



Université Sultan Moulay Slimane

Faculté des Sciences et Techniques

Béni Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques

Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé (RNES)

THÈSE

Présentée par

ENNAJI WIDAD

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Géosciences

Option : Sol et Environnement

Caractérisation physico-chimiques de la qualité et de la pollution métallique des sols agricoles dans la partie Nord-Est de la plaine du Tadla– Bassin Oum Er Rbia –Maroc

Pr.Ahmed BOUKDIR	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Président
Pr.Aicha ROCHDI	Professeur, Université Hassan 1er, F.S.T. Settat, Maroc	Rapporteur
Pr.Mohammed ETTAKI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, FP Khouribga, Maroc	Rapporteur
Pr.Abdessamad NAJINE	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr.Samira KRIMISSA	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, FP Béni-Mellal, Maroc	Examineur
Pr.Ahmed BARAKAT	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Encadrant
Pr.Mohamed EL BAGHDADI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni-Mellal, Maroc	Co-Encadrant

DÉDICACE

Du profond de mon cœur, je dédie cette thèse à tous ceux qui me sont
chers,

À la mémoire de ma chère mère ANAYA ELBAQI

Cette thèse est dédiée à ma mère décédée trop tôt, qui m'a toujours
poussée et motivée dans mes études. Je ne saurais exprimer mon grand
chagrin en ton absence. J'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour, que
Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

À mon père ENNAJI SAID

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand respect, et ma
reconnaissance pour les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation,
j'implore dieu le tout puissant de vous accorder bonne santé et longue vie.

Je vous aime

REMERCIEMENT

À l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurai jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti chercheur ».

Cette thèse a été réalisée à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane, au sein de l'équipe Géo-ressources et environnement sous la direction du Professeur AHMED BARAKAT.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, monsieur AHMED BARAKAT, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour ses multiples conseils et pour tout le précieux temps qu'il a consacré à diriger cette recherche. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir au cours de l'élaboration de cette thèse. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je tiens à remercier particulièrement mon Co-encadrant de thèse professeur MOHAMED EL BAGHDADI pour sa disponibilité et ses conseils qui m'ont accompagné tout au long de ma thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux vont également à Monsieur WINFRIED E.H.BLUM professeur de pédologie à l'université Freiburg/ Allemagne pour son aide précieuse pour ma recherche bibliographique. Il a fait tout son possible pour m'aider.

Je tiens à remercier les professeurs AICHA ROCHDI, SAMIRA KRIMISSA, AHMED BOUKDIR, MOHAMMED ETTAKI ET ABDESSAMAD NAJINE d'avoir accepté de participer au jury de ma thèse et pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen du manuscrit de ma thèse.

Je voudrais exprimer ma vive reconnaissance à Monsieur le Professeur SAID MELIANI, doyen de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, Monsieur le professeur ABDERRAFIA HAFID, vice-doyen de la FST de Béni Mellal pour les efforts qu'ils déploient pour la recherche scientifique. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect.

Je tiens à remercier particulièrement tous les professeurs de département géologie JAMILA RAIS, RACHIDA SAJI, MOHAMED HSSAÏSSOUNE, SAMIR NADEM, ABDELKARIM ARIOUA, ABDELGHANI BOUDHAR, pour leurs soutiens constants, leurs encouragements et leurs conseils.

Ma reconnaissance va à ELHASSAN LOUZ et ZAKIA FAIQ qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif et moral de ce travail doctoral, et ainsi pour la confiance qu'ils ont manifestées à l'égard de mon travail.

J'exprime ma gratitude à tous les membres de l'équipe Géo-ressources et Environnement et mes amis des autres équipes, c'est grâce à vous que cette thèse restera un beau et un

bon souvenir. Alors un grand merci à vous tous: KARROUM LALLA AICHA, OUMENSKOU HAKIMA, AADRAOUI MOHAMED, ABDESSAMAD HILALI, ELHAMZAOUI HASSANIA, RIDA KHELLOUK, AAFAF EL JAZOULI, ET KARAOUI ISMAIL.

Je souhaiterais aussi adresser ma gratitude à toutes les personnes de l'administration que j'ai contactées durant ces années de thèse. En particulier, Mme. Hafida BAKHCHA, Mr. Mostafa ARIF, Mr. Mohamed BADAI. Je les remercie pour leur sympathie, leurs encouragements, leurs conseils et leurs gentillesse formidables.

Finalement, j'adresse mille mercis et j'exprime ma profonde reconnaissance à ma famille, en particulier mes chers parents, mes frères et mes sœurs AHMED, MOHAMED, RACHID, MAJDA, FADWA, NEZHA, ATIKA, NADIA, ET KHADIJA qui m'ont supporté et qui me supportent toujours. Que Dieu les récompense.

AVANT-PROPOS

FICHE DE THÈSE

- Auteur de la Thèse ENNAJI Widad
- Email/site web Widad.ennaji@gmail.com/www.researchgate.net/profile/Widad_Ennaji
- Intitulé de la Thèse Caractérisation physico-chimique de la qualité et la pollution métallique des sols agricoles de la partie Nord-Est de la plaine du Tadla– Bassin Oum Er Rbia –Maroc
- Directeur de Thèse Pr. BARAKAT Ahmed, PES, FST Béni-Mellal
- Co-encadrant de Thèse Pr. ELBAGHDADI Mohamed, PES, FST Béni-Mellal
- Lieu de réalisation du travail Équipe Géo-ressources et environnement, FST Béni-Mellal, Maroc

LISTE DES PUBLICATIONS

- **Widad Ennaji**, Ahmed Barakat, Mohamed El Baghdadi, Hakima Oumenskou, Mohamed Aadraoui, Lalla Aicha Karroum and Abdessamad Hilali “*GIS-based multi-criteria land suitability analysis for sustainable agriculture in the northeast area of Tadla plain (Morocco)*”. Earth System Science, 2018, 127:79.
- **Widad Ennaji**, Ahmed Barakat, Ismail Karaoui, Mohamed El Baghdadi and Abdelkrim Arioua. “*Remote sensing approach to assess salt-affected soils in the north-east part of Tadla plain, Morocco*”. Geology, Ecology, and Landscapes, 2018, 1438744.
- A. Barakat, **W. Ennaji**, A. El Jazouli, R. Amediaz, F. Touhami “*Multivariate analysis and GIS-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-Moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco)*”. Earth Systems and Environment, 2017, 3:3.
- Ahmed Barakat, **Widad Ennaji**, Samira Krimissa & Mustapha Bouzaid (2019): *Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of Beni-Mellal city (Morocco)*, International Journal of Environmental Health Research, DOI: 10.1080/09603123.2019.1595540.
- **Widad Ennaji**, Ahmed Barakat, Mohamed El Baghdadi “*Heavy metal contamination in agricultural soil and ecological risk assessment in the northeast area of Tadla plain, Morocco*”. Journal of Sedimentary Environments.

LISTE DES COMMUNICATIONS ORALES ET POSTER

- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. «The use of remote sensing approach to identify salt-affected soils in the North-east Tadla plain (Morocco) », au “International Scientific Conference, precision technologies role in the study of climate change impact and its implications on the economic and natural structure: the reality and suggested solutions”, les 12-14 février 2018 à Istanbul, Turquie.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. «Land quality assessment for sustainable agriculture in the northeastern part of the Tadla plain», au “14th International Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources AquaConSoil 2017”, les 26 – 30 juin 2017 à Lyon, France.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. « Évaluations de la qualité physico-chimique des sols par trois paramètres : matière organique, pH et la salinité au niveau de la partie nord-est de la plaine de Tadla», au “International Conference on Geospatial Technologies for Water Ressources (GTW III)”, les 10, 11 et 12 novembre 2016 à Marrakech.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. «Characterization of soil magnetic susceptibility at the northeast part of the Tadla plain », au forum International sur les Changements climatiques sous le thème «La lutte contre le changement climatique, vecteur de développement économique et social durable et intégré, d’ATLAS COP», l’Université Sultan Moulay Slimane, les 18 et 19 octobre 2016.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. «Carbonates determination by two methods annealing and calcimeter bernard in soils of the northeast part of the Tadla plain» au 5ème colloque international environnement et développement durable ‘changements climatiques : causes, impacts, atténuation et adaptation’ organisé du 10 au 15 octobre 2016 à Rabat et à Kénitra.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. «Soil analyze by the coupling of a GIS model and physico-chemical parameters», “7th International Scientific Agriculture Symposium, Agrosym 2016”, 16-9 October 2016, in Jahorina, Bosnia.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. « Study of physicochemical quality of soils in the Tadla plain» au premier congrès international des études sur l’eau et l’environnement -CI3E, l’école nationale des sciences applique d’Al-Hoceima- Maroc, 21- 22 avril 2016.
- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. « Caractérisation préliminaire des sols de la partie nord-est de la plaine de Tadla», à la 5ème édition du congrès international Eaux, Déchets et Environnement Un défi millénaire (EDE5), à la Faculté des Sciences et Techniques Settat – Université Hassan 1er Maroc Les 24-26 novembre 2015.

- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. « Contribution à l'évaluation de la pollution métallique des sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Béni-Mellal », à la 2ème journée sur le patrimoine naturel de la région Tadla-Azilal, 7-9 mai 2015.

- W. Ennaji, A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, M. Aadraoui, H. Oumenskou, L.A. karroum. « Évaluation de la pollution métallique des sols agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Béni-Mellal », Journées doctorales (JDOC'15), les 26 à 28 Mars (2015), à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, Maroc.

RÉSUMÉ

Au Maroc, le sol est l'un des ressources les plus négligées et inconnues par rapport aux autres ressources naturelles. La plaine de Tadla, l'un des grands périmètres au Maroc, a subi plusieurs menaces à un rythme croissant (intensification agricole, emploi abusif d'intrants agrochimiques, salinisation) ces contraintes conduisent automatiquement à la dégradation de la structure et la qualité des sols agricole. En raison de l'importance de protection de cette ressource, notre étude est concentrée sur la caractérisation de la qualité et la pollution des sols agricoles. Cette recherche s'est déroulée de novembre 2015 à octobre 2019 pour les sols agricoles de la partie Nord-Est de la plain du Tadla-Maroc-, dans un premier temps, nous avons évalué l'adéquation des terres agricoles actuelles de la région à une agriculture intensive durable utilisant des approches des systèmes de données géographiques (SIG) et le processus de hiérarchie analytique (AHP). Six indicateurs de la qualité du sol, à savoir le pH, le CO, la CEC, la texture, la salinité du sol et la pente, ont été utilisés dans la présente étude. L'approche AHP a été appliquée pour estimer les poids des indicateurs et des sous-indicateurs, les résultats d'après l'AHP indiquent que 16,83% ont une excellente aptitude, 61,08% une bonne, 20,97% une moyenne, et 1,12% de la zone d'étude est peu adaptée à une agriculture intensive durable.

Dans un deuxième temps, des méthodes statistiques ont été utilisées afin d'évaluer les niveaux de fertilité à partir des éléments nutritifs des sols échantillonné. Les résultats obtenus dans cette partie indiquent que la fertilité des sols dans la zone d'étude est de bonne qualité.

