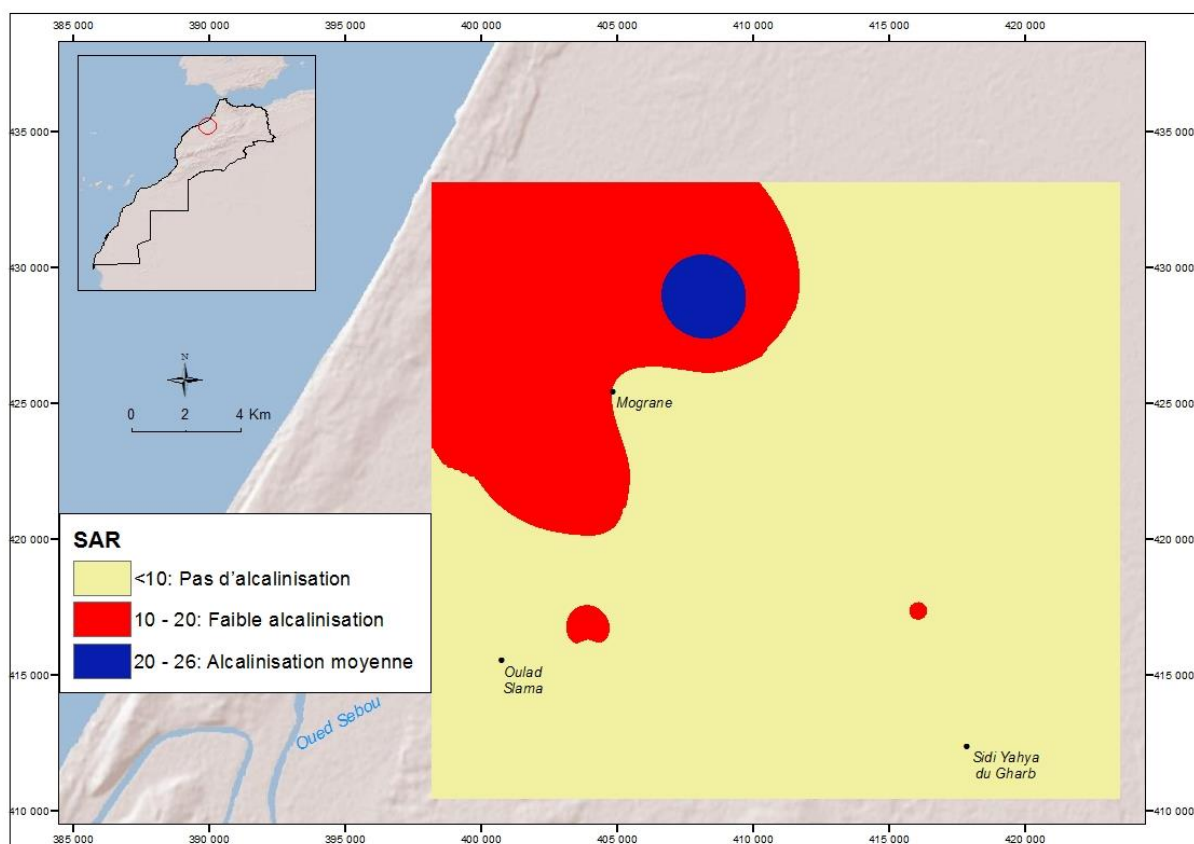
**Figure 73** : Diagramme de l'alcalinité (SAR) et de la salinité des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb.

**SAR** : Rapport d'adsorption du sodium ( $\text{mol}^{1/2} \cdot \text{L}^{-1/2}$ ).

**CE** : Conductivité électrique à 25 °C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Il s'ensuit que l'eau d'irrigation de Sidi Yahia présente un risque élevé de salinisation et un risque faible à élevé d'alcalinisation. Les eaux souterraines des classes C3-S1 et C3-S2 sont considérées comme de qualité moyenne pour irriguer les cultures semi-tolérantes, alors que celles des classes de salinité élevée (C4-S3) et (C5-S4) ne sont pas adaptées à l'irrigation dans des conditions normales (Hamadaoui et al., 2018), mais peuvent être utilisées pour les plantes tolérantes au sel sur un sol perméable avec des pratiques de gestion spéciales (Khodapanah et al., 2009).

La répartition spatiale du SAR des eaux de la région d'étude est présentée dans la figure 74.



**Figure 74** : Carte d'interpolation spatiale du SAR des eaux souterraines dans le périmètre de Sidi Yahya Gharb

D'après la carte de répartition spatiale du SAR des eaux d'irrigation, on constate que les eaux qui présentent les SAR les plus élevées sont situées dans la partie Nord-Ouest de la zone.

Le pourcentage de sodium (% Na) représente la relation sodique entre  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  et  $Mg^{2+}$ . C'est un critère important pour caractériser la qualité de l'eau d'irrigation et évaluer le risque associé au sodium (Doneen, 1964), car le remplacement du calcium et du magnésium adsorbés par le sodium endommage la structure du sol et devient compact et imperméable (Raju, 2007 ; Hosseinifard et Aminiyan, 2015). Des niveaux élevés de sodium dans l'eau d'irrigation entravent souvent le développement des plantes (Srinivasamoorthy et al., 2012). De plus, 15% des puits ne sont pas adaptés à l'irrigation. En effet, dans l'eau d'irrigation à forte concentration de sodium, cet ion a tendance à être absorbé par les particules d'argile, ce qui déplace les ions Ca et Mg, réduisant ainsi la perméabilité du sol (Yidana et al., 2010).

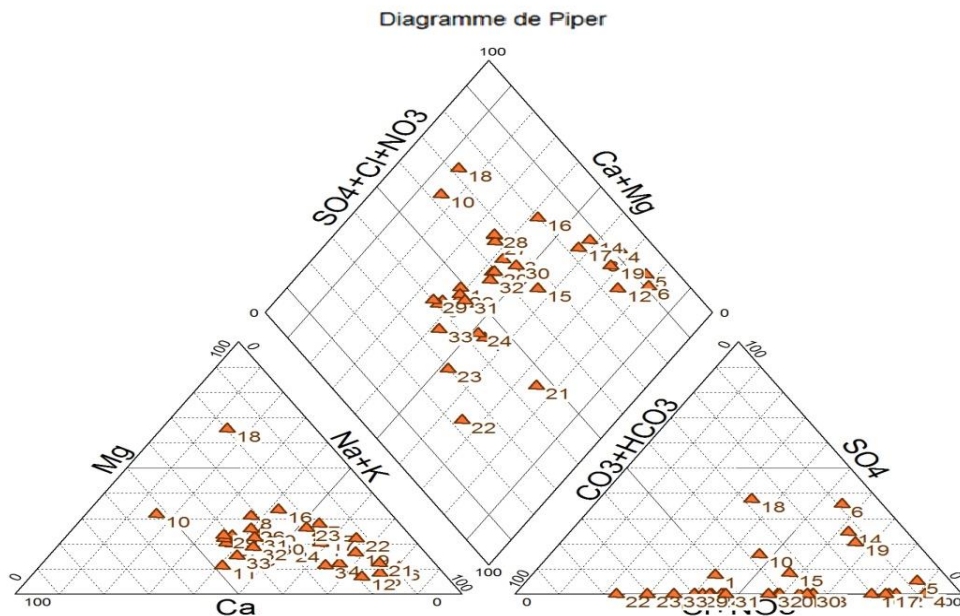
## 11. Hydrochimie

### ❖ Diagramme de Piper

Ce diagramme montre que les eaux de l'aquifère présentent une variabilité dans les faciès chimiques tels que chlorure-calcium, sulfate-calcium, chlorure-sodium, sulfate-sodium et bicarbonate-calcium (**Gouaidia et al., 2012**). L'objectif de notre étude est d'identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir une indication sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux de chaque puits dans l'espace et par suite de la nappe superficielle de la région étudiée. Pour atteindre cet objectif, nous avons traité les résultats en utilisant le logiciel Diagrammes 6.0 de Piper (**Simler, 2009**).

Le diagramme de Piper a montré que tous les échantillons ont une dominance respective des ions chlorure, sulfate et bicarbonate pour les anions, tandis que le magnésium est le cation qui indique la majorité des échantillons, suivi par le sodium. Le diagramme de Stabler montre que le faciès chloruré calcique et le faciès chloruré sodique sont les plus prédominant (29%), suivi par le faciès bicarbonaté calcique (26%). Le faciès bicarbonaté sodique représente seulement 16% (Figure 75).

Les résultats expérimentaux obtenus sont similaires à ceux trouvés par **EL Khodrani et al. (2016)**, dans une étude de qualité de 17 puits dans la région de Sfafia Sidi Slimane, dans laquelle ils ont montré l'existence des faciès chlorurés sulfatés et calciques-magnésiens.



**Figure 75** : Diagramme de Piper des eaux souterraines de Sidi Yahya Gharb.

Les eaux étudiées acquièrent donc les caractéristiques chimiques des formations rocheuses dans lesquelles elles circulent. En effet, comme l'avaient mentionné des auteurs (**Kenmogne et al., 2010 ; Zhibi et al., 2014**), la variation de la teneur de chacun des éléments dans l'eau souterraine dépend du type de roche traversé dont les compositions hydrogéologiques perméables permettent des échanges géochimiques avec son réservoir. C'est l'interaction eau roche, qui par la suite entraîne des modifications de la caractéristique chimique de ces eaux (**Earle et Krogh, 2004 ; Eblin et al., 2014**).

## **12. Etudes statistiques**

### **12.1. Analyse de variance (ANOVA)**

Les paramètres de l'eau ont été traités à l'aide de l'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) afin de vérifier s'il existe une différence entre les 6 zones (Figure 49). L'ANOVA vérifiera si les moyennes des différents paramètres de qualité pour les 6 zones sont statistiquement différentes (**Blanc et Beaudou, 1998**).

Les résultats des différents paramètres physico-chimiques mesurés sont présentés dans le tableau 52. Dans celui, on a exprimé les valeurs en moyennes  $\pm$  écarts-types. Lorsque les résultats de l'ANOVA sont statistiquement significatifs, une comparaison multiple des moyennes à l'aide du test de Duncan a été effectuée (**Duncan, 1955**).

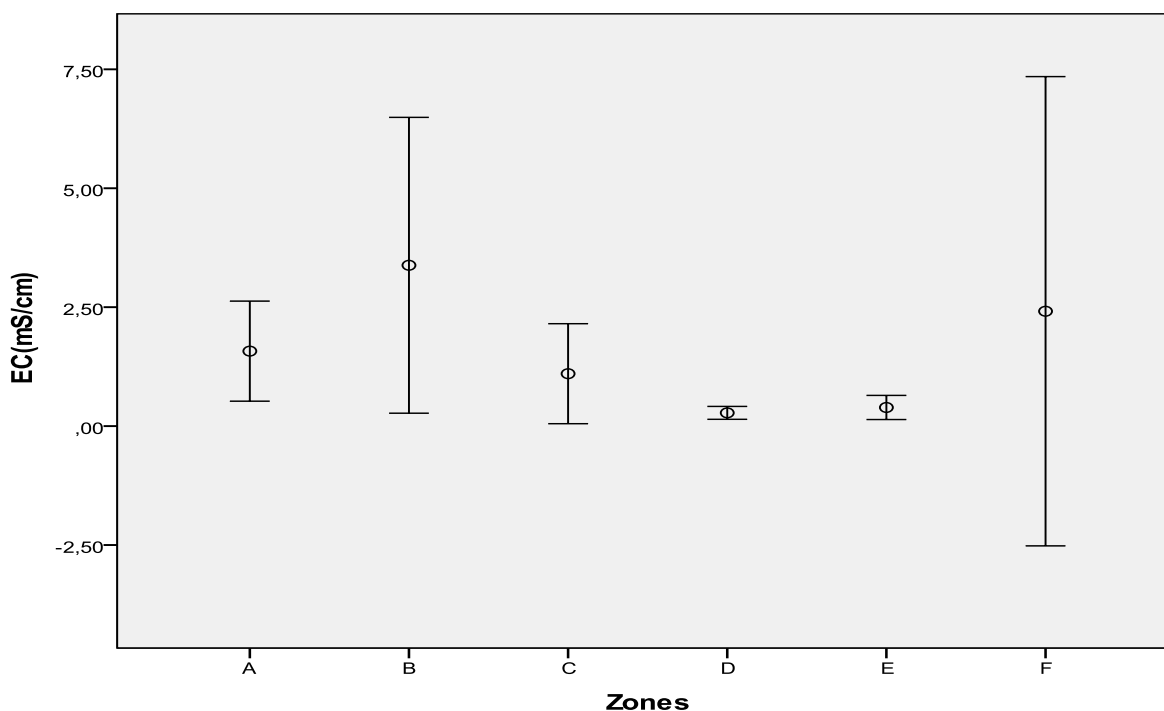
**Tableau 52** : ANOVA des paramètres physico-chimiques en fonction des zones étudiées.

Paramètres	Zones						Signification	
	A	B	C	D	E	F	Valeur F	Valeur p
<b>CE (dS/m)</b>	1,58±1,14	3,38±1,95	1,10 ±1,14	0,28±0,09	0,39±0,27	2,41±3,10	3,14	0,023
<b>pH</b>	6,80± 0,33	7,11± 0,13	7,10± 0,26	7,25±0,12	7,26±0,04	7,27±0,42	3,35	0,017
<b>Ca<sup>2+</sup> (meq/l)</b>	4,88±2,66	7,55±2,58	3,66±1,53	5,30±1,77	2,30±0,83	4,55±3,40	3,44	0,015
<b>Mg<sup>2+</sup> (meq/l)</b>	2,10±1,16	4,73±1,96	3,56±2,27	2,86±0,50	2,18±0,38	5,18±4,41	2,06	0,101
<b>Na<sup>+</sup> (meq/l)</b>	9,80±12,10	26,44±21,53	7,86±9,54	4,75±1,16	5,96±3,35	25,68±41,36	1,48	0,228
<b>K<sup>+</sup> (meq/l)</b>	0,04±0,02	0,06±0,02	0,04±0,02	0,05±0,01	0,04±0,02	0,10±0,06	2,47	0,057
<b>Cl<sup>-</sup> (meq/l)</b>	13,11±15,13	33,20±24,30	10,30±8,85	8,85±3,28	5,50±1,78	21,00±26,22	2,24	0,079
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq/l)</b>	5,21±1,63	3,87±1,10	4,53±1,84	4,25±0,64	7,35±3,93	4,50±2,98	1,62	0,188
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (meq/l)</b>	0,71±0,42	0,81±0,31	0,60±0,32	0,87±0,63	1,30±1,11	1,25±0,35	1,18	0,342
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq/l)</b>	0,88±0,63	0,36±0,61	0,15±0,20	0,01±0,00	0,01±0,00	0,13±0,22	4,84	0,003
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (meq/l)</b>	0,25±0,45	2,73±3,43	1,01±4,28	-0,42±0,74	-0,26±0,70	9,91±19,30	1,43	0,244

Nous allons détailler ci-dessous les résultats de chaque paramètre ainsi que la comparaison entre les différentes zones étudiées. Les paramètres  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$  et  $HCO_3^-$  sont exclus de cette analyse car ils n'ont pas présenté de différence significative entre les zones (valeur  $p \geq 0,05$ ).

#### ❖ Conductivité électrique

En ce qui concerne la salinité, les résultats obtenus montrent une différence statistiquement significative ( $F=3,14$  et  $p = 0,023$ ), ce qui explique que les zones étudiées ne présentent pas les mêmes niveaux de salinité en termes de conductivité électrique (Figure 76).



**Figure 76** : Répartition des moyennes de la CE en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Par la suite nous avons effectué une comparaison de moyenne par le test de Duncan qui a révélé l'existence de trois groupes non distincts (Tableau 53) :

- Le premier groupe est représenté par les zones A, C, D et E avec les plus faibles niveaux de salinité.
- Le deuxième groupe correspond aux zones A, C et F avec des niveaux de salinité intermédiaires.
- Le troisième groupe correspond aux zones A, B et F avec les niveaux de salinité les plus élevés.

**Tableau 53** : Résultats de comparaison de moyennes de la CE en fonction des zones.

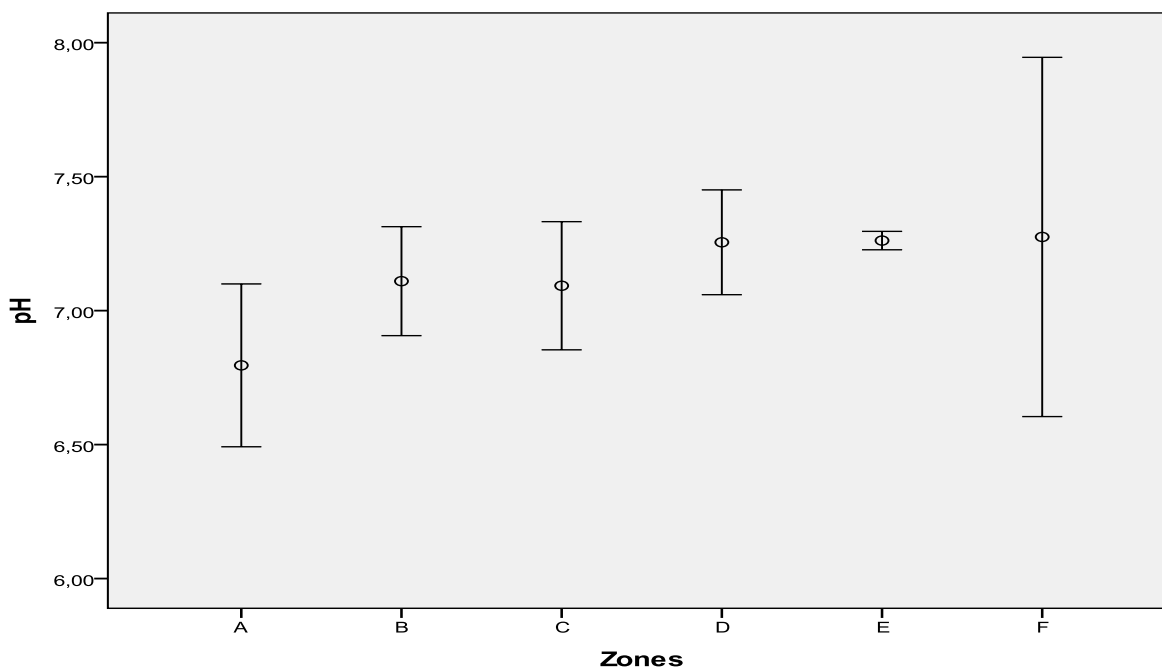
ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05		
		1	2	3
<b>D</b>	4	0,28		
<b>E</b>	7	0,39		
<b>C</b>	7	1,10	1,10	
<b>A</b>	7	1,58	1,58	1,58
<b>F</b>	4		2,41	2,41
<b>B</b>	4			3,38
<b>Signification</b>		0,20	0,18	0,07

La salinité, significativement plus élevée dans la zone B par rapport à la zone F, serait due au fait que la zone B est située vers l'aval du fleuve Sebou, ce qui implique que le sol de la zone B accumule, en plus des engrais utilisés localement, ceux émanant de la zone F et transportés par le fleuve.

Le fait que les zones B et F représentent un niveau de salinité plus élevé par rapport aux autres zones pourrait s'expliquer par la proximité de la rivière Sebou qui rend ces zones plus adaptées à la production intensive de cultures. Elles sont donc plus exposées à l'utilisation intensive d'engrais et de pesticides.

#### ❖ pH

La distribution du pH en fonction des zones a révélé une différence significative ( $F=3,35$  et  $p=0,017$ ) qui implique que ce paramètre diffère d'une zone à l'autre. En effet, les résultats de la figure 77 montrent que l'eau des zones étudiées est neutre.



**Figure 77** : Répartition des moyennes de pH en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Par la suite, nous avons effectué une comparaison multiple des moyennes en utilisant le test de Duncan qui a révélé l'existence de deux groupes différents de zones (Tableau 54) :

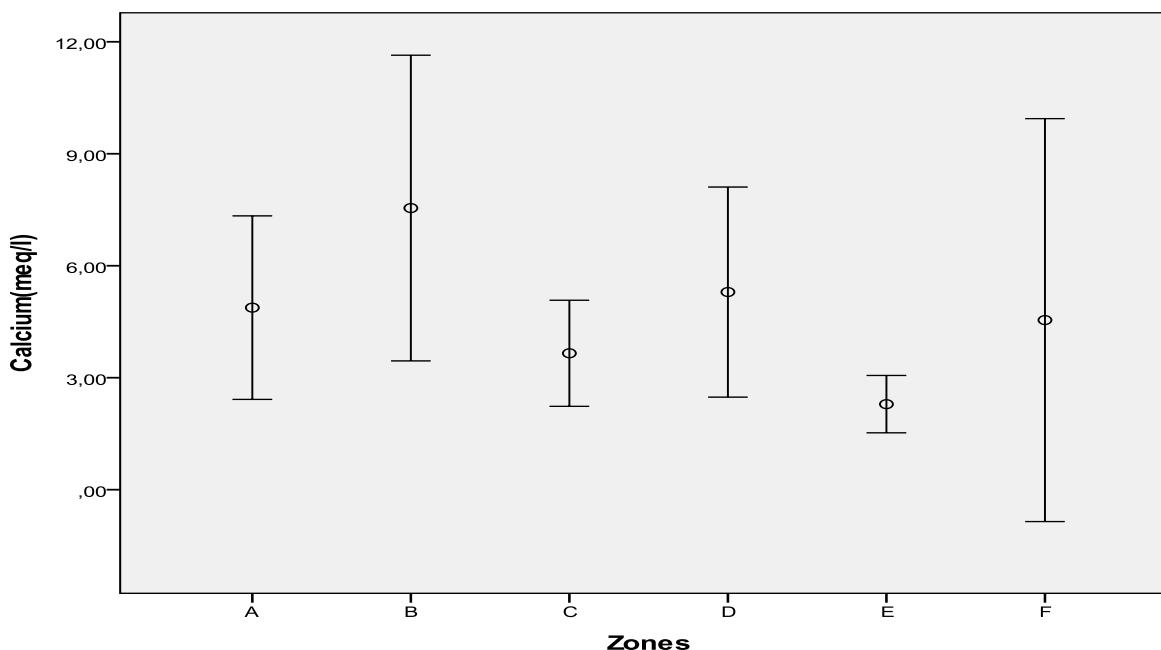
- Le premier groupe comprend les zones A, B et C avec les niveaux de pH faibles.
- Le deuxième groupe correspond les zones B, C, D, E et F avec les niveaux de pH élevés.

**Tableau 54** : Résultats de comparaison de moyennes de pH en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
<b>A</b>	7	6,80	
<b>C</b>	7	7,09	7,09
<b>B</b>	4	7,11	7,11
<b>D</b>	4		7,26
<b>E</b>	7		7,26
<b>F</b>	4		7,28
<b>Signification</b>		0,07	0,31

### ❖ Teneurs en Calcium

L'analyse a montré une différence statistiquement significative ( $F=3,44$  et  $p =0,015$ ). La comparaison de ces teneurs montre l'existence de deux groupes de zones en ce qui concerne le calcium (Figure 78, Tableau 55). On constate que la zone B présente toujours la teneur la plus élevée en calcium.



**Figure 78** : Répartition des moyennes de calcium en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

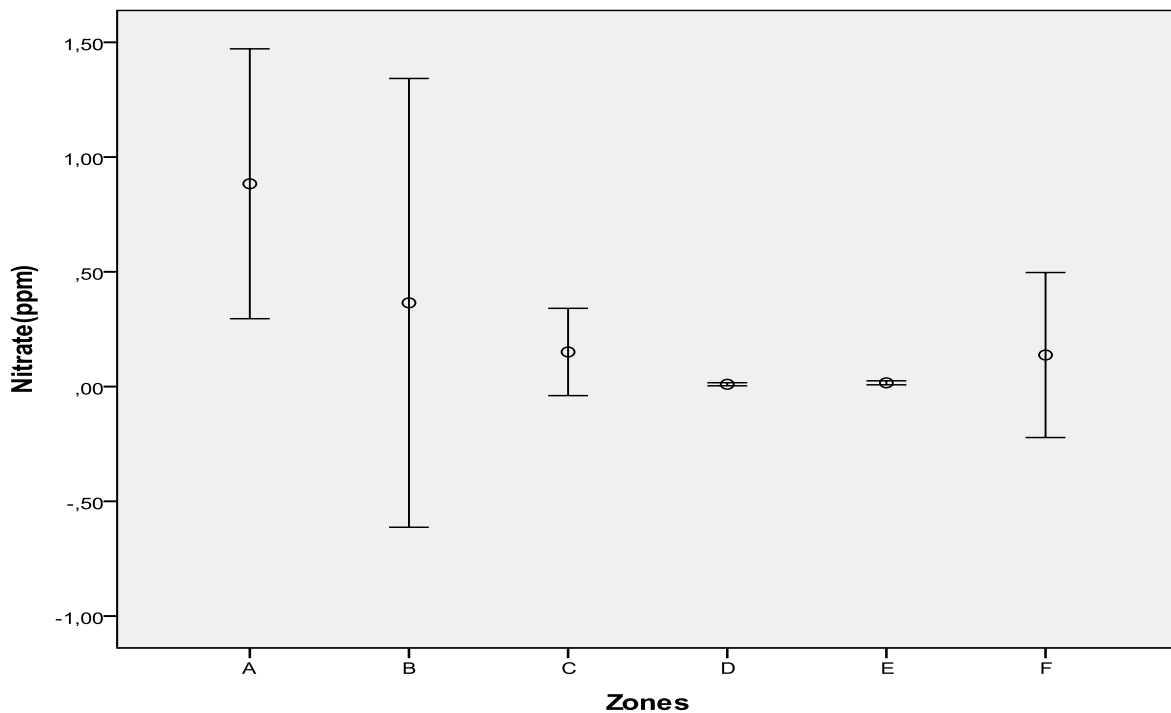
Le calcium est présent dans toutes les eaux souterraines. La plupart de leurs concentrations dans les eaux naturelles pourraient être dues à l'altération chimique et à l'érosion des roches et des minéraux contenant du calcium, tels que le calcaire, la magnétite, l'aragonite et la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).

**Tableau 55** : Résultats de comparaison de moyennes de Ca en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
E	7	2,29	
C	7	3,65	
F	4	4,54	
A	7	4,88	4,88
D	4	5,30	5,30
B	4		7,55
<b>Signification</b>		0,05	0,07

### ❖ Teneurs en nitrates

Comme les autres paramètres, les nitrates présentent des teneurs significativement différentes entre les zones d'étude ( $F=4,84$  et  $p=0,003$ ). La comparaison de ces teneurs montre l'existence de deux groupes (Figure 79). En effet, la zone A (située vers l'amont de la rivière Sebou) est la plus concernée par la forte teneur en nitrates. Cela est dû, principalement, à une mauvaise utilisation des engrais azotés, ainsi qu'à la technique d'irrigation utilisée (irrigation de surface). En fait, l'excès d'azote généré pollue les eaux souterraines (Belghiti et al., 2013 ; Bouknana et al., 2014).