Dans une dernière partie, une évaluation de contamination potentielle et le risque écologique (RI) de cinq métaux lourds dans les sols agricoles du Nord-Est de la plaine de Tadla a été réalisée en utilisant diverses méthodes d'indexation environnementale (Igeo, EF, CF, PLI et RI). En effet, ces indices de pollution de l'évaluation ont indiqué que notre zone d'étude est moyennement à fortement polluée dans le cas du (Zinc, Cuivre) et partiellement influencée par des activités anthropiques. Les valeurs de RI ont montré que les métaux lourds présentent un faible risque écologique. Cependant, l'écotoxicité potentielle du Cu et du Zn peut être liée aux engrais appliqués dans l'agriculture.

Mots-clés : Qualité des sols agricoles, SIG, AHP, Indicateurs de qualité, Agriculture intensive, Fertilité, Indices de pollution.

ABSTRACT

In Morocco, soil is one of the most neglected and unknown resources compared to other natural resources. The Tadla plain, one of the large areas in Morocco, has suffered several threats at an increasing rate (agricultural intensification, abusive employment of agrochemical inputs, salinization) these constraints automatically lead to the degradation of the structure and the quality of the agricultural soils. Due to the importance of protecting this resource, our study is focused on characterizing the quality and pollution of agricultural soils. This research took place from November 2015 to October 2019 for the agricultural soils in the Northeastern part of Tadla plain in Morocco, As a first step, we assessed the adequacy of current agricultural lands in the region to sustainable intensive agriculture using geographic data systems (GIS) and analytical hierarchy process (AHP) approaches. Six soil quality indicators, namely pH, CO, CEC, texture, soil salinity and slope, were used in this study. The AHP approach was applied to estimate the weights of the indicators and sub-indicators, the results according to the AHP indicate that 16.83% have excellent aptitude, 61.08% good, 20.97% average, and 1.12% of the study area is poorly adapted to sustainable intensive agriculture.

Secondly, statistical methods were used to assess fertility levels from the nutrients of the soil sampled. The results obtained in this part indicate that the soil fertility in the study area is a good quality.

In a final part, an evaluation of potential contamination and the ecological risk (RI) of five heavy metals in agricultural soils of the Northeast of the Tadla Plain were carried out using various methods of environmental indexing (Igeo, EF, CF, PLI and RI). In fact, these pollution indices of the assessment indicated that our study area is moderately to highly pollute in the case of (Zinc, Copper) and partially influenced by human activities. The RI values showed that heavy metals present a low ecological risk. However, the potential ecotoxicity of Cu and Zn may be related to fertilizers applied in agriculture.

Keywords: Soils quality, GIS, AHP, Quality indicators, Intensive agriculture, Fertility, Pollution indices.

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Compositions moyennes d'un sol (% en volume)	7
Figure I. 2: Texture et aération du sol	13
Figure I. 3: Écoulement et stock des éléments traces vers le sol (Robert et Juste, 1997)	14
Figure II. 1: Plan de situation de la zone d'étude	22
Figure II. 2: Variation des moyennes mensuelles des précipitations et la température au niveau de la station de Béni Mellal entre 1983 et 2014, (ABHOER ,2016).....	24
Figure II. 3: les ressources en eaux de surface dans la zone d'étude.....	25
Figure II. 4: Carte géologique de la zone d'étude.....	27
Figure II. 5: les ressources en eaux souterraines dans la zone d'étude.....	
Figure II. 6: Carte pédologique de la zone d'étude.....	
Figure II. 7: Plan de positionnement des sites échantillonnés sur la zone d'étude et photo d'illustration de l'échantillonnage.....	34
Figure II. 8: Préparation des échantillons (séchage et tamisage)	35
Figure III. 1: Organigramme détaillé du processus de décision de la méthode AHP	51
Figure III. 2: Distribution spatiale de la texture dans la zone d'étude	56
Figure III. 3: Distribution spatiale du pH dans la zone d'étude.....	57
Figure III. 4: Distribution spatiale du carbone organique dans la zone d'étude	58
Figure III. 5: Distribution spatiale de la capacité d'échange cationique dans la zone d'étude .	59
Figure III. 6: Distribution spatiale de la salinité dans la zone d'étude	60
Figure III. 7: Distribution spatiale de la pente dans la zone d'étude	61
Figure III. 8: Carte de l'adéquation du sol pour l'agriculture intensive	64
Figure III. 9: Variations de la MO du sol échantillonné	72
Figure III. 10: Variations du rapport C/N des sols étudiés.....	73
Figure III. 11: Les variations de phosphore assimilable des sols étudiés	74
Figure III. 12: Les variations de potassium dans la zone d'étude.....	75
Figure III. 13: Les variations de magnésium dans la zone d'étude	76
Figure III. 14: Les variations de la teneur d'azote total dans les échantillons du sol	77
Figure III. 15: ACP des paramètres physico-chimiques dans des échantillons de sol	79

Figure IV. 1: Texture du sol des échantillons étudiés.....	94
Figure IV. 2: Carte de répartition spatiale du Cadmium dans les sols agricoles de notre zone d'étude	96
Figure IV.3: Carte de répartition spatiale du Chrome dans les sols agricoles de notre zone d'étude	96
Figure IV.4: Carte de répartition spatiale du Cuivre dans les sols agricoles de notre zone d'étude	97
Figure IV.5: Carte de répartition spatiale du Plomb dans les sols agricoles de notre zone d'étude	97
Figure IV. 6: Carte de répartition spatiale du Fer dans les sols agricoles de notre zone d'étude	98
Figure IV.7: Carte de répartition spatiale du Zinc dans les sols agricoles de notre zone d'étude	
Figure IV.8:ACP des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds dans les échantillons de sol de la région nord-est de la plaine de Tadla	101
Figure IV. 9: Variation de l'indice de géoaccumulation pour les métaux lourds dans la zone d'étude.....	103
Figure IV.10: Variation de facteur d'enrichissement pour les métaux lourds dans la zone d'étude.....	104
Figure IV.11: Variation de facteur de contamination pour les métaux lourds dans la zone d'étude.....	105
Figure IV. 12: Répartition de PLI et les teneurs en métaux lourds.....	106
Figure IV. 13: Répartition du risque écologique et le contenu en métaux lourds.....	108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Objectifs de gestion potentiels et fonctions du sol associées en vue de sélectionner des indicateurs de qualité du sol adaptés (d'après Andrews et al. 2004).....	9
Tableau II.1: Classes conventionnelles de la granulométrie (Directives de la FAO 2006)	36
Tableau II.2: Analyses physico-chimiques effectuées pour des sols échantillonnés et les méthodes utilisées	44
Tableau III.1: Échelles de préférences de Saaty et Vargas (1984).....	52
Tableau III.2: Résultat d'analyse des indicateurs de qualité du sol et leur donnée statistique .	53
Tableau III.3: Indicateurs et sous-indicateurs utilisés dans l'évaluation de la qualité du sol et leurs poids relatifs avec la méthode AHP.	62
Tableau III.4: Degré d'aptitude des sols au nord-est de la plaine de Tadla (Maroc).....	63
Tableau III.5: Rôle des principaux éléments nutritifs dans la croissance végétale (Genot et al.2009).....	68
Tableau III.6: Synthèse des seuils des paramètres physico-chimiques dans les sols (Lacharme, 2001 ; LANO, 2008)	69
Tableau III.7: Les données statistiques des indicateurs de fertilité.....	71
Tableau IV.1: Classification des indices de pollution utilisés dans cette étude.....	92
Tableau IV.2: Les résultats des paramètres physico-chimiques des sols agricoles dans différentes stations de la partie nord-est de la plaine de Tadla (n = 60)	93
Tableau IV.3: Description statistique des concentrations de métaux lourds (mg / kg) dans les échantillons de sol (n = 60) et comparaison de la norme existante.....	99
Tableau IV.4: Analyse de corrélation de Pearson des propriétés des sols agricoles du nord-est de la plaine de Tadla (N = 60).....	100
Tableau IV.5: Matrice de composants après rotation Varimax avec normalisation de Kaiser	102
Tableau IV.6: Résultats de Igeo, EF, CF, Ei, PLI et RI pour les métaux lourds dans les échantillons de sols.....	107

LISTE DES ABREVIATIONS

MOS: Matière organique du sol

ETM: Eléments traces métalliques

SAU : Surface agricole utile

GPS : Système de positionnement global

USDA : United States Department of Agriculture

ICP- AES : Spectrométrie d'émission atomique par plasma induit

ACP : Analyse de composante principale

SIG : Système d'information géographique

IDW : Distance inversée pondérée

MCE : Evaluation multicritère

AHP : Processus de hiérarchie analytique

MNT : Modèle numérique d'altitude

CI : Indice de cohérence

RI : Matrice aléatoire

CR : Rapport de cohérence

LSI : Indice d'aptitude des terres

MCP : Matrice de comparaison par paire

Igeo: Indice de géo-accumulation,

PLI: Indice de charge de pollution,

EF: Facteur d'enrichissement,

Ei: Risque écologique,

CF: Facteur de contamination,

RI: Indice de risque écologique potentiel.

WHO: Organisation mondiale de la santé

FAO: Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (United Nations)

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	A
Remerciement.....	B
AVANT-PROPOS	C
RESUMÉ.....	D
ABSTRACT	E
1. Introduction générale.....	1
2. Objectifs	3
3. Structure de la thèse	4
Chapitre IRevue de littérature	5
I.1. Introduction.....	6
I.2. Définition du sol	6
I.3. Constituants du sol.....	6
I.3.1. Composants minéraux.....	7
I.3.2. Organismes	7
I.3.3. Composants organiques	7
I.3.4. Eau du sol.....	8
I.3.5. Air du sol.....	8
I.4. Différentes fonctions des sols	8
I.5. Qualité des sols	9
I.5.1. Concept de la qualité des sols	9
I.5.2. Indicateurs de la qualité des sols.....	11
I.5.2.1. Indicateurs physiques.....	12
I.5.2.2. Indicateurs chimiques	13
I.5.2.3. Indice de la qualité de sol (SIQ)	15
I.5.3. Pratiques agricoles et leur impact sur la qualité du sol.....	16
I.5.3.1. Amendements organiques	17
I.5.3.2. Irrigation	18
I.5.3.3. Chaulage	19
I.6. Conclusion	19
Chapitre II Présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail.....
II.1. Introduction	21
II.2. Présentation de la zone d'étude	21

II.2.1. Cadre géographique	21
II.2.2. Cadre climatologique.....	22
II.2.2.1. Pluviométrie.....	23
II.2.2.2. Température.....	23
II.2.2.3. Evaporation et Evapotranspiration	23
II.2.3. Cadre hydrologique	24
II.2.4. Cadre géologique.....	26
II.2.5. Cadre hydrogéologique.....	27
II.2.6. Cadre pédologique.....	30
II.2.6.1. Sols isohumiques	30
II.2.6.2. Sols calcimagnésiques	30
II.2.6.3. Sols peu évolués d'apport alluvial.....	30
II.2.6.4. Sols fersiallitiques.....	31
II.2.6.5. Sols hydromorphes	31
II.2.7. Cadre socio-économique (agriculture)	32
II.3. Méthodologie de travail.....	33
II.3.1. Échantillonnage des sols.....	33
II.3.2. Prétraitement du sol	34
II.3.3. Méthodes analytiques	34
II.3.3.1. Caractérisations physiques des sols –Granulométrie-	35
II.3.3.2. Caractérisations chimiques des sols	36
II.3.3.2.1. pH du sol.....	36
II.3.3.2.2. Matière organique.....	37
II.3.3.2.3. Carbone organique (CO)	38
II.3.3.2.4. Azote total (N)	38
II.3.3.2.5. Rapport C/N.....	39
II.3.3.2.6. Calcaire total.....	39
II.3.3.2.7. Salinité du sol	40
II.3.3.2.8. Capacité d'échange cationique (CEC).....	40
II.3.3.2.9. Éléments échangeables	41
II.3.3.2.10. Métaux lourds	43
II.3.4. Analyses statistiques.....	44
II.4. Conclusion	45

Chapitre III Evaluation de la qualité et la fertilité des sols agricoles dans la partie nord-est de la plaine de Tadla	46
III.1 : Diagnostic de la qualité des sols pour une agriculture intensive et durable en intégrant les méthodes multicritères (AHP)	47
III.1.1. Introduction	47
III.1.2. Matériels et méthodes.....	48
III.1.2.1. Indicateurs des sols utilisés	48
III.1.2.2. Présentation de la méthode AHP	49
III.1.3. Résultats et discussions	52
III.1.3.1. Description des indicateurs	52
III.1.3.1.1. Texture	54
III.1.3.1.2. pH du sol	54
III.1.3.1.3. Carbone organique (CO)	55
III.1.3.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC)	55
III.1.3.1.5. Salinité.....	55
III.1.3.1.6. La pente	55
III.1.4. Carte d'aptitude des terres	62
III.1.5. Conclusion.....	64
III.2 : Évaluation statistique de la fertilité des sols étudiés	66
III.2.1. Introduction	66
III.2.2. Types de fertilité des sols et besoins nutritifs des végétaux.....	67
III.2.3. Facteurs contrôlant la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols	67
III.2.4. Matériels et méthodes.....	68
III.2.4.1. État et évolution de la fertilité des terres agricoles	68
III.2.4.2. Analyses physico-chimiques	69
III.2.4.3. Analyses statistiques	70
III.2.5. Résultats et discussions	70
III.2.5.1. Analyse au laboratoire.....	71
III.2.5.1.1. Distribution granulométrique (texture)	71
III.2.5.1.2. Réaction du sol	72
III.2.5.1.3. Matière organique	72
III.2.5.1.4. Rapport C/N	73
III.2.5.1.5. Phosphore assimilable	73
III.2.5.1.6. Potassium	74

III.2.5.1.7. Magnésium	75
III.2.5.1.8. Azote total	76
III.2.5.2. Analyse statistique.....	77
III.2.5.2.1. Introduction	77
III.2.5.2.2. Aspect fondamental de l'ACP	78
III.2.5.2.3. Résultats obtenu	78
III.2.6. Conclusion.....	80
Chapitre IV.....Évaluation de la pollution métallique et le risque écologique des sols étudiés	81
IV.1. Introduction	82
IV.2. Les métaux lourds	83
IV.2.1. Plomb	83
IV.2.2. Cadmium.....	84
IV.2.3. Cuivre.....	84
IV.2.4. Zinc	84
IV.2.5. Fer	85
IV.2.6. Chrome.....	85
IV.3. Métaux lourds et système de sol	86
IV.4. Transport de métaux lourds dans le sol.....	87
IV.5. Matériel et méthodes	87
IV.5.1. Méthodes analytiques.....	87
IV.5.2. Analyses statistiques	88
IV.5.3. Évaluation du risque environnemental.....	88
IV.5.3.1. Indice de géoaccumulation (Igeo).....	89
IV.5.3.2. Facteur d'enrichissement (EF).....	89
IV.5.3.3. Facteur de contamination (CF) et l' Indice de charge de pollution (PLI).....	90
IV.5.3.4. Risque écologique (Ei) et indice de risque écologique (IR)	90
IV.6. Résultat et discussion	93
IV.6.1. Propriétés physicochimiques.....	93
IV.6.2. Concentrations des métaux lourds dans les sols	95
IV.6.3. Analyses statistiques	99
IV.6.4. Évaluation de la contamination par les métaux dans les sols de surface	102
IV.6.5. Évaluation des risques écologiques de la contamination métallique	106
IV.7. Conclusion	109

Conclusion générale et Perspectives	110
Références Bibliographiques.....	113
Annexes	134

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحِيمِ الرَّحْمَنِ

وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ خَلَقَكُمْ مِنْ تُرَابٍ ثُمَّ إِذَا أَنْتُمْ بَشَرٌ تَنْتَشِرُونَ (٢٠).

"We drink water, we breathe air, but we don't eat soil. It feeds us only indirectly,"

«On boit l'eau, on respire l'air, mais on ne mange pas le sol. Il ne nous nourrit qu'indirectement.»

Winfried Blum, (pédologue et expert des sols)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Introduction générale

Le sol est une ressource cardinale qui appuie la croissance des plantes et garantit ainsi la production primaire dont dépend directement la population humaine. Les sols sont la peau poreuse de la terre avec des structures variables et complexes composées de phases solides liquides et gazeuses. Les sols peuvent être divisés en horizons et, avec l'air, l'eau et les organismes vivants qu'ils contiennent, tous les sols sont connus sous le nom de pédosphère. (Winfried et al. 2017). Généralement ils sont de natures et de types très divers, distribués en fonction de la topographie, des roches, des végétaux, des climats, et des activités humaines (Beaudet et al. 1967; Stengel et Gelin, 1998; Badraoui et al. 2000). Malheureusement, cette ressource est très lentement renouvelable en raison de la longue période nécessaire aux processus de sa formation (Badraoui, 2006), cette propriété le rend notamment très sensible aux activités humaines et se dégrade rapidement, dès que les sociétés humaines agissent sans précautions.

Le sol est une ressource précieuse pour l'humanité par les fonctions irremplaçables qu'ils assurent. Selon Ruellan (2003), et Winfried et al. 2017, le sol remplit un certain nombre des fonctions fondamentales telles que : des fonctions alimentaires pour les humains et les animaux, fonctions écologiques, fonctions biologiques assurant la vie des micro-organismes dans les sols, des fonctions techniques, industrielles, socio-économiques et culturelles.

Au Maroc, le sol est l'un des ressources les plus négligées et inconnues par rapport aux autres ressources naturelles telles que l'eau, l'air, les mines et les forêts. Bien que le pouvoir public considère comme un élément essentiel de la planification de l'aménagement du territoire à travers l'utilisation rationnelle des terres (Badraoui, 2006). La dégradation des sols est une problématique globale et complexe (Oldeman et al. 1991 ; Scherr, 1999 ; Eswaran et al. 2001 ; Eswaran et Reich, 2002). Malgré toutes les recherches et les études, les problèmes de mise en valeur des sols s'accroissent et s'amplifient, représentés par la dégradation des sols irrigués qui constituent l'un des grandes richesses du Maroc (1 million de ha) et aussi la dégradation des sols non irrigués (Bour) qui couvrent l'essentiel de la SAU (surface agricole utile) du pays (environ 7.7 millions d'ha) (Badraoui, 2006), ces sols qui font l'objet de notre étude.

L'importance de la protection des sols est reconnue à l'échelle internationale et au sein de l'U.E (la conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement). Les propositions de la conférence de sommet de la terre sur l'utilisation durable des sols ont été

adoptées en juin 1992 (Rio de Janeiro), et sont entrées en vigueur en décembre 1996 (Raphaël ; 2002). En fait, pour parvenir à une durabilité des systèmes de production et à un développement durable, il est nécessaire de préserver le sol puisqu'il subit une dégradation importante de sa qualité suite à l'intensification agricole sous irrigation, les opérations de génie civil, la gestion de déchets, la déforestation, les pollutions accidentelles organiques et chimiques, et aussi l'utilisation des activités humaines de manière non raisonnée des multiples fonctions du sol.

Dans le passé, l'identification de la fertilité reposait sur la capacité de soutenir la production agricole. De nos jours, la qualité des sols comprend un large éventail de fonctions et de services. Au cours des dernières décennies, les pédologues ont proposé diverses définitions du terme «qualité du sol» (de Haan et al. 1990; Chaussod, 1996; Máté et Tóth, 1996; Bouma, 1997; Doran et Safley, 1997; Karlen et al. 1997; Sojka et Upchurch, 1999; Davidson, 2000; Doran et Zeiss, 2000; Loveland et Thompson, 2001; Tóth et al. 2007), allant d'un point de vue purement agricole à un point de vue plus environnemental.

Depuis le début des années 90, le concept de qualité du sol a fait l'objet d'une attention soutenue. De gros efforts ont d'abord été déployés pour définir la qualité du sol, puis pour concrétiser ce concept vague (Armenise et al, 2013). L'évaluation de la qualité du sol est devenue un défi majeur pour comprendre la dynamique et la distribution des caractéristiques du sol qui sont essentielles pour prédire l'utilisation future durable de chaque type du sol. Néanmoins, le concept de qualité du sol n'est pas bien défini, car il appartient fortement aux perspectives des utilisateurs des terres (Ennaji et al. 2018b). Par conséquent, de nombreux indicateurs ont récemment été utilisés pour évaluer la qualité du sol en fonction des utilisations et des contextes des terres, car les propriétés du sol varient considérablement selon les types de sols et les systèmes de gestion (Barakat et al. 2017 ; Bastida et al. 2008). Aparicio et Costa, 2007 ; Bremer et Ellert, 2004 ; Herrick et al. 2002), bien que la recherche scientifique est aujourd'hui capable de fournir des indicateurs spécifiques de qualité des sols, ces indicateurs ne sont pas encore directement applicables à tous les types de sol et modes d'utilisation des terres, en raison de l'absence de valeurs seuils de référence. La connaissance de ces valeurs de référence constitue un enjeu important de la recherche sur la qualité des sols. Il est donc urgent de développer des méthodologies fiables, rapides et économiquement viables pour l'indication spécifique de la qualité des sols.

D'après Tóth et al. (2007), la qualité du sol fait référence à sa capacité à fournir des services éco-systémiques et sociaux et à maintenir de telles fonctions dans des conditions changeantes.

Doran et Parkin (1994) sont considérés la qualité des sols comme une capacité d'un sol à fonctionner, dans les limites de l'utilisation des sols et des écosystèmes, afin de maintenir la productivité biologique, de préserver la qualité de l'environnement et de promouvoir la santé des plantes, des animaux et des humains. Le maintien de la qualité des sols a été considéré comme un élément clé de la durabilité de l'agriculture et un objectif de la plupart des agriculteurs, des environnementalistes et des décideurs gouvernementaux (Sherwood et Uphoff 2000). De cette manière, la qualité des sols est devenue un outil d'évaluation de la durabilité des systèmes de gestion des sols (Schloter et al. 2006). La qualité des sols est de plus en plus proposée comme indicateur de la qualité de l'environnement (Conseil national de la recherche, 1993), de la sécurité alimentaire (Lal, 1999) et de la viabilité économique (Hillel, 1991). Certains préfèrent le terme santé des sols (Doran et al. 1996; Doran et Safley, 1997), car il décrit le sol comme un système dynamique vivant dont les fonctions sont influencées par la diversité des organismes vivants. De bonnes pratiques de gestion et de conservation sont nécessaires, car la santé, la biodiversité et la résilience des sols sont sensibles aux perturbations anthropiques (Freckman et Virginia, 1997). Un équilibre entre les fonctions du sol pour la productivité, la qualité de l'environnement et la santé des plantes et des animaux est nécessaire pour une santé optimale des sols (Doran, 2002). Dans la littérature on peut considérer que la qualité du sol englobe la santé du sol (Anderson, 2003).