**Figure 79** : Répartition des moyennes des nitrates en fonction des zones étudiées, les cercles représentant les moyennes et les barres représentant les écarts-types.

Après nous avons effectué une comparaison de moyenne par le test de Duncan qui a révélé l'existence de deux groupes (Tableau 56) : la zone A seule avec une valeur moyenne de  $\text{NO}_3$  de 0,88 meq/l alors que toutes les autres zones forment ensemble un groupe homogène avec des valeurs moyennes de  $\text{NO}_3$  allant de 0,01 meq/l (zone D) à 0,36 meq/l (zone B).

**Tableau 56** : Résultats de comparaison de moyennes de NO<sub>3</sub> en fonction des zones.

ZONES	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
D	4	0,01	
E	7	0,02	
F	4	0,14	
C	7	0,15	
B	4	0,36	
A	7		0,88
<b>Signification</b>		0,20	1,00

En effet, un bon moyen d'arrêter le cycle des nitrates est d'utiliser moins d'engrais. Selon la nature de la culture et les conditions du sol, certaines plantes n'utilisent que la moitié de l'engrais qu'applique un agriculteur en laissant le reste s'évaporer ou s'infiltrer dans les eaux souterraines. Aussi, l'engrais et l'irrigation vont main dans la main, et la conservation de l'eau d'irrigation permet de réduire l'utilisation d'engrais. En outre, l'établissement de normes d'azote pour chaque culture aidera les agriculteurs à utiliser la quantité appropriée de ce nutriment. Finalement, la réglementation de l'utilisation d'engrais commercial semble être une priorité pour éviter la dégradation des eaux souterraines de la pollution par les nitrates.

## 12.2. Matrice de corrélations et analyse en composantes principales

La matrice des coefficients de corrélation entre les différentes paires de propriétés physico-chimiques des eaux est présentée dans le tableau 57. Il existe de nombreux coefficients de corrélation hautement significatifs (valeur  $p < 0,01$ ).

L'analyse de corrélation inter-élémentaire au cours de cette étude montre :

- Une forte corrélation entre CE et chlorure, magnésium, sodium, calcium, dureté et pourcentage de sodium échangeable et sulfate ( $p \leq 0,01$ ) et une corrélation modérée avec potassium ( $p \leq 0,05$ ).
- Une forte corrélation entre sodium, magnésium, chlorure, calcium, sulfate, pourcentage de sodium échangeable et dureté ( $p \leq 0,01$ ) et une corrélation modérée entre chlorure ( $p \leq 0,01$ ) et ammonium ( $p \leq 0,05$ ).

- Une forte corrélation entre calcium, chlorure, pourcentage de sodium échangeable et dureté ( $p \leq 0,01$ ) et une corrélation modérée avec sulfate ( $p \leq 0,05$ ), magnésium et ammonium ( $p \leq 0,01$ ).
- Une forte corrélation entre chlorure et pourcentage de sodium échangeable et dureté ( $p \leq 0,01$ ) et une corrélation modérée avec sulfate et ammonium ( $p \leq 0,01$ ). Une corrélation forte existe entre magnésium, chlorure, sulfate et pourcentage de sodium échangeable et dureté ( $p \leq 0,01$ ) ainsi qu'entre pourcentage de sodium échangeable et dureté et une corrélation négative avec RSC ( $p \leq 0,01$ ). Enfin, une corrélation négative existe entre pH, CE, calcium, dureté ( $p \leq 0,01$ ), sodium, chlorure et pourcentage de sodium échangeable ( $p \leq 0,05$ ).

**Tableau 57** : Matrice de corrélation pour les propriétés des eaux souterraines.

Variables	pH	CE	Na	K	Ca	Mg	CO3	HCO3	Cl	NO3	NH4	SO4	SAR	RSC	TH
<b>pH</b>	1,00														
<b>CE</b>	-0,46**	1,00													
<b>Na</b>	-0,38*	0,93**	1,00												
<b>K</b>	0,14	0,35*	0,23	1,00											
<b>Ca</b>	-0,55**	0,81**	0,76**	0,29	1,00										
<b>Mg</b>	-0,26	0,80**	0,82**	0,38*	0,62**	1,00									
<b>CO3</b>	0,14	0,01	0,12	-0,04	0,00	0,15	1,00								
<b>HCO3</b>	-0,17	0,00	0,18	-0,26	-0,07	-0,03	0,29	1,00							
<b>Cl</b>	-0,42*	0,96**	0,93**	0,36*	0,89**	0,76**	0,04	0,03	1,00						
<b>NO3</b>	-0,35*	0,07	-0,04	-0,21	0,00	-0,16	-0,22	-0,08	-0,09	1,00					
<b>NH4</b>	-0,12	0,56**	0,42*	0,30	0,46**	0,28	-0,11	-0,23	0,56**	0,14	1,00				
<b>SO4</b>	-0,23	0,65**	0,80**	0,13	0,41*	0,79**	0,12	0,17	0,57**	0,03	0,04	1,00			
<b>SAR</b>	-0,37*	0,91**	0,99**	0,31	0,73**	0,77**	0,14	0,24	0,93**	-0,08	0,42*	0,74**	1,00		
<b>RSC</b>	0,31	-0,74**	-0,61**	-0,44*	-0,79**	-0,72**	0,20	0,58**	-0,73**	0,00	-0,47*	-0,44*	-0,55**	1,00	
<b>TH</b>	-0,49**	0,89**	0,86**	0,36*	0,96**	0,83**	0,06	-0,06	0,93**	-0,061	0,43*	0,59**	0,82**	-0,84**	1,00

\*\* : Les coefficients de corrélation sont significatifs au niveau de 0,01

\* : Les coefficients de corrélation sont significatifs au niveau de 0,05

Tous les autres coefficients de corrélation n'étaient pas significatifs (valeur  $p > 0,05$ ). En particulier, le nitrate n'est corrélé à aucune des autres propriétés des eaux. Cela apparaîtra clairement dans les résultats de l'ACP comme une composante principale distincte.

Sur la base du critère de Kaiser (valeur propre supérieur à 1), trois composantes principales doivent être conservées. L'information extraite représente 83,2% (Tableau 58), ce qui représente plus que trois quarts de l'information totale.

**Tableau 58** : Valeurs propres, variances, et variances cumulées des composantes principales.

Composante principale (CP)			
	Valeurs propres	% Variance	% Variance cumulées
<b>1</b>	6,4	57,8	57,8
<b>2</b>	1,6	14,3	72,2
<b>3</b>	1,2	11,0	83,2

La première composante principale (CP1) a conservé 57,8% de l'information totale qui était contenue dans les 11 propriétés initiales de l'eau, tandis que la deuxième composante (CP2) a conservé 14,3% de cette information, enfin la troisième composante principale a conservé 11% (Tableau 58).

La première composante principale (CP1) était principalement fortement corrélée positivement à CE, Na, Ca, Mg, Cl, SAR et la dureté (de 0,865 à 0,976) (Tableau 59, Figure 80).

**Tableau 59** : Chargements des propriétés physico-chimiques des eaux souterraines sur les composantes principales.

Propriétés du sol	Composantes principales (CP)		
	CP1	CP2	CP3
<b>pH</b>	-0,43	<b>-0,74</b>	-0,12
<b>CE</b>	<b>0,95</b>	0,15	-0,01
<b>Na</b>	<b>0,95</b>	0,04	0,18
<b>Ca</b>	<b>0,88</b>	0,18	-0,09
<b>Mg</b>	<b>0,87</b>	-0,16	0,01
<b>CO3</b>	0,08	-0,41	<b>0,65</b>
<b>HCO3</b>	-0,01	0,15	<b>0,91</b>
<b>Cl</b>	<b>0,98</b>	0,05	0,02
<b>NO3</b>	-0,11	<b>0,82</b>	-0,11
<b>SAR</b>	<b>0,93</b>	0,03	0,24
<b>TH</b>	<b>0,96</b>	0,07	-0,06

Les valeurs en gras correspondent à des chargements supérieurs à 0,6.



- Les échantillons 5 et 6 sont caractérisés par les plus hauts niveaux de CE (5,7 et 6,99 mS/cm) et parmi les plus hauts niveaux de Na (55,04 et 87,72 méq/L), Cl (62 et 60 meq/L), SAR (19,5 et 27,1 mol/L), TH (54,5 et 66,25 °F) et Ca (10 et 9,51 meq/L) ainsi qu'un niveau moyen de Mg (5,93 et 11,57 meq/L). Ces deux échantillons sont caractérisés par des eaux modérément salines, minéralisées avec une alcalinisation élevée et très dure.
- Échantillons 1 et 15 sont caractérisés par un pH neutre (6,6 et 7,76), et le premier a un niveau élevé de  $\text{NO}_3^-$  (1,8 meq/l), tandis que le second est caractérisé par niveau plus faible de  $\text{NO}_3^-$  (0.03 meq/l). Par conséquent, l'échantillon 1 est neutre et riche en azote, tandis que l'échantillon 15 est peu basique et pauvre en  $\text{NO}_3^-$ .
- Les échantillons 22 et 23 sont caractérisés par les niveaux les plus élevés de  $\text{HCO}_3^-$  (15,3 et 7 meq/L) et de  $\text{CO}_3$  (1,5 et 3,5 meq/L). Donc les deux puits présentent un risque de sodicité pour le sol.
- De nombreux échantillons qui se trouvent autour de l'origine des plans CP (2, 13, 12, 14, 17, 18, 23, 25, 30, etc.) sont caractérisés par des niveaux intermédiaires des différentes propriétés des eaux, avec l'eau potable et irrigable, de pH neutre, et moyennement minéralisées.

## Conclusion

Les ressources en eau sont menacées de nos jours par la pollution qui cause la dégradation de la qualité de l'eau. Les polluants superficiels peuvent s'infiltrer à travers le sol vers les nappes. Le danger de la pollution dépend des types et des concentrations des polluants. Nous avons évalué la qualité physico-chimique des eaux souterraines de 33 puits de la région de Sidi Yahya Gharb-Maroc.

L'analyse de la qualité globale des eaux souterraines de la région de Sidi Yahya de Gharb montre que le pH des eaux étudiés sont neutres à faiblement basiques.

La carte de répartition spatiale de la salinité montre qu'il existe un gradient nord-sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au nord-ouest et un risque d'alcalinisation relativement faible. En effet, plus que 90% des eaux d'irrigation analysées ont un SAR inférieur à 10.

La carte de chlorure montre que la zone Nord-Ouest est caractérisée par un niveau très élevé en chlorures, le centre est caractérisé par un niveau moyen, tandis que la partie Nord-Est est caractérisée par un niveau faible. Globalement, le risque de toxicité aux chlorures est faible, et ces eaux ne présentent pas de risque de sodicité dans la mesure où les eaux présentent un RSC très faible. Les teneurs en nitrates sont faibles ; 88% des puits ne dépassent pas le seuil de pollution recommandé par l'OMS (50mg/L). Par ailleurs, la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude sont douces à modérément douces.

Le diagramme de Piper a montré que tous les échantillons ont une dominance respective des ions chlorures, sulfates et bicarbonates pour les anions, tandis que le magnésium est le cation le plus dominant, suivi par le sodium.

En fin, l'étude statistique montre qu'il y'a une différence significative entre les zones en termes de CE, pH, Ca et NO<sub>3</sub> pour les eaux souterraines destinées à l'irrigation.

Dans l'ensemble, cette étude a permis de réaffirmer la pollution des eaux souterraines de la nappe du Gharb du fait de l'intensification agricole que connaît la région de Sidi Yahya. Il est par conséquent important de suivre la qualité de l'eau par des outils adaptés afin de corriger et préserver la nappe du Gharb qui reste une source importante aussi bien pour les eaux d'irrigation que pour l'alimentation en eau potable pour cette région.

# Conclusion Générale

La zone de Sidi Yahia Gharb, située dans la préfecture de Kenitra, région de Rabat Salé Kenitra, est une zone fortement dominée par les activités d'agro-élevages. Les activités agricoles sont parmi les activités humaines qui influent fortement les paysages et les écosystèmes naturels. Depuis plus d'un demi-siècle, l'agriculture utilise des quantités importantes de pesticides et d'engrais chimiques, dans le but d'améliorer le rendement de la production agricole d'une façon importante. Ces engrais chimiques et pesticides contiennent des polluants, notamment des métaux lourds, qui représentent un danger significatif pour l'environnement et la santé humaine et animale.

L'étude réalisée dans ce travail nous a permis de caractériser la qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation et des sols agricoles du périmètre de Sidi Yahya Ghrab, qui représentent le périmètre de production agricole le plus important de la région. Nous avons pu constater l'impact de l'intensification agricole, aggravée par les effets du changement climatique, sur la qualité des eaux et des sols de ce périmètre. Les résultats de cette étude ont montré que le périmètre de Sidi Yahya Gharb est caractérisé par des eaux souterraines ayant des pH neutres à faiblement basiques. La carte de répartition spatiale de la salinité montre qu'il existe un gradient nord-sud général, les valeurs les plus élevées étant situées au nord-ouest, avec un risque d'alcalinisation relativement faible. En effet, plus que 90% des eaux d'irrigation analysées ont un SAR inférieur à 10. La répartition spatiale des chlorures montre que la zone Nord-Ouest est caractérisée par un niveau très élevé en chlorures par contre la zone Nord-Est est caractérisée par un bon niveau, le centre est caractérisé par un niveau moyen. Par conséquent le risque de toxicité aux ions chlorures est faible à moyen. De plus ces eaux ne présentent pas de risque de sodicité dans la mesure où les eaux présentent un RSC très faible. Par ailleurs, la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude sont douces à modérément douces, et la teneur en nitrates est faible ; 88% des puits ne dépassent pas le seuil de pollution (50mg/L). Le diagramme de Piper a montré que tous les échantillons ont une dominance respective des ions chlorures, sulfates et bicarbonates pour les anions, tandis que le magnésium est le cation le plus dominant, suivi par le sodium.

La majorité des sols de ce périmètre sont basiques, modérément calcaires et ne présentent pas de problème d'alcalinité. La répartition spatiale de la matière organique révèle des plages de sol riche au nord et au centre de la région, alors que la partie sud représente des sols pauvres en matière organique. Cela peut s'expliquer par l'influence du climat aride et semi-aride ainsi que par les pratiques culturales. En outre, nous avons noté que la majorité de la zone d'étude présente les

niveaux de salinité les plus faibles. Par conséquent, le sol des sites ne présente à l'heure actuelle, aucun problème de salinité. En revanche, les teneurs en phosphore assimilable sont élevées dans les horizons de surface pour les parcelles cultivées, alors que le sol marque des teneurs faibles au niveau profond dans toutes les parcelles. La carte de répartition spatiale montre que des niveaux élevés de potassium occupent la majeure partie de la zone d'étude, ce qui constitue un bon apport des plantes en cet élément essentiel à leur croissance. Cependant, la texture fine du sol (argileuse) peut constituer un risque de non disponibilité en cet élément, surtout pendant la période estivale en raison de la rétrogradation du potassium en sol argileux. Ceci donne aussi à penser à l'utilisation excessive des engrais phosphatés et potassiques qui doit être raisonnable en vue d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

Les propriétés des sols et des eaux ont été corrélées et l'analyse des composantes principales a permis de réduire les données initiales de 9 dimensions à seulement 3 composantes principales. Les méthodes statistiques multivariées telles que l'ACP et les méthodes d'interpolation spatiale telles que l>IDW sont des outils utiles pour délimiter des ressources pédologiques homogènes en vue d'une gestion optimale et durable. L'étude ANOVA a révélé que les sols agricoles de la région de Sidi Yahya Gharb montrent une différence significative entre les 6 zones A, B, C, D, E, et F en termes de calcaire total, pH, M.O et ESP. En ce qui concerne les eaux souterraines destinées à l'irrigation, il y a une différence significative entre les zones en termes de CE, pH, Ca et NO<sub>3</sub>.

Sur la base du constat qui ressort de cette étude, et afin de préserver la qualité des eaux et des sols du périmètre étudié, quelques recommandations peuvent être émises:

1. Appliquer une irrigation adéquate en mélangeant les eaux de barrage avec les eaux souterraines pour éviter l'accumulation des sels à long terme ;
2. Encourager les agriculteurs à recourir d'une façon périodique, aux analyses des sols et des eaux pour connaître ses richesses et ses déficiences et apporter rationnellement des fertilisants ;
3. Concevoir une base de données englobant les mesures et les analyses réalisées, lors du suivi des paramètres de qualité des sols et des eaux, afin de les traiter dans un système d'information géographique et ainsi faire des actualisations de l'état des ressources naturelles pour leur communication aux autorités concernées ;

4. Sensibiliser les agriculteurs aux dangers de l'utilisation des engrais de manière aléatoire et irrégulière et avoir recours à l'utilisation du compost ou de fumier pour enrichir le sol, et éviter les fertilisants chimiques ;
5. Sensibiliser les usagers à la nécessité de respecter les dispositions réglementaires dans l'intérêt de la conservation et de la protection des ressources en eau pour assurer le développement durable de la région ;
6. Construire des bassins de décantation et faire passer l'eau par des filtres avant de rejoindre les goutteurs afin de réduire le risque de colmatage ;
7. Renforcer les moyens d'exercice de la police de l'eau, et l'application des sanctions correspondantes aux usages illicites de l'eau ;
8. Contrôler les agréments de creusement des forages à la vacuité des puits et des forages abandonnés, et la soumission aux autorisations pour la plantation des agrumes pour suspendre la course au pompage des eaux souterraines ;
9. Promouvoir les aspects techniques qui ont un impact potentiel sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation. Ces aspects concernent la nature du matériel utilisé, le dimensionnement du réseau d'irrigation, le nombre des rampes, les périodes d'arrosages, etc ;
10. Inciter à une participation plus accrue des usagers à la gestion intégrée des ressources en eau et concertation de tous les opérateurs et agents économiques afin d'introduire le principe du contrat de nappe qui incitera toutes les parties prenantes à s'engager pour la sauvegarde du patrimoine hydrique de la région ;

# Références bibliographiques

- **ABHS. 2019.** Conseil du bassin hydraulique de Sebou 2019.
- **Aboutayeb R., El Yousfi B., et El Gharras O. 2020.** Impact of No-till on physicochemical properties of Vertisols in Chaouia region of Morocco. *Eurasian Journal of Soil Science*, vol 9, n°2, p 119-125.
- **ADEME. 2009.** Traçabilité des sols pollués. Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances, 123 p
- **Administration de l'hydraulique. 1991.** Ressources en eau dans le bassin de l'oued Beht (province de Khémisset). Publication de l'Administration de l'Hydraulique, Ministère des travaux Publics de la Formation Professionnelle et de la Formation des Cadres.
- **Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2005.** Toxicological Profile for Zinc. *Tox Guide Zinc*, p 352.
- **Aggouni A., Debeche A., et Demdoum F. 2012.** Etude de la qualité des eaux de surface dans la région septentrionale du bassin du Houdna. Cas du barrage du K'sob, M'Sila-Algérie. *Mém. Ing., Dép. Agro., Univ., M'Sila*, p 87.
- **Agoumi A., Debbarh A. 2006.** Ressources en eau et bassins versants du Maroc -50ans de développement 1995-2005. Centre national de documentation du Maroc, p 13-62.
- **Al-Ahmadi M.E. 2013.** Hydrochemical characterization of groundwater in wadi Sayyah, Western Saudi Arabia. *Applied Water Science*, vol 5, n°3, p 721-732.
- **AL-Qawati M., Idriss Y.A., Alemad A., Belhaili I., Marc I., Baichouti F., EL Kharrim K., et Belghyti D. 2015.** Analyse et Contrôle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines De la région Sidi Allal Tazi-Gharb-Maroc. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, p 420-429
- **Amharref M., Aassine S., Bernoussi A.S., et Haddouchi B.Y. 2007.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines: Application à la plaine du Gharb (Maroc). *Rev. Des Sci. l'Eau*, vol 20, n°2, p 185–199.
- **Antipolis S. 2003.** Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. *Plan bleu Plan bleu pour la Méditerranée*, p 80.
- **Antoni V., Arrouays D., Bispo A., Brossard M., Le Bas C., Stengel P., et Villanneau E. 2011.** L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols. *Gis Sol*, p 188.
- **Antoniadis A., Levizou E., Shaheen S.M., Sik Ok Y., Sebastian A., Baum C., Prasad M.N.V., Wenzel W.W., et Rinklebe J. 2017.** Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, vol 171, n°25, p 621–645.
- **Arai Y. 2011.** Aqueous interfacial chemistry of kaolinite for the removal of Cu(II) in the presence of birnessite : kinetic and spectroscopic studies. *Appl. Clay Sci*, vol 53, n°4, p 572-580.
- **Arauzo M., Valladolid M. 2013.** Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: Implications for the implementation of the EU Nitrates Directive. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol 179, p 94-107.

- **Arbaoui M., Benkhelifa M., et Belkhodja M. 2000.** Réponses physiologiques de quelques variétés de blé dur à la salinité au stade juvénile. *Option méditerranéenne*, n° 40, p 267-270.
- **Arveti N., Sarma M.R., Aitkenhead-Peterson J.A., et Sunil K. 2011.** Fluoride incidence in groundwater : a case study from Talupula, Andhra Pradesh. *India Environ Monit Assess*, vol 172, n° (1-4), p 427-443.
- **Atkinson P.M., Tate N.J. 1999.** *Advances in remote sensing and GIS analysis.* Wiley, The Professional Geographer, vol 9, n°1, p 23-607.
- **Ayouba M.A., Guel B. 2015.** Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *Int. J. Biol. Chem. Sci*, vol 9, n°1, p 517-533.
- **Azeez P. A., Nadarajan N. R., et Mittal D.D. 2000.** The impact of monsoonal wetland on ground water chemistry. *Pollution Research*, vol 19, n°2, p 249–255.
- **Azimi S., Cambier P., Lecuyer I., et Thevenot D. 2004.** Heavy metal determination in atmospheric deposition and other fluxes in Northern France agrosystems. *Water Air Soil Pollut*, vol 157, n°1, p 295–313.
- **Badraoui M., Merzouk A. 1994.** Changes of soil qualities under irrigation: the effect of salt accumulation on water retention by Vertisols. In CIHEAM ed., *farm water management techniques*, Rabat, Morocco, p 145-155.
- **Badraoui M., Agbani M., et Souidi B. 2000.** Evolution de la qualite des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. In : Souidi et al., eds. *Intensification agricole et qualite des sols et des eaux.* Actes du seminaire Rabat (Maroc), p 11.
- **Baedecker M.J., Back W. 1979.** Hydrogeological Process and Chemical Reactions at a Landfill. *Groundwater*, vol 17, n°5, p 429-437.
- **Baize D. 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Editions Quae. *Références et stratégies d'interprétation.* Programme ASPITET, p 410.
- **Baize D. 2000.** *Guide des analyses en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation* 2e éd, INRA- Paris, p 255.
- **Baize D. 2011.** Teneurs totales en ‘ métaux lourds ’ dans les sols français résultats généraux du programme ASPITET par Denis Baize, *Courr. L’environnement l'INRA*, p 37 – 46.
- **Baize D et Girard M.C. 2001.** coord. *Référentiel pédologique.* AFES ; Paris : INRA, p 332.
- **Baran N., Negrel Ph., Malcuit E., et Vittecoq B. 2006.** Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique : campagne de saison des pluies 2005 : résultats et comparaison avec la 1ère campagne de basses eaux (2004) et 1ère campagne de saison des pluies (2004). BRGM/RP54717-FR. p 101.
- **Barbier G. 1955.** Essai de définition de la fertilité de la terre. *Economie rurale*, vol 23, p 3-6.
- **Bauder T.A., Waskom R.M., Sutherland P.L., et Davis J.G. 2011.** *Irrigation water quality cariteria (Crop Series Irrigation).* Colorado State University. Extension Publication, Crop series/irrigation. Fact sheet no. 0.506, p 4.
- **Belghiti M.L., Chahlaoui A., Bengoumi A., et EL Moustaine R. 2013.** Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe Plio-Quaternaire dans la région de Meknès (Maroc), *Larhyss Journal*, n°14, p 21-36.

- **Ben Abbou M., Fadil F., El Haji M., et Zemzami M. 2014.** Impact anthropique sur la qualité des eaux souterraines du bassin versant de l'oued Taza (MAROC). *European Scientific Journal*, vol 10, n°5, p 1857 – 7881.
- **Ben Khaled L., Morte Gomez A., Honrubia M., et Oihabi A. 2003.** Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé avec *Rhizobium*. *Agronomie*, vol 23, n°7, p 571-580.
- **Binet S., Spadini L., Bertrand C., Guglielmi Y., Mudry J., et Scavi C. 2009.** Variability of the groundwater sulfate concentration in fractured rock slopes: a tool to identify active unstable areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, vol 13, n°12, p 2315–2327.
- **Birkinshaw S.J., Ewen J. 2000.** Nitrogen transformation component for shetran catchment nitrate transport modeling. *Journal of Hydrology*, vol 230, n° (1-2), p 1–17.
- **Blanc L., Beaudou D. 1998.** Stabilité temporelle des structures spatiales des peuplements piscicoles des régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur. *B Fr Peche Piscic*, n°348, p 23–45
- **Blanchet R. 1959.** Énergie d'absorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition des plantes, *Ann. Agron*, n°2, p 125-149.
- **Bolou-Bi E. B., Vigier N., Poszwa A., Boudot J.-P., et Dambrine E. 2012.** Effects of biogeochemical processes on magnesium isotope variations in a forested catchment in the Vosges Mountains (France). *Geochim. Cosmochim. Acta* 87, p 341-355.
- **Bouchelaghem S., Benzara S., Meradi W., et Rezkallah S. 2014.** Etude comparative de la qualité chimique et microbiologique des eaux de l'oued El kebir (Région d'El Tarf). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, vol 3, n°1, p 71-74.
- **Bouderka N., Souid K.A., Lakhili F., Lahrach A., et Benabdelhadi M. 2016.** Evaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualite des eaux souterraines de la nappe du gharb. *European Scientific Journal*. Vol 12, n°11, p 509-524.
- **Bouknana D., Hammouti B., Salghi R., Jodeh S., Zarrouk A., Warad I., Aouniti A., et Sbaa M. 2014.** Physicochemical Characterization of Olive Oil Mill Wastewaters in the eastern region of Morocco. *J. Mater. Environ. Sci*, vol 5, n°4, p 1039-1058.
- **Bouksila F., Bahri A., Berndtsson R., Persson R., Rozema J., et Van der Zee S. 2013.** Assessment of soil salinization risks under irrigation with brackish water in semiarid Tunisia. *Environmental and Experimental Botany*, vol 92, p 176–185.
- **Boulmane M., Khia A., et Abbasi H. 2017.** *Eucalyptus camaldulensis* et fertilité des sols dans la plaine de Sidi Yahya-Gharb (Nord-ouest du Maroc). *Revue « Nature & Technologie »*. B-Sciences Agronomiques et Biologiques, n°16, p 01-15.
- **Boutaleb S., Bouchaou L., Mudry J., Hsissou Y., Mania J., et Chauve P. 2000.** Hydrogeologie effect on the quality of water in the oued Issen watershed, western Upper Atlas Mountains, Morocco. *Hydrogeology Journal*, vol 8, n°2, p 230-238.
- **Bouya B., Faouzi M., Ben Abbou M., Essahlaoui A., Bahir M., Youbi N., et Hessane M.A. 2011.** L'aquifère côtier des Mnasra (plaine du Gharb, Maroc): hydrogéologie et modélisation hydrodynamique, *Comunicações Geológicas*, vol 8, n°2, p 73-81.