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à l'étude des relations entre la structuration physique du milieu et la structuration des propriétés physico-chimique du sol. Au-delà des recherches relatives aux indicateurs, nous avons développé un axe de recherche comparatif entre chaque propriété des sols, focalisé sur l'identification et l'évaluation de qualité des sols dégradés par différentes activités anthropiques et localisées dans différents contextes. Malgré les différents problèmes, nous n'avons qu'un objectif commun: rester bon état du sol pour une production végétale durable.

2. Objectifs

Le but général de cette thèse est d'évaluer la qualité des sols dans la partie nord-est de la plaine de Tadla soumise à des perturbations intenses (tels que : pollutions des sols résultant de pratiques agricoles inappropriées, intensification agricole non maîtrisée, la salinisation et l'urbanisation des terres agricoles) par l'analyse des comportements physique et chimique du sol, et la dynamique de leurs interactions.

Pour cela, il est nécessaire de :

- Comprendre et décrire le concept de la qualité des sols;
- Identifier les indicateurs physiques, chimiques du sol les plus pertinents et déterminer les méthodes et techniques d'analyse les plus précises;
- Identifier des méthodes déterminées permettant d'agréger l'information analytique en indicateurs fonctionnels de qualité ;
- Évaluer les modifications de ces paramètres sur des échelles d'espace et de temps.

La finalité de ce travail est la mise au point d'une méthodologie opérationnelle permettant d'évaluer la qualité des sols de manière fiable, rapide, économique, permettant de contribuer à l'étude du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes terrestres.

3. Structure de la thèse

Le document de thèse est structuré en quatre parties :

- **La première partie** décrit l'introduction générale, le contexte et les objectifs de la présente étude.
- **La deuxième partie** est divisée en deux chapitres : le premier, est établi le point sur la synthèse bibliographique de sol (définition, composition, caractérisation, les fonctions ...) et aussi sur les définitions du concept de la qualité des sols et sur les indicateurs permettant l'évaluation de cette qualité. Le deuxième, décrit la zone d'étude pour l'application de la méthodologie de recherche, l'acquisition et les analyses des données au laboratoire, les prétraitements des données par les méthodes statistiques, la description des méthodes d'analyse spatiale et d'interpolation dans un environnement SIG.
- **La troisième partie** traite les résultats obtenus et la discussion par rapport aux autres études. Elle se divise en deux chapitres décrivant successivement :
 - l'état de la fertilité et la qualité des sols par deux méthodes différents (chapitre 3),
 - Et l'évaluation de la pollution métallique et le risque écologique des sols agricoles (chapitre 4).
- **Finalement** la conclusion générale et les recommandations de cette recherche.

Chapitre I

Revue de littérature

I.1. Introduction

Cette partie est consacrée à la synthèse bibliographique d'un certain nombre de travaux de recherche sur l'évaluation de la qualité du sol. On définit tout d'abord le sol, ses constituants et ses fonctions et ensuite le concept de qualité de sol et ses indicateurs.

I.2. Définition du sol

Le sol est un composant de surface de la terre qui s'est développé à partir des matériaux géologiques et d'une biomasse morte (Badraoui, 2006). Contrairement aux roches, aux plantes et aux animaux, les sols ne sont pas des objets naturels distincts, mais définis par des relations complexes entre la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère (Winfried et al. 2017). Le sol est une source fondamentale de production agricole. Il représente à la fois le domaine des processus vitaux importants et le lieu de vie de nombreux organismes vivants (Atlas et Bartha, 1997). Le sol est un milieu vivant très structuré (Gobat et al, 1998). La vie du sol est liée aux échanges entre le monde minéral, organique et vivant. Les sols subissent des transformations continues et leur nature dynamique est importante pour l'interaction des processus biologiques, biogéochimiques et physiques. En même temps, les sols sont vulnérables et affectés par l'activité humaine et sont souvent sujets à la dégradation. Le sol est actuellement considéré comme une interface dans l'environnement et une ressource pour le développement (Robert, 1996).

I.3. Constituants du sol

Le sol est un milieu poreux constitué de quatre composants de base (Morel, 1989, Lavelle et Spain, 2001 ; Gobat et al. 2003) :

- composants minéraux (y compris minéraux primaires et secondaires, composants amorphes et sels solubles dans l'eau) ;
- composants organiques (biomasse morte et produits de leur décomposition; les biotes vivants tels que les animaux, les plantes et les micro-organismes ne font pas partie du sol à proprement parler) ;
- eau ;
- air.

Les proportions relatives de ces composants varient en fonction du contexte environnemental du sol et de son utilisation (Winfried et al. 2017).

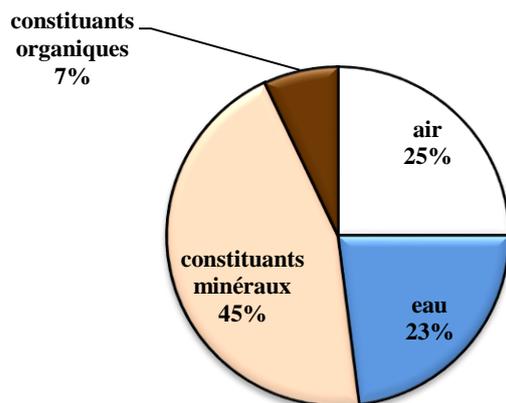


Figure I. 1: Compositions moyennes d'un sol (% en volume)

I.3.1. Composants minéraux

La matière minérale est la composante solide dominant de la plupart des sols (à l'exception de la tourbe et des autres sols organiques). La matière minérale forme un substrat solide / ferme entre les racines de la plante et leur fournit des éléments nutritifs (Winfried et al. 2017).

I.3.2. Organismes

Les substances organiques présentes dans le sol font partie d'organismes vivants (biote) ou ne le sont pas. La totalité des substances organiques présentes dans le sol qui ne fait pas partie d'organismes vivants est définie comme une matière organique du sol, également appelée matière organique morte. Les composants et la MOS (la Matière Organique du Sol) constituent la phase solide du sol. Les parties vivantes du sol comprennent la flore du sol, la faune du sol et les racines des plantes supérieures (Bouché 1975). La flore du sol et le plus petit groupe de la faune du sol sont également appelés microorganismes du sol. La variété et la variabilité de la vie s'appellent la diversité biologique de la biodiversité.

I.3.3. Composants organiques

La Matière Organique du Sol (MOS) comprend les molécules organiques présentes dans le sol, qui ne font pas partie d'organismes vivants. La MOS est la seule source d'azote dans la plupart des sols et une source importante d'autres éléments nutritifs pour les plantes (en particulier le soufre et le phosphore) (Legros, 2007). La teneur en eau et en air et les conditions de température dans le sol sont très importantes pour l'échange d'ions et la fertilité du sol (Kucharik et al. 2001), avec les organismes du sol, la MOS contribue à la structure du

sol. Seule une petite fraction de la matière organique du sol est mobile et soluble dans l'eau. Cette petite fraction est appelée matière organique dissoute.

I.3.4. Eau du sol

L'eau du sol - la composante liquide du système de sol - remplit plusieurs fonctions:

- Sur le plan écologique, l'eau du sol répond aux besoins des plantes et d'autres organismes en eau et en éléments nutritifs dissous dans l'eau du sol (solution de sol).
- Pédo-logiquement, l'eau du sol entraîne des processus de formation du sol tels que les l'altération, l'accumulation de matière organique, le transport de substances, etc.

I.3.5. Air du sol

Air du sol - le composant gazeux du système de sol est important:

- Écologiquement: pour la respiration des racines des plantes, des animaux et des microorganismes.
- Pédo-géniquement: en contrôlant les processus d'oxydation et de réduction.

I.4. Différentes fonctions des sols

Par rapport au monde, par rapport à la vie en général et, plus particulièrement, par rapport aux besoins et à la santé des sociétés humaines, les sols remplissent diverses fonctions fondamentales. Karlen et al. (1997), Ruellan. (2003), Winfried et al. (2017). ont présenté une série des fonctions essentielles du sol bénéfiques à l'humanité:

- La fonction alimentaire : Le sol nourrit le monde ; il produit, contient, accumule, tous les éléments nécessaires à la vie (azote, phosphore, calcium, potassium, fer, oligoéléments...) y compris l'air et l'eau.
- Réguler et fractionner les flux d'énergies et d'eau.
- Les fonctions de filtrage, de transformation et de tamponnage à l'interface du sol avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère.
- La fonction de la biodiversité, maintien des fonctions écologiques complexes reliant les plantes, les animaux et les microorganismes.
- Une source de matières premières de base telles que le sable, le gravier et la tourbe
- Protection du patrimoine culturel.

- On pourrait aussi rajouter la fonction de puits de carbone (régulation du climat) mise en avant depuis le protocole de Kyoto en 1997.

D'après Andrews et al. (2004) ils ont tenté d'associer ces fonctions du sol à trois objectifs de gestion des sols et des territoires (production biologique, recyclage des déchets, protection environnementale ; Tableau I.1).

Tableau I. 1: Objectifs de gestion potentiels et fonctions du sol associées en vue de sélectionner des indicateurs de qualité du sol adaptés (d'après Andrews et al. 2004).

Objectif de gestion	Fonction du sol
Production biologique	Cycle des nutriments
	Relations avec l'eau
Recyclage des déchets	Support et stabilité physique
	Épuration, pouvoir tampon
Protection environnementale	Résistance et résilience
	Habitat et biodiversité

Le tableau I.1 illustre également les fonctions essentielles du sol et donc les qualités spécifiques exigées pour un sol varient avec le mode d'utilisation des terres choisi par la société humaine, conditionnant finalement le choix des indicateurs de qualité adaptés.

I.5. Qualité des sols

I.5.1. Concept de la qualité des sols

Les premières pratiques de conservation de la productivité des sols datent de l'Empire romain (Mazoyer et Roudart, 1997). Les définitions les plus pratiques de la qualité des sols ont trait à leurs fonctions.

Karlen et al. (1992) définissent la qualité du sol comme « l'aptitude du sol à servir de milieu naturel pour la croissance des plantes nécessaires à la vie des animaux et des hommes ». Leur définition est basée sur le rôle de la qualité du sol dans le maintien de la productivité à long terme et dans la préservation de l'environnement.

Doran et al. (1996) et Doran et Safley, (1997) ont préféré le terme santé des sols, parce qu'il décrit le sol comme un système dynamique vivant dont les fonctions sont influencées par la diversité des organismes vivants.

D'après Tóth et al. (2007), la qualité du sol fait référence à sa capacité à fournir des services éco-systémiques et sociaux et à maintenir de telles fonctions dans des conditions changeantes. Le concept de qualité du sol exprimé par cette définition permet des applications pratiques en ce qui concerne les services sociaux et/ou éco-systémiques ciblés. L'évaluation de la qualité du sol doit donc être effectuée en tenant particulièrement compte de l'objectif de l'évaluation (Toth, 2008).