- **Bricha S., Ounine K., Oulkheir S., El Haloui N., et Attarassi B. 2007.** Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique Science*, vol 3, n°3, p 391- 404.
- **Bronick C.J., Lal R. 2005.** Soil structure and management: a review. *Geoderma*, vol 124, n° (1-2), p 3-22.
- **Brun T.B., Elberling B., Neergaard A., et Magid J. 2015.** Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation and Development*, vol 26, n°3, p 272–283.
- **Buchholz D.D., Brown J.R. 2004.** Soil test interpretations and recommendations handbook. Columbia, University of Missouri – College of Agriculture Division of Plant Sciences, p 32.
- **Bzioui M. 2004.** Rapport national sur les ressources en eau au Maroc. UN WATER-AFRICA, p 94.
- **Calderini D.F., Ortiz-Monasterio I. 2003.** Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. *Crop Sc.*, vol 43, n°1, p 141-151.
- **Calvet G., Villemin P. 1986.** Interprétation des analyses de terre. France, SCPA, p 24.
- **Calvet R. 2003.** Le sol propriétés et fonction, Tome 1 : Constitution et structure phénomènes aux interfaces. Ed France Agricole, p 456.
- **Calvet R. 2013.** Constitution, propriétés physiques, physicochimiques et chimiques. Organismes vivants. *Qualité des sols*. Edition France Agricole, p 678.
- **Campbell C.A. 1978.** Soil organic carbon, nitrogen and fertility. Schnitzer M., Khan S.U. (eds.) *Soil organic matter*. Elsevier, Amsterdam, p 173 - 271.
- **Campos I., Abrantes N., Keizer J.J., Vale C., et Pereira P. 2016.** Major and trace elements in soils and ashes of eucalypt and pine forest plantations in Portugal following a wildfire. *Science of the Total Environment*, vol 572, p 1363–1376.
- **Carrillo-Gonzalez R., Simunek J., Sauvé S., et Adriano D. 2006.** Mechanisms and Pathways of Trace Element Mobility in Soils, *Adv. Agron*, vol 91, n° 6, p 111–178.
- **CCME. 2007.** Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health, p 6.
- **Cetin M., Kirda C. 2003.** Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology*, vol 272, n° (1-4), p 238-249.
- **Chatain V. 2004.** Caractérisation de la mobilisation potentielle de l'arsenic et d'autres constituants inorganiques présents dans les sols issus d'un site minier aurifère, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, p 183.
- **Chopin E. I. B., Marin B., Mkoungafoko R., Rigaux A. Hopgood M. J., Delannoy E., Cancès B., et Laurain M. 2008.** Factors affecting distribution and mobility of trace elements (Cu, Pb, Zn) in a perennial grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the Champagne region of France. *Environ. Pollut.*, vol 156, n°3, p 1092-1098.
- **Coale F.J., Sims J.T., et Leytem A.B. 2002.** Accelerated deployment of an agricultural nutrient management tool: The Maryland phosphorus site index. *J. Environ. Qual.*, vol 31, n°5, p 1471-1476.
- **Comeau A., Pageau D., Voldeng H., et Brunelle A. 2006.** Les oligoéléments : Essentiels à l'établissement du couvert végétal dans les céréales. *Grandes cultures*, vol 16, n°4, p 34-36.

- **Commission de l'Union Européenne. 1998.** Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, p 16.
- **Commission Européenne. 2003.** Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, Base de données AGRITOX, Les produits phytosanitaires, la santé et l'environnement, Ministère du développement durable, de l'environnement de la faune et des parcs, p 46. .
- **Cox FR., Kamprath EJ. 1972.** Micronutrient soil tests. In Micronutrients in agriculture. Soil Sci Soc Am, Madison, Wisconsin, p 289-317.
- **Cramer G.R. 2002.** Sodium-calcium interactions under salinity stress. In: "Salinity. Environment-Plants-Molecules". Eds. A. Läuchli and U. Lüttge. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p 205-227.
- **CSRE. 2003.** Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne. p 53.
- **CWEA. 2010.** le Compendium wallon des méthodes d'échantillonnage et d'analyse réalisé par l'ISSEP.
- **Dakak H., Soudi B., Ben Mohammadi A., Douaik A., Badraoui M., et Moussadek R. 2011.** Prospection de la salinité des sols par induction électromagnétique sur la plaine du Tadla (Maroc) : tentative d'optimisation par analyse géostatistique. Scheresse, vol 22, n°3, p 178-185.
- **Dakak H. 2015.** Diagnostic et Contrôle de la Salinité et des Nitrates des Eaux et des Sols du Périmètre Irrigué de Tadla : Élaboration du Bilan Hydrologique et du Bilan de Masse d'Azote Expérimentation et Modélisation. Thèse de doctorat national.
- **Day A., Ludeke K. 1993.** Plant nutrients in desert environments. Springer: Berlin, Heidelberg: p 35.
- **Debbarh A., Badraoui A. 2007.** Irrigation et environnement au Maroc : situation actuelle et perspectives. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Matrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, Montpellier, France, p 14.
- **Debbarh A., Hammani A., Bouarfa S., et Chaumont C. 1999.** Résultats de deux années de suivi de la salinité des eaux et des sols sous drainage (station expérimentale de Souk Tlet). Séminaire Euro-Méditerranéen, p 27-29.
- **Dejoux J.F., Recous S., Meynard J.M., Trinsoutrot I., et Leterne P. 2000.** The fate of nitrogen form winter-frozen rapeseed leaves: mineralisation, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. Plant and Soil, vol 218, p 257-272.
- **Delaunois A., Ferrie Y., Bouche M., Colin C., et Rionde C. 2008.** Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols, Chambre d'agriculture. INRA, p 37.
- **Delville L. P. 1996.** Gérer la fertilité des terres dans les pays du sahel. diagnostic et conseil aux paysans. Cirad - Agritrop ([agritrop.cirad.fr/306169/](http://agritrop.cirad.fr/306169/)), p 397.
- **Denden, M., Bettaieb, T., Sahli, A., et Mathlouthi, M. 2005.** Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales. Tropicultura, vol 23, n°4, p 220-226.
- **Desbordes A. 2000.** Pollution des eau souterraines . Manuels et méthodes n° 23,éd.BRGM. cas de la Picardie. Mém. Maîtrise BG, Fac. Sci. Amiens, p 42.

- **Dhaou-El-Djabine K. 2005.** Evaluation et comportement des métaux lourds (Cd – Cr – Cu – Ni – Pb – Zn et Mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique. (El Hadjar – Annaba – Est Algérien). Influence de la végétation sur ladynam. Journal secheresse, p 112.
- **DIAEA /DRHA /SEEN. 2008** Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace Agricole, Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation -Rabat
- **DIAEA /DRHA /SEEN. 2010.** Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace Agricole, Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation -Rabat.
- **Dinon E., Gerstmans A. 2008.** L'influence du pH sur l'assimilation élément nutritifs du sol par les plantes et sur la variété des plantes, Université de Liège. France, p 4.
- **Doneen L. D. 1964.** Water quality for agriculture; Department of Irrigation . Davis: University of California. p 48.
- Douaoui A., Hartani T. 2007.** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis. HAL Id: cirad-00259785, p 6.
- **DRA. 2020.** Monographie de la Region Rabat-Sale-Kenitra, p18.
- **Drouet TH. 2010.** Pédologie, BING-F-302. Ed. Lagev, p 140.
- **Duane T. G., Raymond W. M. 2004.** Soils in our environment, 10th edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- **Duchaufour P. 1997.** Abrégé de pédologie : Sol, Végétation, Environnement. 5ème Ed, MASSON, Paris, p 520.
- **Duncan D.B. 1955.** Multiple range and multiple F tests. Biometrics, vol 11, p 1.
- Durand J.H. 1983.** Les sols irrigables. Agence de coopération Culturelle et Technique. Universitaire de France, p 339.
- **Earle S., Krogh E. 2004.** Geochemistry of Gabriola's groundwater. Shale J, n°7, p 35–42.
- **Eaton F.M. 1950.** Significance of carbonates in irrigation waters, Soil Sci, vol 69, p 243-248.
- **Eblin S.G., Soro G.M., Sombo A.P., Aka N., et Soro N., 2014.** Hydrochimie des eaux souterraines de la région. Larhyss Journal, n°17, p 193–214,
- **Ehya F., Saeedi F. 2018.** Assessment of groundwater quality in the Garmez area (Southeastern Khuzestan province. SW Iran) for drinking and irrigation uses. Carbonates and Evaporites, vol 34, n°4, p 1443–1454.
- **El Alaoui A. 2007.** Fertilisation minérale des cultures. Ed: Bulletin mensuel d'information et de liaison de PNTTA, p 1-4.
- **El Asslou J., Kholtei S., El Amrani-Paaza N., et Hilali A. 2007.** The impact of Anthropogenic activities on the quality of groundwater of the Mzamza community (Chaouia, Morocco). Rev. des Sci. l'eau, vol 20, n°3, p 309.
- **El Blidi S., Fekhaoui M. 2003.** Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, n°25, p 57–65.
- **El Haroui M. 2004.** Modélisation des transferts d'eau et d'azote dans un sol sableux stratifié (Echelle de colonne du laboratoire). Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Supérieures Approfondies (DESA). Faculté des Science de Kénitra, p 71.

- **El Khodrani N., 2018.** Evaluation de l'impact de l'agriculture sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines et des sols et sur le niveau de contamination par les métaux lourds : cas de la zone agricole de Sfafa (Sidi Slimane Gharb, MAROC). Thèse de doctorat. Faculté des Sciences, Rabat, p 159.
- **El Khodrani N., Zouahri A., Arfaoui A., Iaaich H., El Oumlouki K., Yahyaoui A., et Fekhaoui M. 2016.** Study of Physico-Chemical Quality of Groundwater in the Rural Commune of SFAFAA (Sidi Slimane Gharb, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci*, vol 7, n°8, p 2852-2860.
- **El Khodrani N., Zouahri A., Douaik A., Omrania S., Iaaich H., Nouayti A., et Fekhaoui M. 2019.** Evaluation of the level of Contamination by Heavy Metals of Agricultural Soils in the Sfafa Region (Sidi Slimane, Gharb, Morocco). *Mor. J. Chem*, vol 6, n°2, p 256-258.
- **El Khodrani N., Zouahri A., Douaik A., Omrania S., Iaaich H., Yahyaoui A., et Fekhaoui M. 2017.** Evaluation the Impact of Intensive Agriculture on Physic- Chemical Properties of Soil and Groundwater in the Rural Commune Sfafa (Sidi Slimane, Gharb, Morocco). *J. Mater. Environ*, vol 8, n°7, p 2339-2346.
- **El Malki S. 2007.** Traitement des eaux d'irrigation par des procédés membranaires et leurs effets sur la germination et la production de blé dur. Thèse de doctorat nationale, Université Ibn Tofail-Faculté des sciences, KENITRA.
- **El Oumlouki K. 2020.** L'étude de la qualité des sols et des eaux souterraines destinées à l'irrigation dans les deux périmètres irrigués d'El Guerdane et d'Issen (Plaine Souss Massa, Maroc). Thèse de doctorat. Université Ibn Tofail, p 231.
- **El oumlouki K., Moussadek R., Zouahri A., Dakak H., Chati M., et El amrani M. 2014.** Étude de la qualité physico-chimique des eaux et des sols de la région Souss Massa, (Cas de périmètre Issen), Maroc. *J. Mater. Environ*, vol 5, p 2365-2374.
- **Elhagwa A., Meheissi B., et El Basher N. 2011.** Indicators of impact of climate change on salinity distribution and land-use in Sudan Agriculture Research Corporation. Wad Medani. Sudan, Topic I : Identifying système vulnerable to salinization, including agro-ecosystems (irrigated and rainfed), soils, water bodies, biodiversity and fragile ecosystem and available tools and information systems to assess and monitor the evaluation of salinization, Proceedings of Global Forum on Salinization and Climate Change (GFSCC 2010), 25-29 October 2010. Valencia. *Environmental Geology*, p 1067–1074.
- **Er-Raioui H., Bouzid S., Khannous S., et Zouag M. 2011.** Contamination des eaux Souterraines par le lixiviat des décharges publiques : Cas de la nappe phréatique R'Mel (Province de Larache - Maroc Nord-Occidental). *Int. J. Biol. Chem. Sci*, vol 5, n°3, p 1118–1134.
- **Essington M.E. 2004.** Soil and water chemistry, an integrative approach. CRC Press, USA. p 373.
- **Ezlit YD., Smith RJ., et Raine SR. 2010.** A Review of Salinity and Sodicity in Irrigation; CRC Irrigation Futures Irrigation Matters Series no. 01/10; CRC for Irrigation Futures: Cannon Hill, Australia, p. 60
- **Ezzaouaq M. 1991.** Caractérisation hydrodynamique, physico-chimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire du Bouregreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat-Salé. Thèse D.E.S. fac. Sci. Rabat, p 140.

- Fabien G. 2016.** Le calcium dans le sol. Bulletin sol et agronomie des chambres d'agriculture des pays de la Loire, p 2.
- FAO. 1988.** Salt-affected Soils and their Management. FAO Soils Bulletin Saline Soils. Rome, Italy.
- FAO.2002.** Agriculture : towards 2015/30. Technical Interim Report, Global Perspective Studies Unit. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, Italy.
- Fatima B., Malika E.B., Fatiha E.K., Khadija E., et Driss B. 2014.** Physicochemical analysis of the wastewater of Tiflet Wadi ( Sidi Yahia , Morocco ). Basic Research Journal of Soil and Environmental Science, p 19–22.
- Faye C. 2017.** Les défis de la pollution de l'eau, une menace pour la santé publique : atouts et défauts des lois et politiques de l'eau au Sénégal. Larhyss Journal, vol 14, n°4, p 107-126.
- Fifi U. 2010.** Impacts Des Eaux Pluviales Urbaines Sur Les Eaux Souterraines Dans Les Pays En Développement – Mécanismes De Transfert Des Métaux Lourds À Travers Un sol modèle de Port au Prince, HAÏTI. hal.archives-ouvertes.fr/tel-02435912, p 260.
- François R., 2008.** Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité. Paris, p 737.
- Gallet A., Flisch R., Ryser J.P., Frossard E., et Sinaj S. 2003.** Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status. J. Plant Nutr. Soil Sci, vol 166, n°5, p 568-578.
- Gerendás J., Führs H. 2013.** The significance of magnesium for crop quality, Plant Soil, p 101-128.
- Ghazali D., Zaid A. 2013.** Etude de la qualité physico-chimique et salinisation (Région de Meknes – Maroc ). Larhyss Journal, vol 368, p 25–36.
- Gouaidia L., Boudoukha A., Djabri L. et Guefaïfia O. 2011.** Évaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien) .Sécheresse, vol 22, n°1, p 35-42.
- Gouaidia L., Guefaïfia O, Boudoukha A, Laidhemila M et Martin C. 2012.** Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). Physio-Géo, vol 6, p 141-160.
- Gouaidia L., Guefaïfia O., et Hemila M.L. 2012.** L'acquisition de la salinité des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride : cas de la nappe plio-quaternaire du bassin d'effondrement de Tébessa.1er colloque international eau et climat regards croisés Nord-Sud. Rouen. Researchgate, p 8.
- Grasso A., Bérod D., Hefti D., et Jakob A. 2011.** Monitoring de la turbidité des cours d'eau suisse. Wasser Energie Luft, p 48-52.
- Grünberger O. 2005.** Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. tel.archives-ouvertes.fr, p 355.
- Guler C., Thyne G.D., McCray J.E., et Turner A.K. 2002.** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, vol 10, p 455–474.

- **Haddad H., Ghoualem H. 2014.** Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin hydrographique côtier algérois Larhyss Journal, n°18, p 155-167.
- **Hamadaoui F., AboubakerAlzwi S., Alibrahmi E., El kharrim K., Belghyti D., et NouredineLotfi N. 2018.** Physical and Chemical Diagnosis of Lower Sebou River for Agricultural Use (GHARB - Morocco). International Journal of Environmental & Agriculture Research, vol 4, n°1, p 56-64.
- **Hammani A. 2002.** Modélisation couplée du drainage souterrain et du drainage de surface : Application à la conception du drainage agricole dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc). Doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, p 245.
- **Hao L., Tian M., Zhao X., Zhao Y., Lu J., et Bai R. 2016.** Spatial distribution and sources of trace elements in surface soils, Changchun,China: Insights from stochastic models and geostatistical analyses. Geoderma 273, p 54–63.
- **Harbouze R., Pellissier J.P., Rolland J.P., et Khechimi W. 2019.** Rapport de synthèse sur l’agriculture au Maroc. hal.archives-ouvertes.fr/hal-02137637, p 104.
- **Hassan G., Persaud N., et Reneau R.B. 2005.** Utility of hydrus-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. Soil sciences, vol 170, n°1, p 28 – 37.
- **HCEFLCD. 2006.** Etude sur la pisciculture au barrage Almassira, CR dar CHAFAAI, Cercle d’ELBROUGE, Province de Settat, p 201.
- **HCP. 2013.** Monographie regionate de la region du Gharb.Chrarda.Beni Hssen. hcp.ma/region-kenitra/attachment/647182/, p 118.
- **Henry M. T., Beaudry J. 1984.** Chimie des eaux, Quebec, Canada : Les éditions Le Griffon d’argile, p 537.
- **Hermans C., Bourgis F., Faucher M., Strasser J.R., Delrot S., et Verbruggen N. 2005.** Magnesium deficiency in sugar beets alters sugar partitioning and phloem loading in young mature leaves. Planta, vol 220, n° 4, p 541–549.
- **Herrera E. 1995.** Economics. Soil Test Interpretations. Extension Service, New Mexico State University. College of Agriculture and Home. p 4.
- **Herrero J., Ba A.A., et Aragues R. 2003.** Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. Soil Use and Management, vol 19, n°2, p 119-26.
- **Himmi N, Fekhaoui M., Foutlane A., Bourchic H., El Maroufy M., Benazzout T., et Hasnaoui M. 2003.** Relazione plankton-parametri fisici chimici in un bacino dimaturazione (laguna mista Beni Slimane – Morocco. Rivista di idrobiologia. Universitadegli studi di Perugia, dipartimento dibiologia animale ed ecologia laboratorio di idrobiologia “G.B. Grassi”, p 110– 111.
- **Hinsinger P. 2006.** Potassium. In: R. Lal, editor, Encyclopedia of Soil Science. Taylor and Francis, NY, p 1354-1358.
- **Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gerard F., Jourdan C., Laclau J. P., Le Cadre E., Jaillard B., et Plassard C. 2011.** Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail, Plant and Soil, vol 348, n° (1-2), p 29-61.

- **Hmamouchi S., Kaaouach Y., et Jabrane R. 2013.** Hydrogéologie et Qualité des eaux de la nappe du Gharb, étude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique de Sebou.
- **Horneck D.A., Sullivan D.M., Owen J.M., et Hart J.S. 2011.** Soil Test Interpretation Guide, Oregon State University. p12
- **Hosseinifard S. J., Aminiyan M. 2015.** Hydrochemical characterization of groundwater quality for drinking and agricultural purposes: A case study in Rafsanjan plain, Iran. *Water Quality Exposure and Health*, vol 7, n°4, p 531–544.
- **Hui W., Yong-ming L., Zhi-ming Q., Sheng-yi W., Shi-xiang L., Xia L., Hai-jun W., Xiao-li W., Xin-chao X., et Xin-qiang Z. 2014.** The Estimation of Soil Trace Elements Distribution and Soil-Plant-Animal Continuum in Relation to Trace Elements Status of Sheep in Huangcheng Area of Qilian Mountain Grassland, China. *Journal of Integrative Agriculture*, vol 13, n°1, p 140-147.
- **Ibnoussina M., El Haroui M., et Maslouhi A. 2006.** Expérimentation et modélisation de la lixiviation de l'azote nitrique dans un sol sableux, *C. R. Geoscience*, vol 338, n°11, p 787–794.
- **Idrissi Alalami I., Zeraoui M., Addou M., Mokhtari A., et Soulaymani A. 2007.** Évaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone côtière du Gharb (M'nasra) au Maroc entre 1993 et 2003, *Afrique Science*, vol 3, n°3, p 378 – 390.
- **IFA. 2013.** International Fertilizer Industry Association. Fertilizer indicators, 3rd edition, Paris, France, p 8.
- **IFA. 2017.** Fertilizer Outlook 2017 – 2021, Production and International Trade and Agriculture Services. International Fertilizer Association's 85th Annual Conference. Marrakech, Morocco, p 7.
- **IPTRID., FAO. 2006.** Conférence électronique sur la salinisation : Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation, p 11.
- **ISO 11047. 1998.** Soil quality – determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in aqua regia extracts of soil – Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods. International organization for standardization, Switzerland, p 18.
- **Jabeen A., Huang X.S., et Aamir M. 2015.** The Challenges of Water Pollution, Threat to Public Health, Flaws of Water Laws and Policies in Pakistan, *Journal of Water Resource and Protection*, vol 7, n°7, p 1516-1526.
- **Jameel A. 2002.** Evaluation of drinking water quality in Tiruchirappalli, Tamil Nadu. *Indian Journal of Environmental Health*, vol 44, n° 2, p 108–112.
- **Kaiser B.N., Gridley K.L., Brady J.N., Phillips T., et Tyerman S.D., 2005.** The Role of Molybdenum in Agricultural Plant Production. *Annals of Botany*, vol 96, n°5, p 745-754.
- **Kalayci M., Torun B., Eker S., Aydin M., Ozturk L., et Cakmak I. 1999.** Grain yield, zinc efficiency and zinc concentration of wheat genotypes grown in a zinc-deficient calcareous soil in field and greenhouse. *Field Crops Res*, vol 63, n°1, p 87–98.
- **Kende S. 2010.** Minéralisation de l'azote dans deux sols amendés avec deux composts enrichis d'un antibiotique. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département des sols et génie agroalimentaire : p 86.

- **Kenmogne K., Romain G., François N., Francis R., Hernanie M., Alexandre N., et Henri T. 2010.** Hydrodynamique souterraine et vulnérabilité à la pollution des ressources en eau en zone urbaine tropicale : cas du bassin versant de Mingoa (Yaoundé-Cameroun). *Journal of environmental science*, p 28-31.
- **Khlosi M., Cornelis W.M., Douaik A., Hazzouri A., Habib H., et Gabriels D. 2013.** Exploration of the interaction between hydraulic and physicochemical properties of Syrian soil. *Vadose Zone Journal*, vol 12, n°14, p 1-11.
- **Khodapanah L., Sulaiman W.N.A., et Khodapanah N. 2009.** Groundwater quality assessment for different purposes in Eshtehard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, vol 36, n°4, p 543–553.
- **Kholtei S., Bouzidi A., Bonin M., Fekhaoui M., Anane R., Sbai K., et Creppy E. 2003.** Contamination des eaux souterraines de la plaine de Berrechid dans la région de la Chaouia au Maroc par les métaux lourds dans les eaux usées : effets de la pluviométrie. *Vecteur Environnement*, vol 36, n°5, p 68-80.
- **Kloppmann W., Bourhane A. et Asfirane F. 2011.** Méthodologie de diagnostic de l'origine de salinité des masses d'eau. *Activité de service public du BRGM avec le soutien de l'ONEMA n°1900/09*. p 41.
- **Koné M., Bonou L., Bouvet Y., Joly P., et Kouliadiaty J. 2009.** Etude de la pollution des eaux par les intrants agricoles : cas de cinq zones d'agriculture intensive du Burkina Faso 2IE, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement SST. [hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00644553](http://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00644553), p 6-15.
- **Kotsiras A., Olympios C.M., et Passam H.C. 2005.** Effects of nitrogen form and concentration on yield and quality of cucumbers grown on rockwool during spring and winter in southern Greece. *Journal of Plant Nutrition*, vol 28, n°11, p 2027-2035.
- **Laghrour M. 2021.** Effet du semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols au Maroc. Thèse de doctorat, Université Mohammed V-Faculté des sciences, Rabat, p 189.
- **Laghrour M., Moussadek R., Mrabet R., Dahan R., El-Mourid M., Zouahri A., et Mekkaoui M. 2016.** Long and Midterm Effect of Conservation Agriculture on Soil Properties in Dry Areas of Morocco. *Applied and Environmental Soil Science*, vol 2016, p 1-9.
- **Lahlou M. 2002.** Elaboration et validation de deux modèles de simulation du mouvement des sels dans les sols irrigués. Thèse de doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, p 205.
- **Lamande M. 2003.** Effets de l'interaction des pratiques culturales et des communautés lombriciennes sur la structure du sol et son fonctionnement hydrique. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, p 149.
- **Lambert L. 2000.** Acides, engrais et mystères...MAPAQ St-Rémi, p 17.
- **Landmann G. 2000.** Le sylviculteur face aux changements climatiques : possibilités et limites de l'intervention humaine. *Personal communication. Rapport version 25 05 2000*, p 37-42.
- **Larmet H. 2007.** Mobilisation et transfert de Zn, Cd, Cu et des colloïdes bactériens dans les bassins d'infiltration d'eaux pluviales : Influence des conditions hydrodynamiques, Thèse de

doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement, Laboratoire des Sciences de l'Environnement de l'ENTPE, p 327.

- **Laudicina V.A., Novara A., Barbera V., Egli M., et Badalucco L. 2015.** Long-term tillage and cropping system effects on chemical and biochemical characteristics of soil organic matter in a Mediterranean semiarid environment. *Land Degradation and Development*, vol 26, n°1, p 45–53.

- **Legros J.P. 2006.** Mapping of the soils. Science Publishers, p 412.

- **Legros J.P. 2009.** La Salinisation Des Terres Dans Le monde. Conférence n°4069, Bull.40, p 257-269.

- **Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Darmendrai D., et Conil P. 2001.** Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Evaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662-FR, p 103.