La Société américaine des sciences du sol (SSSA) (1994) et Karlen et al. (1997) ont proposé une définition qui présente une intégration des connaissances scientifiques avec une approche pratique. La qualité des sols décrite par la SSSA est la «Capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner dans les limites d'écosystèmes naturels ou aménagés, de maintenir la productivité des plantes et des animaux, de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et de soutenir la santé et les habitations». La qualité du sol peut être brièvement définie comme la durabilité d'un sol pour un usage spécifique (Gregorich et al. 1994).

La qualité des sols est un concept de plus en plus populaire, en particulier pour ses aspects biologiques, et «santé des sols» est même utilisé comme synonyme dans certains pays, de nombreux auteurs (i.e. Chaussod, 1996, Doran et al. 1998; Blum, 2000) et les membres de la SSSA s'accordent à penser que les termes "qualité des sols" et "santé des sols" sont identiques et interchangeables.

L'intérêt pour l'évaluation de la qualité et de la santé de nos ressources en sol a été stimulé par la prise de conscience croissante que le sol est un élément essentiel de la biosphère terrestre, fonctionnant non seulement dans la production d'aliments et de fibres, mais également dans le fonctionnement des écosystèmes et le maintien de l'environnement, qualité de l'environnement local, régional et mondial (Glanz, 1995). D'après Mausbach et Tugel (1997), le concept doit intégrer les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol, et l'évolution de ce sol liée à l'évolution du paysage auquel il appartient.

L'évaluation de la qualité du sol devrait donc inclure l'analyse de ses propriétés physiques et chimiques. Ces indicateurs doivent permettre d'évaluer la qualité ponctuelle d'un sol, mais également l'évolution de cette qualité dans le temps. La difficulté d'appréhender et de définir la qualité des sols réside dans la grande variabilité temporelle et spatiale de l'objet. Le sol est un système dynamique dont les propriétés intrinsèques évoluent constamment, plus ou moins rapidement, au court du temps.

Le concept de qualité des sols est une notion subjective et très dynamique. Sa définition donne lieu à de nombreuses interprétations qui répondent toujours aux préoccupations sociales et scientifiques actuelles.

Qualité du sol = bon fonctionnement + résilience => fourniture de services

I.5.2. Indicateurs de la qualité des sols

Le succès de la gestion dans le maintien de la qualité des sols dépend de notre compréhension de la façon dont les sols réagissent à l'utilisation et aux pratiques agricoles au fil du temps (Gregorich et al. 1994). Par conséquent, les méthodes permettant de quantifier la qualité du sol doivent évaluer les changements d'attributs du sol sélectionnés au fil du temps. En outre, il n'existe pas de mesure unique permettant de quantifier la qualité du sol (Stewart, 1992), mais certaines propriétés du sol pourraient constituer de bons indicateurs si on les considère ensemble. Traditionnellement, la qualité du sol était principalement associée à sa productivité (Hornick, 1992), mais de nos jours-là, le concept de la qualité du sol est beaucoup plus complet. La qualité du sol dépend d'un grand nombre de propriétés chimiques, physiques et biologiques, et sa caractérisation nécessite la sélection des propriétés les plus sensibles aux changements de pratiques de gestion (Yakovchenko et al. 1996). Les bons indicateurs de la qualité des sols doivent être liés aux processus éco-systémiques, intégrant les propriétés physiques et chimiques. Ils doivent être suffisamment sensibles à la gestion et permettre un accès analytique et une utilité pratique aux spécialistes de l'agriculture, aux producteurs, aux défenseurs de l'environnement et aux décideurs (Doran et Parkin, 1996). Initialement, l'utilisation d'un ensemble d'indicateurs de base pour évaluer la qualité des sols dans divers systèmes de gestion agricole a été proposée. Nombre de ces indicateurs clés sont extrêmement utiles aux spécialistes (chercheurs, consultants, agents de vulgarisation et spécialistes de la conservation), mais certains d'entre eux dépassent les compétences du producteur (Hamblin, 1991). Néanmoins, l'utilisation d'indicateurs simples de la qualité du sol ayant une signification pour les agriculteurs et les autres gestionnaires de terres sera probablement le moyen le plus efficace de lier la science à la pratique pour évaluer la durabilité des pratiques de gestion (Romig et al. 1995). Bien que les sols aient une qualité inhérente liée à leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques dans les limites imposées par le climat et les écosystèmes, le déterminant ultime de la qualité et de la santé des sols est le gestionnaire des terres. À ce titre, l'évaluation de la qualité des sols et l'orientation des changements dans le

temps constituent un indicateur fondamental de la gestion durable (Doran, 2002; Karlen et al. 1997).

Pour évaluer la qualité du sol, les indicateurs (propriétés du sol) sont généralement liés à une fonction spécifique du sol (Howard, 1993; Larson et Pierce, 1994; Karlen et al. 1996; Doran et al. 1996), par exemple, comme support pour la croissance des plantes, et reflètent des changements à diverses échelles spatiales et temporelles. Pour constituer de bons indicateurs, les propriétés du sol sélectionnées doivent être sensibles, faciles à mesurer, vérifiables et bien liées à la gestion des terres et à la transformation de l'environnement (Carter et al. 1997; Seybold et al. 2001; Erkossa et al. 2007). Dans notre recherche, des propriétés particulières du sol ont été choisies comme indicateurs potentiels.

I.5.2.1. Indicateurs physiques

La recherche sur la qualité des sols doit donc redoubler d'efforts pour simplifier les indicateurs du sol et les rendre abordables. La qualité physique d'un sol est étroitement liée à plusieurs paramètres tels que : la densité apparente, la rétention d'eau et les paramètres de transfert, la stabilité structurelle ainsi que la structure et la texture (Pardo et al. 2000). Nous avons choisi la texture en tant que une bonne indicateurs physique de base du sol et pour étudier la qualité des sols. la texture a une influence primordiale sur le régime hydrique des sols, d'une part sur la réserve utile maximale de chaque horizon, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale dont la végétation peut disposer, il est bien connu par exemple que les sols sableux ont de faibles réserves en eau, d'autre part sur la circulation de l'eau dans le sol : c'est-à-dire un sol riche en sable est perméable et filtrant, un horizon argileux peut former un obstacle à l'infiltration verticale de l'eau (Gregorich et al. 1994).. En outre, la texture joue un rôle dans l'aération du sol et sa porosité (Figure I.2) : une texture sableuse est le signe d'un sol bien aéré tandis qu'une texture trop argileuse sera le signe d'un milieu imperméable et mal aéré, formant alors un obstacle à la pénétration des racines.

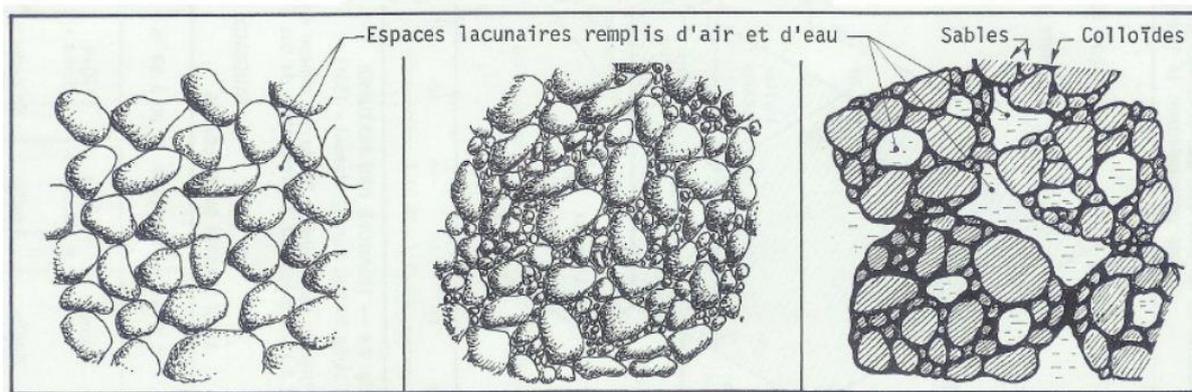


Figure I. 2: Texture et aération du sol (Ayers et al.1972)

La dégradation des propriétés physiques d'un sol peut entraîner une réduction importante de sa qualité. Une déstructuration affecte la pénétration des racines dans le sol (Tramblay-Bœuf, 1995). La structure du sol en tant que telle n'est pas un facteur de croissance des plantes, mais elle influence pratiquement tous les facteurs de croissance des plantes: elle détermine la profondeur à laquelle les racines peuvent pénétrer, la quantité d'eau pouvant être stockée dans le sol (distribution, mouvement et rétention de l'eau dans le sol), la disponibilité d'éléments nutritifs pour les plantes (recyclage des éléments nutritifs), aération, mouvement de la faune du sol et activité microbienne (Hermawan et Cameron, 1993; Langemaack, 1999; Rampazzo et al. 1998; Pardo et al. 2000). La structure du sol évolue lentement sous l'action de processus naturels tels que les cycles d'humectation-dessiccation et de gel-dégel (Kemper et Rosneau, 1984 ; Haynes et Swift, 1990), et de l'apport de matière organique (résidus végétaux et animaux). Cependant, la qualité structurale est une notion difficile à définir vu les liens étroits qui existent entre la structure et divers facteurs comme l'écoulement de l'eau et l'aération du sol (Gros, R. 2002).

I.5.2.2. Indicateurs chimiques

Il est d'abord important de rappeler que le sol fonctionne comme un système chimique ouvert. Cela signifie qu'une bonne partie des éléments chimiques du sol peuvent soit être exportés du fait des récoltes, soit éliminés des sols par les eaux. Les apports atmosphériques, mais aussi les pratiques humaines peuvent participer à enrichir le sol au plan chimique. Au plan chimique, le sol est avant tout la source d'ions indispensables pour les plantes. La présence d'ions en excès peut être à l'origine de phénomènes de toxicité. Au contraire, le déficit de ces ions entraîne une diminution de la fertilité du sol. La pollution des sols provenant de diverses sources telles que : l'activité agricole, des épandages de boues de stations d'épurations et/ou

du stockage des déchets industriels, devient aujourd'hui un problème préoccupant. Elle se traduit par des impacts négatifs sur le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que par des risques de contaminations accompagnés d'une détérioration de la santé publique. Toutes perturbations de ces propriétés (naturelles ou anthropiques) peuvent provoquer une réduction de la qualité biologique d'un sol et par voie de conséquence induire un dysfonctionnement de l'écosystème terrestre.

L'industrie est aussi une source importante d'apport en éléments chimiques toxiques, particulièrement en éléments traces métalliques (ETM), mais aussi en molécules organiques (HAP, huiles...) (Chassin et al. 1996). Le sol est un système globalement accumulateur vis-à-vis des éléments traces. Les pollutions anthropiques passées et actuelles conduisent à l'accumulation de ces éléments polluants minéraux dans les sols. La construction d'une gestion durable des sols et des sites pollués nécessite la connaissance des différentes sources de pollutions.