- **Leone A.P., Menenti M., Buondonno A., Letizia A., Maffei C., et Sorrentino G. 2007.** A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity; *Agricultural Water Management*, vol 89, n° (1-2), p 39 – 48

- **Li Y., Gou X., Wang G., Zhang Q., Su Q., et Xiao G. 2008.** Heavy metal contamination And source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China. *J. Environ. Sci. (China)*, vol 20, n°5, p 607–12.

- **Li Y., Shi Z., Wu C-F., Li H-Y., et Li F. 2007.** Improved prediction and reduction of sampling density for soil salinity by different geostatistical methods. *Agricultural Sciences China* 6, p 832-841.

- **Lindsay W.L., Norwell W.A. 1978.** Développement of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci Soc Am J*, 42, p 421–428.

- **Liu G.N., Xue W., Tao L., Liu X.H., Hou J., Wilton M., Gao D., Wang A.J., et Li R.P. 2014.** Vertical distribution and mobility of trace elements in agricultural soils along Jishui river affected by mining in Jiangxi Province, China. *Clean – Soil Air Water*, vol 42, n°10, p 1450–1456.

- **Luo L., Ma Y., Zhang S., Wei D., et Zhu Y.G. 2009.** An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *J. Environ. Manage*, vol 90, n°8, p 2524–2530.

- **Lymbery A.J., Kay G.D., Doupé R.G., et Norman H.C. 2013.** The potential of a salt-tolerant plant (*Distichlis spicata* cv. NyPa Forage) to treat effluent from inland saline aquaculture and provide livestock feed on salt-affected farmland. *Sci.Total. Env*, p 192-201.

- **Lyons T., Werne J.P., Hollander D.J., et Murray R.W. 2003.** Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic-to-anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela. *Chemical Geology*, vol 195, n°(1-4), p 131-157.

- **Madhava Rao K.V., Raghavendra A.S., et Janardhan R.K. 2006.** Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants, AA Dordrecht, The Netherlands. p 41-99.

- **Magnani A., Ajmone-Marsan F., D'Amico M., Balestrini R., Viviano G., Salerno F., et Freppaz M. 2018.** Soil properties and trace elements distribution along an altitudinal gradient on the southern slope of Mt. Everest, Nepal, *Catena*, vol 162, p 61–71.

- **Maher H., Moussadek R., Zouahri A., Douaik A., Dakak H., El Moudane M., et Ghanimi A. 2020.** Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). E3S Web of Conferences 150, 03010, p 9..
- **Maillard J. 2001.** Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone aride :Risques et Recommandations. Handicap International, p 35.
- **MAPMDREF. 2019.** L'irrigation en agriculture : levier de développement économique et social. <https://www.fellah-trade.com/fr/actualites-maroc/article/14461>.
- **Marlet S., Job J.O. 2006.** Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec et Doc. Lavoisier, p 797 – 822
- **Martin C. 2003.** Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versants agricoles. Approche expérimentale et modélisation. Thèse de Doctorat. Université de Rennes, p 283.
- **Mashali A., Suarez D.L Nabhan H., et Rabindra R. 2005.** Integrated management for sustainable use of salt-affected soils. Rome: FAO Soils Bulletin, now printing, p 85-102.
- **Masmoudi A. 2003.** Irrigation et salinisation dans certains oasis de la wilaya de Biskra. Séminaire sur la préservation des oasis. Université de Ouargla.
- **Masmoudi A. 2011.** Effect of waters salinity and frequency of irrigation on the soil and plant. Researchgate, n°11, p 61-69.
- **Mathieu C., Pieltain F. 2003.** Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Lavoisier, Tec et Doc, Paris, p 387.
- **Mayer P.M., Reynolds S.K., Canfiel T.J., et McCutchen M.D. 2005.** Riparian Buffer Width, Vegetative Cover, and Nitrogen Removal Effectiveness: A Review of Current Science and Regulation. EPA/600/R-05/118, p 40.
- **Mcdowell R.W., Sharpley A. N. 2003.** Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. Geoderma, vol 112, n° (1-2), p 143-154.
- **Mclaughlin M.J., Zarcinas B.A., et Cook N. 2000.** Soil testing for heavy metals, Communications in Soil Science and Plant Analysis, vol 31, n° (11-14), p 37–41.
- **Mdani D. 2008.** Relation entre le couvert végétale et les conditions édaphiques en zone déficit hydrique. mém. Mag. Univ. El Hadj L. Batna, p 119.
- **MDMEMEE. 2014.** Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement chargé de l'Eau. Préservation de la qualité des ressources en eau et lutte contre la pollution, 25p.
- **Memento de l'agronome 2002.** Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Groupe de recherche et d'échanges technologiques (GRET). Ministère des affaires étrangères Paris. Jouves, p 1063.
- **Menani M.R. 2009.** The Artificial Recharge and the Groundwater Vulnerability to Pollution - Case of the El Madher Plain (North East of Algeria). European Journal of Scientific Research, vol 32, n°3, p 288-303.
- **Metternicht G.I., Zinck J.A. 2003.** Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. Remote Sensing of Environment, vol 85, n° 1, p 1-20.

- **Meybeck M. 1986.** Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. *Sci. Géol., Bull*, vol 39, n°1, p 3-77.
- **Michaud G. 2009.** Avis technique-Suivi analytique en amont des drains de captage, Rapport n°08195-101. Sainte-Luce (Qc), Mission HGE : p 105.
- **Ministère chargé de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement, 2001.**
- **Miyamoto S., Chacon A. 2006.** Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water II. Soil factors. *Landscape and Urban Planning*, vol 77, n° (1-2), p 28–38
- **Morel R. 1996.** Les sols cultivés 2ème édition. Lavoisier / Tec Et Doc, p 389.
- **Morsli. 2007.** Irrigation water quality for container-grown plants. Iowa State University Horticulture Guide.
- **Moutassem D., Belabid L., Bellik Y., Rouag N., Abed H, Ziouche S., et Baali F. 2019.** Role of soil physicochemical and microbiological properties in the occurrence and severity of chickpea's Fusarium wilt disease. *Eurasian Journal of Soil Science*, vol 8, n°4, p 304-312.
- **Mukhopadhyay S., Masto R. E., Cerda A., et Ram L. C. 2016.** Rhizosphere soil indicators for carbon sequestration in a reclaimed coal mine spoil. *Catena*, vol 141, p 100–108.
- **Navas, A., et Lindhorfer, H. 2005.** Chemical partitioning of Fe, Mn, Zn and Cr in mountain soils of the Iberian and Pyrenean ranges (NE Spain). *Soil Sediment Contam*, vol 14, n°3, p 249–259.
- **Nechad I., Fadil K., et Fadil F. 2014.** Qualité physicochimique des eaux des sources ain regrab et ain sidi bouali dans la région de sefrou (Moyen Atlas , Maroc ). *Larhyss Journal*, vol 11, n°4, p 127–146.
- **NEG-TAP. 2001.** Transboundary air pollution: Acidification, eutrophication and ground level ozone in the UK, Rep. No. DEFRA contract EPG 1/3/153. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK, Edinburgh, p 314.
- **Nemeth I. 2001.** Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II, p 260.
- **Nouayti N., Khattach D., et Hilali M. 2015.** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci*, vol 6, n°4, p 1068-1081.
- **Novara A., Gristina L., Bodì M. B., et Cerda A. 2011.** The impact of fire on redistribution of soil organic matter on a mediterranean hillslope under maquia vegetation type. *Land Degradation and Development*, vol 22, n°6, p 530- 536.
- **NOVEC. 2013.** l'Etude d'impact Environnemental. Rapport inédit.
- **Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., et Dean L.A. 1954.** Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United states department of agriculture. Washington, p 1-19.
- **Omrانيا S. 2022.** Etude de l'évolution de la contamination des eaux et des sols par les métaux lourds, les sels et les nitrates dans la région de M'nasra (kénitra, Gharb). Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences, Rabat –Maroc, p 182.

- **Omrania S., El Khodrani N., Zouahri A., Douaik A., Iaaich H., Lahmar M., et El Hajjaji S. 2019.** Physico-Chemical Characterization of Water and Soil of the M'nasra region in the Gharb plain (Northwest Morocco). *Mor. J. Chem*, vol 7, n°3, p 482-492.
- **OMS. 1986.** Charte d'Ottawa pour la promotion de la santé. Une Conférence internationale pour la promotion de la santé. Vers une nouvelle santé publique. 17- 21 novembre 1986, Ottawa (Ontario), Canada. Copenhague : Organisation mondiale de la santé, Bureau régional pour l'Europe.
- **OMS. 2008.** Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, p 125.
- **OMS. 2008.** Guidelines for Drinking-water Quality. vol 1 Recommendations, 3rd edn. World Health Organization, Geneva, p 564.
- **ORMVAG. 2008.** Inventaire des équipements hydro-agricole. Rapport interne, p 10.
- **Ouysse S. 2005.** Contribution à l'étude des ressources en eau dans la vallée du Draa moyen (Provence de Zagora) : risques de salinité des eaux souterraines et du sol dans l'oasis de Mezguita. Diplôme des études supérieures approfondies. Université Ibn Tofail faculté des sciences de kénitra, p 79.
- **Page B., Bullen T., et Mitchell M. 2008.** Influences of calcium availability and tree species on Ca isotope fractionation in soil and vegetation. *Biogeochemistry*, vol 88, n°1, p 1-13.
- **Pallix G., Tabet A. 1973.** Drainage d'une plaine basse côtière sur sols lourds : le Gharb. *Homme, Terres et Eaux*, vol 7, p 33-39.
- **Parent L.O., Rivest R. 2003.** Les éléments nutritifs Dans le Guide de fertilisation. 1ère édition. CRAAQ, Québec, p 294.
- **Parida A.K., Das A.B. 2005.** Salt tolerance and salinity effect on plants: review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol 60, n°3, p 324-349
- **Parras-Alcantara L., Lozano-Garcia B., Brevik E.C., et Cerda A. 2015.** Soil organic carbon stocks assessment in mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections *Journal of Environmental Management*, vol 155, p 219–228.
- **PEOI, 2008.** La pollution de l'eau d'origine industrielle- Panorama 2007/2008
- **Pesson P. 1979.** Pollution des eaux continentales, incidences sur les biocénoses aquatiques. *Annales de géographie*, vol 479, p 97-101.
- **Petit S., Vanclooster M., et Bogaert P. 2018.** Caractérisation de la pollution par les nitrates dans la masse d'eau souterraine des sables du bruxellien/yprésien en région de Bruxelles-Capitale, Université Catholique de Louvain, Earth and Life Institute Environmental sciences, Convention de recherche menée à l'attention de Bruxelles Environnement, p 88.
- **Pieri C. 1986.** Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne subsaharienne. *L'Agron Trop*, vol 41, n°1, p 1-9.
- **Pieri C. 1990.** Les bases agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres des savanes au sud du Sahara, In *Savane d'Afrique terre fertile ? Actes des rencontres Internationales.* Ministère de la Coopération du Développement, CIRAD, p 43-74.
- **Pretchel A., Alewell C., Armbruster M., Bittersohl J., Cullen J. M., Evans C. D., Helliwell R. C., Kopacek J., Marchetto A., Matzner E., Meessenburg H., Moldan F., Moritz K., Veselý**

- J., et Wright R. F. 2001.** Response of sulphur dynamics in European catchments to decreasing sulphate deposition. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 5, n°3, p 311-325.
- **Prevost G. 2006.** La Pierre sculptée, p 640.
- **Price C., Jark U.E., et Funkhouser E.A. 1972.** Functions of macro-nutrients in plants. *Micronutrients in Agriculture. Soil Soc .America*, p 231-264.
- **Pugh R. E., Dick D. G., et Fredeen A. L. 2002.** Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory, J. *Ecotoxi. Environ. Safety*, vol 52, n°3, p 273-279.
- **Pyradeau S. 2002.** Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. *Sciences de la Terre. ENGREF. pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005633*, p 436.
- **Qiang L., Jiheng Z., Yiyang Z., Wenfang T., Zhengyan Z., Yan X., et Xiaoying L. 2011.** Study on spatial distribution of soil available microelement in Qujing tobacco farming area, China. *Procedia Environmental Sciences*, vol 10, p 185 – 191.
- **Rahmoune C., Maâlem S., Redjel F., Hioun S., et Bennaceur M. 2001.** Physiological and biochemical responses of two precocious varieties of wheat to phosphate rocks and TSP fertilisation in semi-arid land. *Proc XIVth. International Plant Nutrition Colloquium, Hannover, Germany*.
- **Rajmohan N., Prathapar S., Jayaprakash M., et Nagarajan R. 2014.** “Vertical distribution of heavy metals in soil profile in a seasonally waterlogging agriculture field in Eastern Ganges Basin. *Environ Monit Assess*, vol 186, n°9, p 5411–5427.
- **Raju N. J. 2007.** Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River Basin, Cuddapah District, Andhra Pradesh, South India.
- **Rengel Z., et Romheld V. 2000.** Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency. *Plant Soil*, vol 222, n° (1-2), p 25-34.
- **Richer de Forges A.C. 2008.** Perdus dans le triangle des textures. *Etudes et Gestion des Sols*, vol 15, n°2, p 97-111.
- **Rodier J. 2005.** L’analyse de l’eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8ème Ed: Dunod. Paris. p 1381.
- **Rodier J., Legube B., et Merlet N. 2009.** L’analyse de l’eau, (9<sup>th</sup> ed). Paris, France, p 30.
- **Romuald B. 2010.** Synthèse de nanoparticules de carbonate de calcium. Département de sols et de génie agroalimentaire faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation université laval. Québec. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie agroalimentaire pour l'obtention du grade de maitre es sciences (M.Sc.), p 92.
- **Samake H. 2002.** Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. Thèse de doctorat d'état en pharmacie. Université de Bamako, faculté de médecine, de pharmacie et d'odonto stomatologie Bamako, 73 p.
- **Schmitt A.D., Vigier N., Lemarchand D., Millot R., Stille P., et Chabaux F. 2012.** Processes controlling the stable isotope compositions of Li, B, Mg and Ca in plants, soils and waters: A review. *C. R. Geosci*, vol 344, n° (11-12), p 704-722.