L'organigramme I.3, exprime de façon simplifiée l'origine des écoulements de polluants. Robert et Juste (1997) décrivent de façon précise les origines des éléments traces présents dans les sols. Ils en concluent sur la récurrence de quatre principales sources de pollutions qui sont : (1) l'origine naturelle par apports des fonds géochimiques locaux, (2) les apports atmosphériques, (3) les apports par les pratiques agricoles (fumures organiques ou minérales), et (4) les apports par les pollutions industrielles.

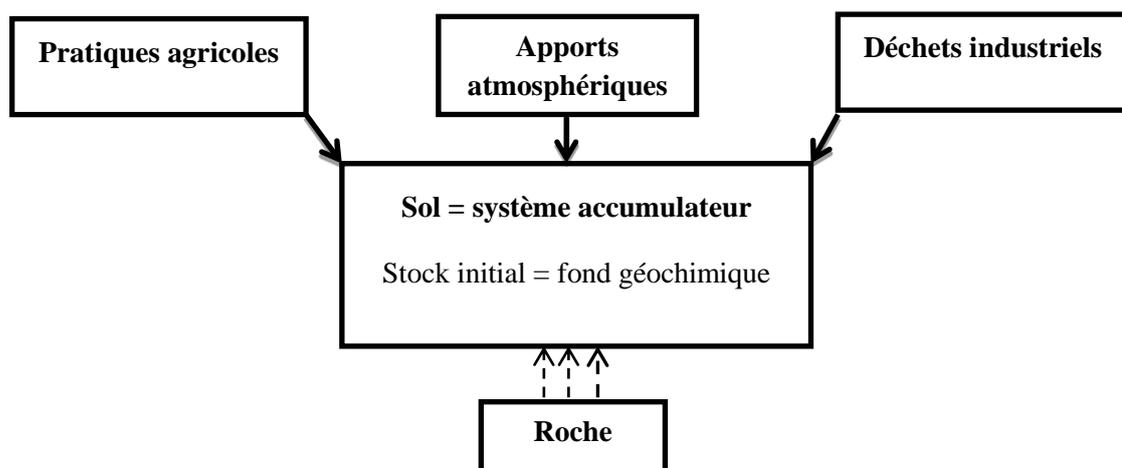


Figure I. 3: Écoulement et stock des éléments traces vers le sol (Robert et Juste, 1997)

Les caractéristiques édaphiques de chaque sol sont différentes. Elles ne réagiront donc pas toutes de la même manière vis-à-vis de la présence d'une quantité définie d'un polluant donné. Les facteurs influençant la réaction du sol face à une pollution sont nombreux et variés. Ils déterminent la biodisponibilité des polluants vis-à-vis des organismes vivants dans le sol et nécessitent donc leur appréhension préalable.

L'évaluation de la qualité du sol, basée sur les propriétés chimiques, requiert au vu de cette synthèse, un protocole d'échantillonnage adapté, des méthodes d'analyses chimiques appropriées à la nature de la perturbation, des méthodes de localisation et des formes des contaminants dans les sols, des connaissances sur les facteurs qui déterminent leurs comportements.

I.5.2.3. Indice de la qualité de sol (SIQ)

L'évaluation de la qualité et de la santé d'un sol complexe nécessite un ensemble minimal de données de paramètres physiques et/ou chimiques (Gregorich et al. 1994; Doran et Safely, 1997) qui doivent être agrégés pour fournir un indice global de la qualité du sol (Burns et al. .., 2006). La comparaison des indicateurs individuels par rapport aux sites de référence est un moyen d'évaluer la qualité du sol (Bucher, 2002; Carey et al. 2009; Nelson et al. 2009), mais les indicateurs individuels sont souvent interdépendants et peuvent indiquer une redondance fonctionnelle (Hunt et Wall, 2002) ; leur association significative dans un seul indice peut donc améliorer l'évaluation (Bucher, 2002; Andrews et al. 2002). Les valeurs des indicateurs sélectionnés doivent être converties en scores avant d'être intégrées à un indice. Cela nécessite l'établissement d'une relation fonctionnelle entre la fonction du sol en question et les indicateurs (Erkossa et al. 2007).

❖ Exemple des indices :

- L'indice additif : Lister un petit nombre de paramètres à prendre en compte, attribuer une note, pondérer la note en fonction de l'importance du paramètre dans la réalisation de la fonction (wt).

$$\text{Indice} = A * wt_a + B * wt_b + C * wt_c(1)$$

- L'indice « écart à la référence »: comparaison à un sol considéré comme de bonne qualité.

I.5.3. Pratiques agricoles et leur impact sur la qualité du sol

Le sol est sous pression et on pense que sa qualité diminue. La dégradation des sols était un grave problème mondial imputable à des activités humaines telles que des pratiques agricoles inappropriées, l'étalement urbain et industriel, les activités industrielles, et la construction. L'altération des caractéristiques du sol par l'impact anthropique modifie les capacités fonctionnelles du sol. Les technologies agricoles et les pratiques actuelles telles que la monoculture, la gestion des résidus, la fertilisation minérale, la surutilisation de pesticides, les machines agricoles lourdes, les pratiques de gestion inadéquates des sols et de l'irrigation peuvent affecter considérablement la qualité des sols en modifiant les propriétés physiques, chimiques et biologiques (Fauci & Dick, 1994).

L'impact humain à long terme ainsi que la gestion à court terme des sols modifient les flux de matériaux et d'énergie. L'érosion, une diminution de la teneur en matière organique et de la biodiversité, la contamination, le compactage, et la salinisation ont été identifiés comme les principales menaces pour le sol (Andrews et Carroll, 2002). L'utilisation intensive de pesticides et d'engrais est la principale activité conduisant à la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Albiach et al. 2000). Ces modifications entraînent une transformation plus ou moins importante des processus du sol. Lorsque ces processus sont traçables et contrôlables, l'utilisation et la qualité du sol restent durables à long terme (Toth, 2008). Il est important de savoir que le sol est une ressource finie et non renouvelable, car sa régénération par altération chimique et biologique de la roche sous-jacente nécessite un temps géologique (Huber et al. 2001).

Les interventions mécaniques préliminaires sur les sols, telles que les terrasses, le nivellement des terres et les labours profonds, sont les plus rugueuses et modifient les profils de sol de manière inhérente aux activités anthropiques. Ces changements entraînent des modifications majeures du paysage et la dégradation des sols (Borselli et al. 2006). De plus, de nouvelles techniques de gestion avec une production plus intensive sont utilisées après l'abandon des pratiques traditionnelles (García-Ruiz et al. 1996; Zalidis et al. 2002).

La redistribution du sol modifie également la stabilité de la pente du sol et celle des terrasses, augmentant le risque de mouvements de masse en surface. Certaines études ont mis en évidence la variabilité spatiale des propriétés des sols le long des collines (Agbenin et Tiessen, 1995; Bartoli et al. 1995) et avec le degré de pente (Janeau et al. 2003).

I.5.3.1. Amendements organiques

L'application d'engrais organiques est liée aux pools de carbone organique et d'azote du sol, qui modifient par conséquent les paramètres microbiens et la nutrition des plantes. Le maintien de la matière organique du sol est important pour la productivité à long terme des agroécosystèmes. L'application au sol d'amendements organiques est une stratégie de gestion pour contrer la perte progressive de matière organique (Marinari et al. 2000; Tejada et al. 2008). L'ajout d'amendements organiques peut améliorer les propriétés physico-chimiques, biochimiques et microbiologiques du sol impliquées dans les cycles biogéochimiques et influe donc positivement sur les paramètres de productivité des plantes. Les amendements organiques sont une source de nutriments à libération lente et d'énergie disponible pour les micro-organismes du sol (Gomez et al. 2006). Parmi les principaux avantages attribués à l'utilisation d'amendements organiques figurent une amélioration de l'agrégation du sol et une densité apparente réduite, une plus grande capacité de rétention d'eau, une stabilisation du pH et une CEC accrue (Sasal et al. 2000; Tejada et al. 2008). Moins de perte potentielle de nutriments et en particulier une réduction de la perte de nitrate sont également citées comme des effets positifs de l'agriculture biologique. Étant donné que cela pourrait également favoriser la santé des plantes, il semble possible d'obtenir des rendements équivalents ou même plus élevés en production biologique qu'avec l'agriculture conventionnelle (Bulluck et al. 2002; Courtney et Mullen, 2008).

Des chercheurs suisses (Fließbach et al. 2007) ont conclu que l'agriculture biologique avec du fumier composté est la seule pratique agricole qui limite la diminution de la teneur en carbone dans le sol. Ils montrent que l'agriculture biologique est la meilleure pratique agricole pour une gestion durable des terres, notamment par le renforcement de l'activité microbienne du sol, conduisant à une augmentation des échanges de minéraux entre les plantes et le sol. L'utilisation d'amendements a été signalée précédemment pour augmenter la matière organique du sol, fournir des nutriments (Lee et al. 2004). Les résultats sont conditionnés par la composition des amendements, le taux d'application et le type de sol (Albiach et al. 2001; Tejada et Gonzalez, 2003). En outre, comme les sols sont à la base de la production alimentaire, la préservation de leur qualité avec le fumier et la faible utilisation de produits chimiques est essentielle pour une gestion durable des terres, même si ces systèmes agricoles ne sont pas les plus productifs. Cependant, le travail du sol peut également être utilisé pour incorporer des amendements dans le sol, et donc étendre leur effet dans un sol plus profond (Treonis et al. 2010).

I.5.3.2. Irrigation

L'irrigation est l'une des pratiques agricoles les plus courantes et son effet positif sur la production agricole est bien connu. Les avantages de l'irrigation peuvent inclure: une meilleure et meilleure qualité des cultures, une production agricole plus précoce, des rendements plus élevés, une distribution efficace des nutriments, moins de stress des plantes et une variabilité des rendements réduite (Cetin et al. 2004). Bien que l'agriculture irriguée présente certains avantages tels que l'augmentation du rendement (Bilgehan, 1998), elle pose certains problèmes tels que l'augmentation des taux de drainage, la salinisation-alcalinisation et la dégradation de la structure du sol (Çullu et al. 2002). L'irrigation est directement liée aux conditions hydriques du sol, ce qui pourrait potentiellement affecter la structure du sol et donc le rapport eau-air du sol, la nutrition des plantes, la biomasse microbienne et l'activité du sol. Des technologies de production inappropriées ont entraîné une détérioration de la qualité du sol, entraînant des pertes de matière organique et une dégradation de la structure du sol, affectant les flux d'eau, d'air et de nutriments et, par conséquent, la croissance des plantes (Golchin et al. 1995). D'autres externalités telles que la formation de croûtes, le ruissellement, la pollution des eaux de surface et souterraines et l'augmentation des émissions de CO₂ sont également influencées par l'irrigation. La biodiversité des espèces peut également être affectée par les pratiques de gestion: en général, les pratiques agricoles à forte consommation réduisent la biodiversité (Munyanziza et al. 1997; Lupwayi et al. 2001). Les effets de l'irrigation en eau douce sur le sol sont principalement physiques, notamment l'augmentation du drainage et du transport des nutriments. L'irrigation des eaux usées peut avoir des effets chimiques et biologiques plus importants sur les propriétés du sol. Parmi les risques potentiels associés à l'irrigation avec des eaux traitées, figure la dégradation de la structure du sol, par ex. détérioration de la stabilité globale, diminution de la conductivité hydraulique du sol, étanchéité de surface, ruissellement et problèmes d'érosion, compactage du sol et diminution de l'aération du sol (Bhardwaj et al., 2007). En plus de l'impact de l'hétérogénéité de l'irrigation sur la distribution de la percolation sur le terrain, on pense souvent qu'une irrigation intensive conduit à un mouvement rapide du nitrate sous la zone racinaire (Endelman et al. 1974) car le nitrate est transporté à travers le profil avec l'eau percolant.

On peut conclure que, selon divers paramètres tels que la qualité de l'eau, le sol, les techniques agricoles, la fertilisation et d'autres traitements chimiques, les cultures et le climat, l'irrigation peut parfois gravement endommager le sol (Miller et Donahue, 1995; Tedeschi et Dell'Aquila, 2005).

I.5.3.3. Chaulage

Le chaulage est une pratique agricole traditionnelle pour lutter contre l'acidification du sol et améliorer l'approvisionnement en calcium et en magnésium, avec des effets sur les cultures et la qualité du sol (y compris les aspects physiques et biologiques). En dépit de l'application prolongée de chaux, l'étude des effets du chaulage sur la matière organique est restée limitée à la teneur en C, au rapport massique carbone / azote (rapport C / N) et au stockage du carbone (Derome et al. 1986; Persson et al. 1995). Les observations suivantes ont fait naître l'hypothèse que le chaulage pourrait également influencer la composition chimique de la matière organique du sol (MOS). Le rapport C / N du matériau de la couche superficielle organique diminue généralement (Belkacem et Nys, 1995; Marschner et Wilczynski, 1991) après l'application de chaux. La croissance des arbres peut être inhibée (Derome et al. 1986) par le chaulage, probablement en raison de la stimulation de la croissance de la végétation au sol (mauvaises herbes) (Rodenkirchen, 1998).

Les populations de la faune du sol sont généralement influencées par le chaulage et, en général, ressemblent à celles des sols riches en nutriments (Persson, 1988). Biomasse microbienne du sol (Smolander et M älkönen, 1994; Badalucco et al. 1992), l'activité microbienne (Anderson, 1998) et le potentiel de nitrification et de lessivage des nitrates (Neale et al. 1997; De Boer et al. 1993) peut augmenter après le chaulage. La croissance des racines dans la couche organique peut être stimulée (Raspe et Haug, 1998) ou inhibée (Helmisaari et Hallbäcken, 1999) par le chaulage.

I.6. Conclusion

L'étude des sols et l'évaluation de sa qualité donnent lieu à une littérature très abondante et à un foisonnement de travaux de par le monde. L'étude de la qualité des sols in situ et l'impact des activités agricole ou anthropique sur les propriétés des sols est peu nombreux et difficile à appliquer, pour cela ce travail visera à faire des études profondes sur la qualité des sols de la zone d'étude, l'utilisation des analyses physico-chimiques et des outils statistiques afin d'atteindre nos objectifs tels que : Caractérisation physico-chimique de la qualité et la fertilité des sols agricoles, Évaluation de la pollution métallique et le risque écologique dans la zone d'étude.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude et la méthodologie de travail notamment les sites d'échantillonnage, la préparation des échantillons des sols, les techniques analytiques utilisées et les différentes méthodes statistiques de traitement des données acquises lors de ce travail de thèse.

II.2. Présentation de la zone d'étude

II.2.1. Cadre géographique

La zone d'étude d'une superficie de ($\approx 1100 \text{ km}^2$) correspond à la partie nord-est de la plaine de Tadla au centre du Maroc (Figure II.1). La plaine de Tadla est délimitée au nord-est par le plateau des phosphates, et au sud-est par la montagne de l'Atlas de Beni-Mellal et à l'Ouest par IBahira (Province de Kalaa Srarhna). Elle est traversée par le fleuve d'Oum Er-Rbia. L'altitude varie de 400 m au nord à 700 m au sud. La plaine de Tadla abrite une des plus importantes populations de la région de Béni-Mellal-Khénifra et comprend ses principaux centres économiques et sociaux tels que les villes de Béni-Mellal et de Fkih Ben Salah. L'agriculture et l'élevage sont les principales sources de revenus de 62% de la population active de la région. Les systèmes agricoles sont largement basés sur le secteur du travail du sol, qui est en grande partie caractérisé par la culture de céréales, de légumineuses, de betteraves à sucre, de cultures fourragères et de maraîchage, d'olives et d'agrumes. L'agriculture dépend de la qualité du sol et des ressources en eaux de surface et souterraines de la région. La zone étudiée est caractérisée par diverses ressources du sous-sol et par la topographie qui la rend appropriée à diverses utilisations. Les sols profonds sont utilisés pour les cultures arables en raison de leur fertilité et sont répartis sur des zones de contreforts. Les sols très peu profonds avec des taches rocheuses ou de la roche mère sont visibles sur les pentes abruptes réparties sur l'Atlas Piémont qui constituent une source importante de production de pierres agrégées (Barakat et al. 2016 a, 2017 a). Ces relations entre le type de sol et l'utilisation des sols pourraient affecter les fonctions du sol par l'altération de leurs propriétés dues à des actions agricoles inappropriées telles que l'excès de fertilisation, d'irrigation et de labour (Barakat et al.2017a). Là, il est d'une importance cruciale d'évaluer la capacité des types de sol à supporter une agriculture intensive.

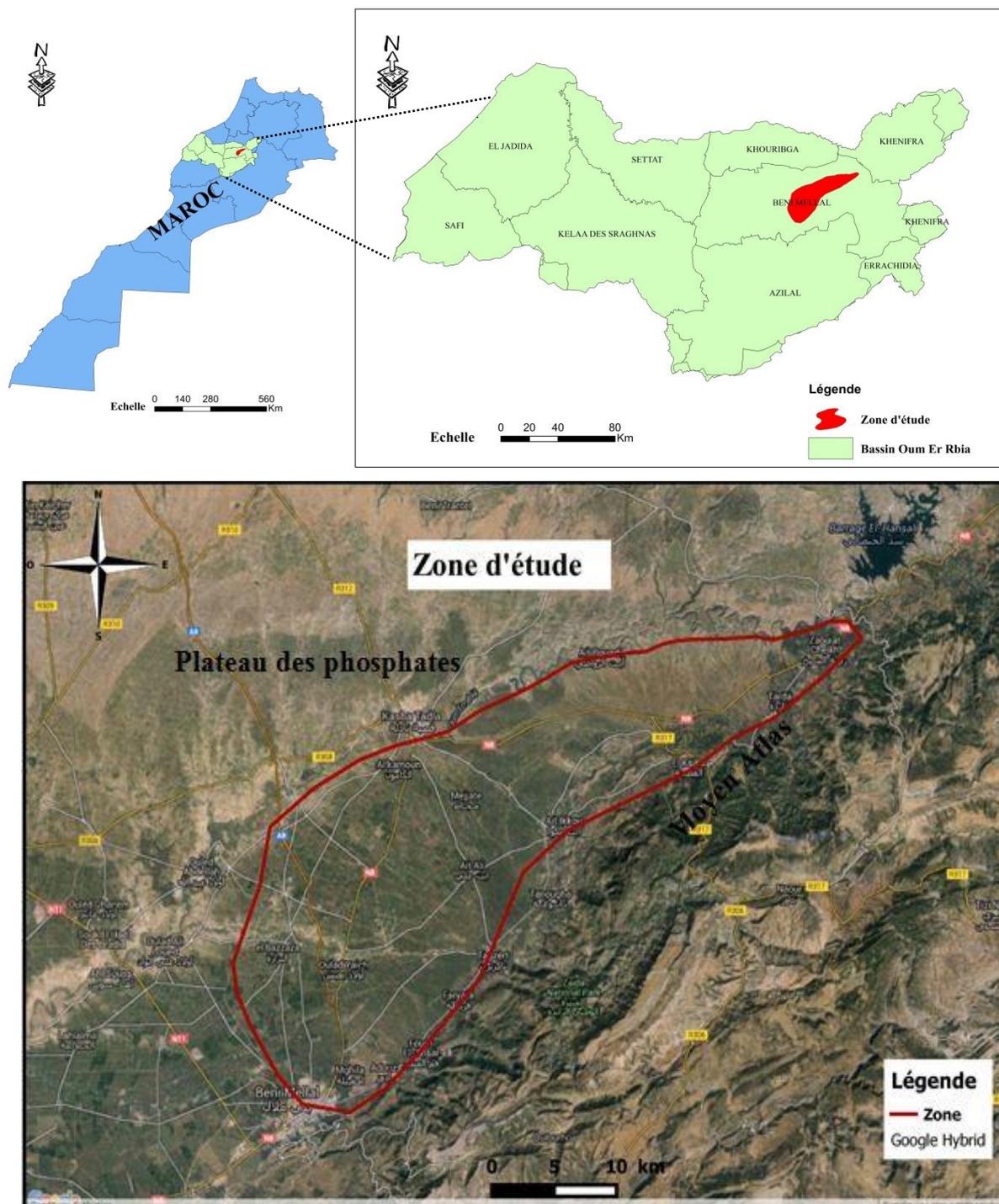


Figure II. 1: Plan de situation de la zone d'étude

II.2.2. Cadre climatologique

La plaine de Tadla est caractérisée par un climat de type méditerranéen aride à semi-aride à un caractère continental avec une saison sèche d'avril à octobre et une saison humide de

novembre à mars (Figure II.2). Cependant, dans les dernières années cette organisation saisonnière devient inégale sous l'effet des changements climatiques (ABHOER, 2016).

La région de la plaine de Tadla, de par sa géomorphologie hostile, est une des régions du Maroc les plus vulnérables aux changements climatiques. Mais avant d'en arriver là, il est quand même important de constater que le Maroc ne fait certes pas partie du «club» des grands pollueurs, mais qu'il est, à l'instar du reste de la planète, impacté par le changement climatique, ce changement pourrait se traduire notamment par un impact sur les ressources naturelles, sur les différents écosystèmes et sur la production agricole (végétale et animale) (Driouech.2010). En effet, des études scientifiques crédibles montrent que la température globale de la terre ne cesse d'augmenter depuis longtemps.

II.2.2.1. Pluviométrie

Les précipitations sont réparties irrégulièrement dans l'espace et dans le temps avec une moyenne annuelle de 433 mm. Pendant la période d'été, la moyenne des précipitations mensuelles interannuelles minimales est de l'ordre de 0,8 mm, tandis que la moyenne des précipitations pendant l'hiver dépasse 72 mm.. Les précipitations dans cette zone suivent un régime pluviométrique caractérisé par une période pluvieuse de huit mois (octobre à mai) et pouvant atteindre neuf mois en s'approchant de la montagne (septembre à mai) avec un nombre moyen annuel de jours de pluie de l'ordre de 60 jours.

II.2.2.2. Température

La température, sujette à des variations importantes saisonnières, est caractérisée par une période humide avec une température minimale comprise entre $-1,8^{\circ}$ et $2,4^{\circ}\text{C}$ et des températures maximales entre $39,6^{\circ}$ et 48°C pendant l'été. L'été est très chaud à cause des vents brûlants du sud est "chergui" qui fait augmenter la température, vagues de chaleur se terminant parfois par de violents orages. Par ailleurs, la moyenne générale mensuelle interannuelle de la température dans la zone d'étude dépasse 20°C .