- **Schoonover J.E., Williard K.W.J. 2003.** Groundwater Nitrate Reduction in Giant Cane and Forest Riparian Buffer Zones . Journal of the American Water Resources Association, vol 39, n°2, p 347-354.
- **Sebilo M. 2003.** Utilisation du traçage isotopique naturel pour caractériser et quantifier les processus de nitrification et dénitrification à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris IV, p 128.
- **SEE. 2009.** Etat de la qualité des ressources en eaux au Maroc .Secrétariat d'état auprès du Ministère de l'énergie et des Mines , de l'Eau et de l' Environnement chargé de l'Eau et de l'Environnement . Département de l'Eau . Maroc . p 135
- **Sehlaoui H., Hassikou R., Moussadek R., Zouahri A., Douaik A., Iiach H., Ghanimi A., et Dakak H. 2020.** Evaluation of water quality for agricultural suitability in the Benslimane region, Morocco. Environ Monit Assess, vol 192, n°9, p 587.
- **Simard R., DES Rosiers R. 1980.** Qualité des eaux souterraines du Québec, Ministère de l'Environnement, Service des Eaux Souterraines du Québec, Gouvernement du Québec, p 106.
- **Simler R. 2009.** Diagrammes software. Downloadable at <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>.
- **Singh B., Jain V., et Mohan A., 2013.** Monitoring of groundwater chemistry in terms of physical and chemical parameters of Gajraula, a semi-urbanized town of North India. Phys. Chem. Earth, vol 58-60, p 34–41.
- **Soltner D. 1986.** Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol 14ème édition. Collection sciences et techniques agricoles, p 464.
- **Soltner D. 1990.** Les bases de la production végétale. Tome I : sol 18 è édition. Collection Science et Technique Agricole, p 467.
- **Sommerfeldt T.G., Rapp E., Chang C. et Janzen H.H. 2012.** Gestion des sols salins irrigués». Agriculture et Agroalimentaire-Canada, p 4-27.
- **Soutter M., Mermoud A., et Musy A. 2007.** Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagements., p 294.
- **Srinivasamoorthy K., Vasanthavigar M., Chidambaram S., Anandhan P., Manivannan R., et Rajivgandhi R. 2012.** Hydrochemistry of groundwater from Sarabanga Minor Basin, Tamilnadu, India. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, vol 2, n°3, p 193–203.
- **Taky A. 2015.** Reconversion des systèmes d'irrigation existants à l'irrigation localisée Cas du périmètre irrigué du Gharb –MAROC. The International Commission on Irrigation and Drainage(ICID,2015), p 20.
- **Taky A., Hammani A., Baqri A., et Zeraouli M. 1999.** Le drainage de la plaine du Gharb : problématique, historique et causes de dysfonctionnement. Séminaire EuroMéditerranéen, p 27-29.
- **Tang W., Shan B., Zhang H., et Mao Z. 2010.** Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China., J. Hazard. Mater, vol 176, n°1-3, p 945–51.

- **Tanji Kenneth K., et Kielen Neeltje C. 2002.** Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Irrigation and Drainage Paper n°61, Rome. Italy, p 205.
- **Tarik A. 2005.** Qualité physico-chimique de l'eau de boisson et la solubilité de certains médicaments utilisés chez la volaille dans certaines Région du Maroc. Thèse pour l'obtention du doctorat vétérinaire IAV Hassan II. Rabat. Maroc, p 183.
- **The Council of the European Union. 2013.** Directive n ° 86-278 du 12 / 06 / 86 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture, p 9.
- **Tourte R. 1977.** Traditionnal african systems of agriculture and their improvement. In: Foodcrops of the lowlands tropics. Oxford University Press. p 345.
- **U.S.S.L.S. 1954.** US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print.
- **UNEP. 2021.** Effets des pesticides et des engrais sur l'environnement et la santé et solutions envisageables pour les réduire au minimum : vers un monde sans risques chimiques -Résumé à l'Intention des Décideurs. [wedocs.unep.org/20.500.11822/34463](http://wedocs.unep.org/20.500.11822/34463), p 26.
- **USDA. 1995.** Soil Survey Laboratory Information Manual. Soil Survey Investigation Report. National Soil Survey Center, Soil Survey Laboratory, Lincoln, NE, p 305.
- **Valipour M. 2015.** Assessment of Important Factors for Water Resources Management in European Agriculture, Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering, vol 4, n°2, p 171-180.
- **Vallerie M. 1968.** Fertilité et fertilisation des sols tropicaux. Cours donné à l'Ecole Fédérale Supérieure d'Agriculture. Yaoundé (CMR) : ORSTOM, p 185.
- **Van Ranst E., Verloo M., Demeyer A., et Pauwels J.M. 1999.** Manual for the Soil Chemistry and Fertility Laboratory-Analytical Methods for Soils and Plants, Equipment, and Management of Consumables. NUGI 835, Ghent, Belgium, p 243.
- **Varian 2007.** Varian is synonymous with innovation, p 6.
- **Vasanthavigar V., Srinivasamoorthy K., Rajiv Ganthi R., Vijayaraghavan K., et Sarma V. 2010.** Characterisation and quality assessment of groundwater with a special emphasis on irrigation utility: Thirumanimuttar sub-basin, Tamil Nadu, India. Arabian Journal of Geosciences, vol 5, n°2, p 245–258.
- **Venkateswari G., Krishnayya P.V., Arjuna Rao P., et Murthy K.V.M. 2008.** Bioefficacy of abamectin and emamectin benzoate against *Spodoptera littoralis* (F.) Pest. Res. J., vol 20, n°2, p 229-233.
- **Walkley A., Black C.A. 1934.** An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. Soil Science, vol 37, n°1, p 29-38.
- **Wang L., Stuart M.E., Lewis M.A., Ward R.S., Skirvin D., Nadien P.S., Collins A.L., et Ascott M.J. 2016.** The changing trend in nitrate concentrations in major aquifers due to historical nitrate loading from agricultural land across England and Wales from 1925 to 2150. Science of the Total Environment, vol 542, p 694-705.

- **Wang Y., Nil N. 2000.** Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase– oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotechnol*, vol 75, n°6, p 623–627.
- **Wolfe AH., Patz JA. 2002.** Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, vol 31, n°2, p 120–125.
- **Woodward K.B., Fellows C.S., Conway C.L., et Hunter H.M. 2009.** Nitrate Removal, Denitrification and Nitrous Oxide Production in the Riparian Zone of an Ephemeral Stream . *Soil Biology and Biochemistry*, vol 41, n°4, p 671-680.
- **Yermiyahu U., Keren R., et Chen Y. 2001.** Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil. Sci. Soc. Am. J*, vol 65, n°6, p 1436-1441.
- **Yidana S. M., Bruce Banoeng Y., et Akabzaa T. M. 2010.** Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, vol 58, n°2, p 220–234.
- **Yong R. N., Mohamed A., et Warkentin B.n992.** Principles of contaminant transport in soils. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Sciences, p 327.
- **Zaakour F., Saber N., Ismaili A.D., et Ben Hachmi M.K. 2020.** The environnemental quality of soil under wheat and vines in the region of Mohammadia Benslimane (Morocco). *E3S Web of Conferences*, 150 :03005, p 8.
- **Zare M., Ordookhani K., Emadi A. et Azarpanah A. 2014.** Relationship Between Soil Exchangeable Sodium Percentage and Soil Sodium Adsorption Ration in Mrvdasht Plain, Iran. *Int. J. Adv. Biol. Biom*, vol 2, n°12, p 2934-2939.
- **Zarei M., Sedehi F., et Raeisi E. 2014.** Hydrogeochemical characterization of major factors affecting the quality of groundwater in southern Iran, Janah Plain. *Chemie der Erde - Geochemistry*, vol 74, n°4, p 671–680.
- **Zeraouli M., Mrini M. 2004.** Fertilité des Sols et Fertilisation Potassique des principales Cultures dans la Région du Gharb (Maroc): Développement de la fertigation, IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa, Rabat, p 2-9.
- **Zerrouqi Z., Sbaa M., Chafi A., et Aqil H. 2013.** Contribution to the study of the Nador lagoon's water quality: Anthropogenic impact” *Bulletin de l’Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, n°35, p 51-59.
- **Zghibi A., Merzougui A., Zouhri L., et Tarhouni J. 2014.** Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *J. African Earth Sci*, vol 89, p 1–15.
- **Zghibi A., Tarhouni J., et Zouhri L. 2013.** Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *J. African Earth Sci*, vol 87, p 1–12.
- **Zizi N., Ndiaye A. 2012.** Contribution au développement d’une approche de suivi spatiotemporel de la salinité des sols : Cas des périmètres du Tadla, Maroc. Travail de Fin d’Etudes pour l’obtention du diplôme d’Ingénieur en Agronomie.

## CENTRE D'ETUDES DOCTORALES – SCIENCES ET TECHNOLOGIES

### Résumé

La plaine du Gharb est la plus grande zone agricole du Maroc. Il se caractérise par des sols fertiles et la disponibilité de l'eau de surface ou souterraine, ce qui a conduit à une agriculture intensive menaçant la disponibilité et la qualité des eaux et en sols dans la région. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier les différents paramètres physico-chimiques caractérisant la qualité des sols et des eaux souterraines dans la région afin d'évaluer leur degré de dégradation. L'étude a été réalisée sur le périmètre irrigué de Sidi Yahya (région du Gharb), sur la période 2018-2022. L'étude a porté sur 33 puits d'eau et 33 échantillons de sol, avec des analyses in situ et au laboratoire. Les paramètres étudiés pour les sols sont la texture, la matière organique, le pH, la salinité et l'alcalinité, ESP, CaCO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg ainsi que les oligoéléments. Pour les eaux, en plus de la profondeur de la nappe et du pH, un bilan ionique a été réalisé. Une étude hydrochimique a été menée pour mesurer la variabilité dans les faciès chimiques. A l'aide du SIG, des cartes d'interpolation spatiale des différents paramètres des eaux souterraines et sols ont été éditées afin d'être intégrées dans les outils de diagnostic. En fin, une étude statistique par analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et des matrices de corrélation pour les propriétés du sol et des eaux des 6 zones étudiées ont été établies. Les résultats ont montré que la profondeur minimale et maximale de la nappe phréatique était respectivement de 6 et 96 m. De plus, un peu plus de la moitié des puits (51,5 %) étaient inadéquats pour l'irrigation car ils étaient soit très salins à extrêmement salins. La région d'étude est caractérisée par une texture hétérogène des sols, avec une prédominance de la texture argileuse lourde (plus de 70 % des sols) dont plus de la moitié sont vertisols. Les sols sont principalement alcalins (70%), pauvres en matière organique (61%) et en phosphore (52%). Ils sont par ailleurs, très riches en potassium (70%) et non salins (88%). En fin, des cartes thématiques de la qualité des différents paramètres des eaux souterraines et sols ont été éditées à l'aide de logiciel de Système d'Information Géographique (SIG). Une étude statistique par analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et des matrices de corrélation pour les propriétés du sol et des eaux ont été établies.

**Mots clés :** Qualité, Sols agricoles, Eaux souterraines, SIG, Plaine du Gharb, Périmètre de Sidi Yahya

### Abstract

The Gharb plain is the largest agricultural area in Morocco. It is characterized by fertile soils and the availability of surface or underground water, which has allowed intensive agriculture threatening availability and quality of the water and soil potentials in the region. The objective of this research work is to study physico-chemical parameters characterizing the quality of soils and groundwater in the region in order to assess their degradation level. The study was carried out of the irrigated perimeter of Sidi Yahya (region of Gharb), over the period 2018-2022. The parameters studied for the soils are texture, organic matter, pH, salinity and alkalinity, ESP, CaCO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg as well as trace elements. For the waters, in addition to the depth of the water table and the pH, an ion balance and nitrate pollution was carried out. A hydrochemical study was carried out to assess the variability in the chemical facies. Using the GIS, spatial interpolation maps of the various groundwater and soil parameters have been edited in order to be integrated into the diagnostic tools. Finally, a statistical study by analysis of variance (ANOVA) was carried out and correlation matrices for the properties of the soil and water of the 6 zones studied were established. The results showed that the minimum and maximum water table depth were 6m and 96m respectively. In addition, just over half of the wells (51.5%) were unsuitable for irrigation because they were either very saline to extremely saline. The study area is characterized by a heterogeneous soil texture, with a predominance of heavy clay texture (more than 70% of the soils), more than half of which are vertisols. The soils are mainly alkaline (70%), poor in organic matter (61%) and phosphorus (52%). They are also very rich in potassium (70%) and non-saline (88%). Finally, thematic maps of the quality of the various parameters of groundwater and soils were edited using Geographic Information System (GIS) software. A statistical study by analysis of variance (ANOVA) was carried out and correlation matrices for the properties of the soil and water were established.

**Keywords:** Quality, Agricultural soils, Groundwater, GIS, Gharb plain, Sidi Yahya perimeter