II.2.2.3. Evaporation et Evapotranspiration

L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 1816 mm. Elle est maximale en juillet-août (10mm/j) et minimale en décembre ($1,7\text{mm/j}$). L'évapotranspiration de référence déterminée par la formule de Penman Monteith (Aghzar et al. 2002) est en moyenne de 1196 mm/an . L'évapotranspiration maximale, déterminée par la méthode de drainage naturelle, est de $478,6$

mm et 880 mm respectivement pour les cycles culturaux des céréales et de la betterave sucrière. L'évapotranspiration réelle est en moyenne de 320 à 350 mm et 628 à 753 mm respectivement pour ces mêmes cycles.

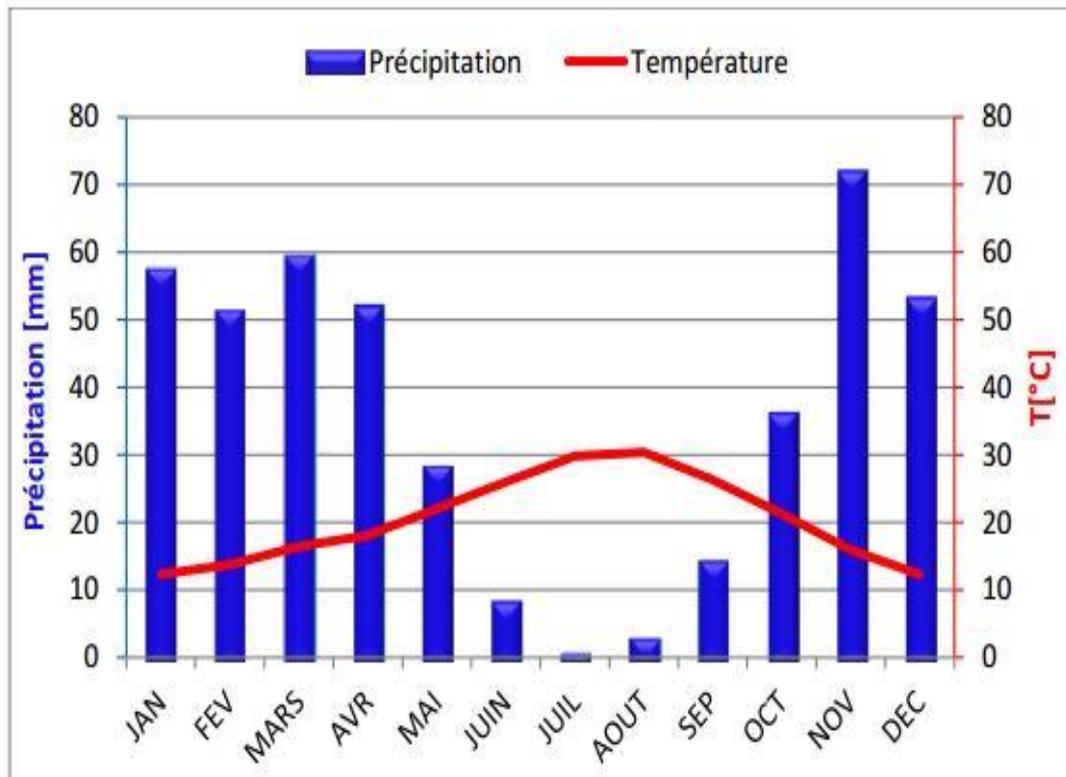


Figure II. 2: Variation des moyennes mensuelles des précipitations et la température au niveau de la station de Béni Mellal entre 1983 et 2014, (ABHOER ,2016).

II.2.3. Cadre hydrologique

La plaine du Tadla est alimentée en eaux de surface par le cours moyen de l'Oued Oum er Rbia. Oued Oum-Er-Rbia circule dans les gorges de Dchar el oued situées dans les calcaires du Turonien sur une longueur de 20 km environ (Hsissou et al. 1996). Cet oued est caractérisé par un débit annuel moyen de 35 m³/s, avec un maximum de 1700 m³/s et un minimum de 8 m³/s (Taïbi et al, 2015). Il draine des oueds localisés pour la majorité en rive gauche, à bassins versants atlasiques ou issus de sources vaclusiennes (O. Derna). Les apports pluviométriques sur le bassin de l'Oum er Rbia sont estimés à 18.2 milliards de m³ (12.1% du Maroc) et les ressources en eau potentielles mobilisables à 4322 milliards de m³ pour le bassin de l'Oum er Rbia, dont 3996 milliards de m³ pour les eaux de surface et 326 milliards de m³ pour les eaux souterraines (Taïbi et al, 2015). Il reçoit plusieurs affluents dont les principaux sont Oued

Tassout, Oued Derna, Oued El Abid, Oued Lakhdar. Dans la zone d'étude les principaux sources des eaux de surface sont oued Oum Er Rbia et oued Derna (figure II.3).

La partie de la plaine située sur la rive droite de l'Oum Er Rbia contient des oueds avec des ruissellements temporaires et de faibles importances à caractère torrentiel, qui n'atteignent l'Oum Er Rbia que lors des précipitations intenses. Les eaux de l'Oum Er Rbia sont salées, particulièrement en été pendant les étiages. Les oueds de cette région, à bassins versants atlasiques, sont caractérisés par des crues brutales qui génèrent régulièrement des dégâts dans la plaine où ils débouchent. À l'amont de la plaine du Tadla, et entre Béni Mellal et la zone d'El ksiba, la zone Dir se caractérise par plusieurs sources karstiques (plus de 20 sources) émergentes au pied de l'Atlas central. Elles sont alimentées par les infiltrations des pluies et des écoulements dans les séries calcaires de l'Atlas.

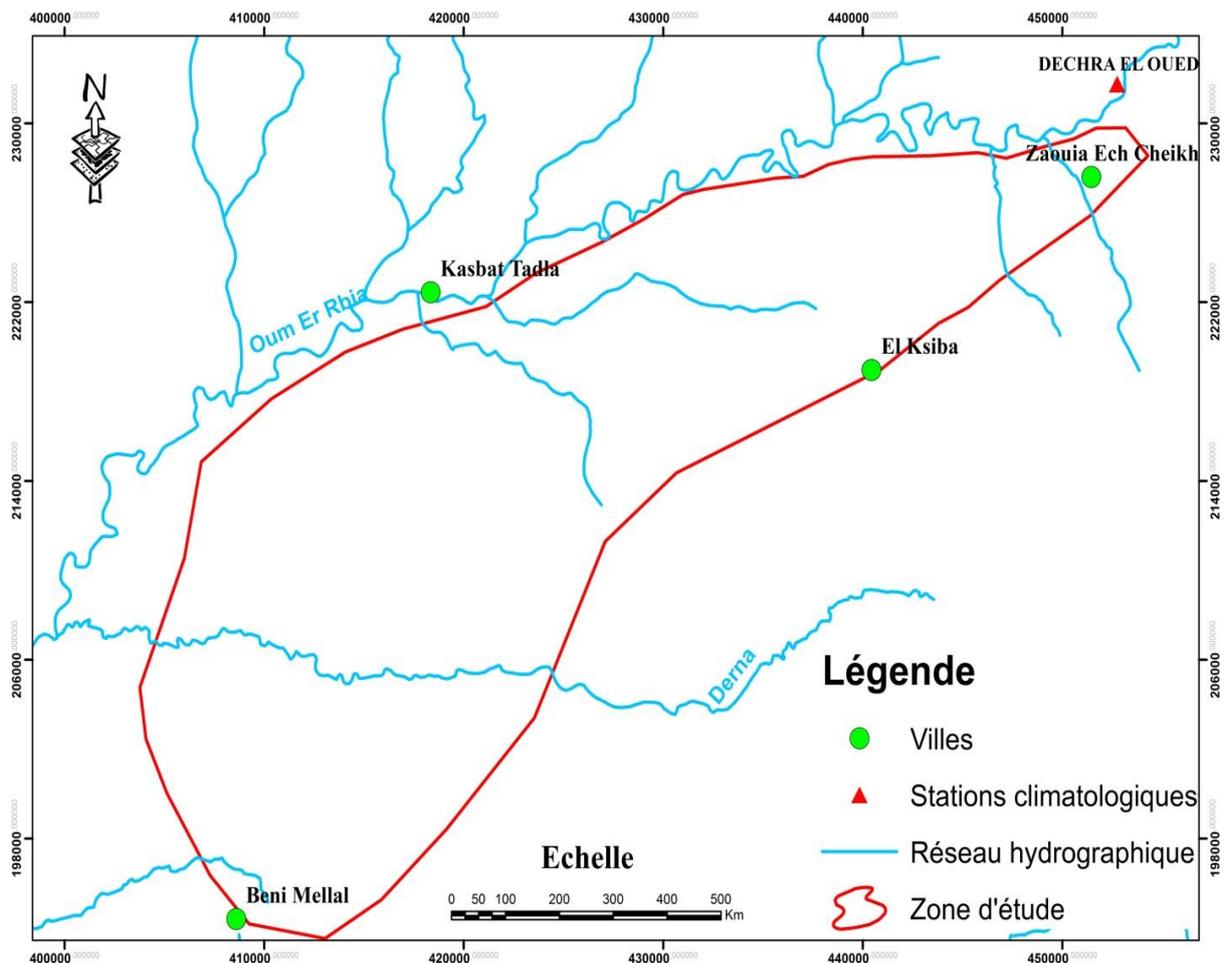


Figure II. 3: les ressources en eaux de surface dans la zone d'étude

II.2.4. Cadre géologique

Tadla-Azilal est une zone géologique complexe d'une grande diversité. La plaine de Tadla forme d'une vaste dépression remplie de dépôts Mio-Plio-Quaternaires hétérogènes (Choubert et Faure -Muret, 1956).elle se présente comme un synclinal de subsidence avec des séries secondaires et tertiaires qui ont été recouvertes par des dépôts continentaux du Moi-Pliocène, Villafranchien vers le Quaternaire récent (Etienne et Guessab, 1975) (Figure II.4).

- Le Villafranchien situé le long des rives de l'Oum Er Rbia. Il se forme principalement par des faciès marno-calcaires roses, rouges ou blancs avec des conglomérats à éléments paléozoïques (El Antaki et El boustani, 1991).
- Le Quaternaire ancien est formé par des calcaires lacustres et des conglomérats à éléments siliceux, localement consolidés. Il comprend aussi des limons, des calcaires, des marno-calcaires et des conglomérats lacustres (Etienne et Guessab, 1975)
- Le Quaternaire récent est constitué par des limons, des calcaires et des marno-calcaires avec des conglomérats. Dans le même âge on trouve également de basses terrasses limoneuses le long d'Oum Er -Rbia ainsi que des cônes de déjection en piémont des montagnes de l'Atlas.
- Le Moi-Pliocène est constitué essentiellement par des calcaires lacustres. Les faciès du Crétacé présentent une évolution d'un milieu marin ouvert au nord vers un milieu confiné et évaporitique au sud (Verset, 1988).

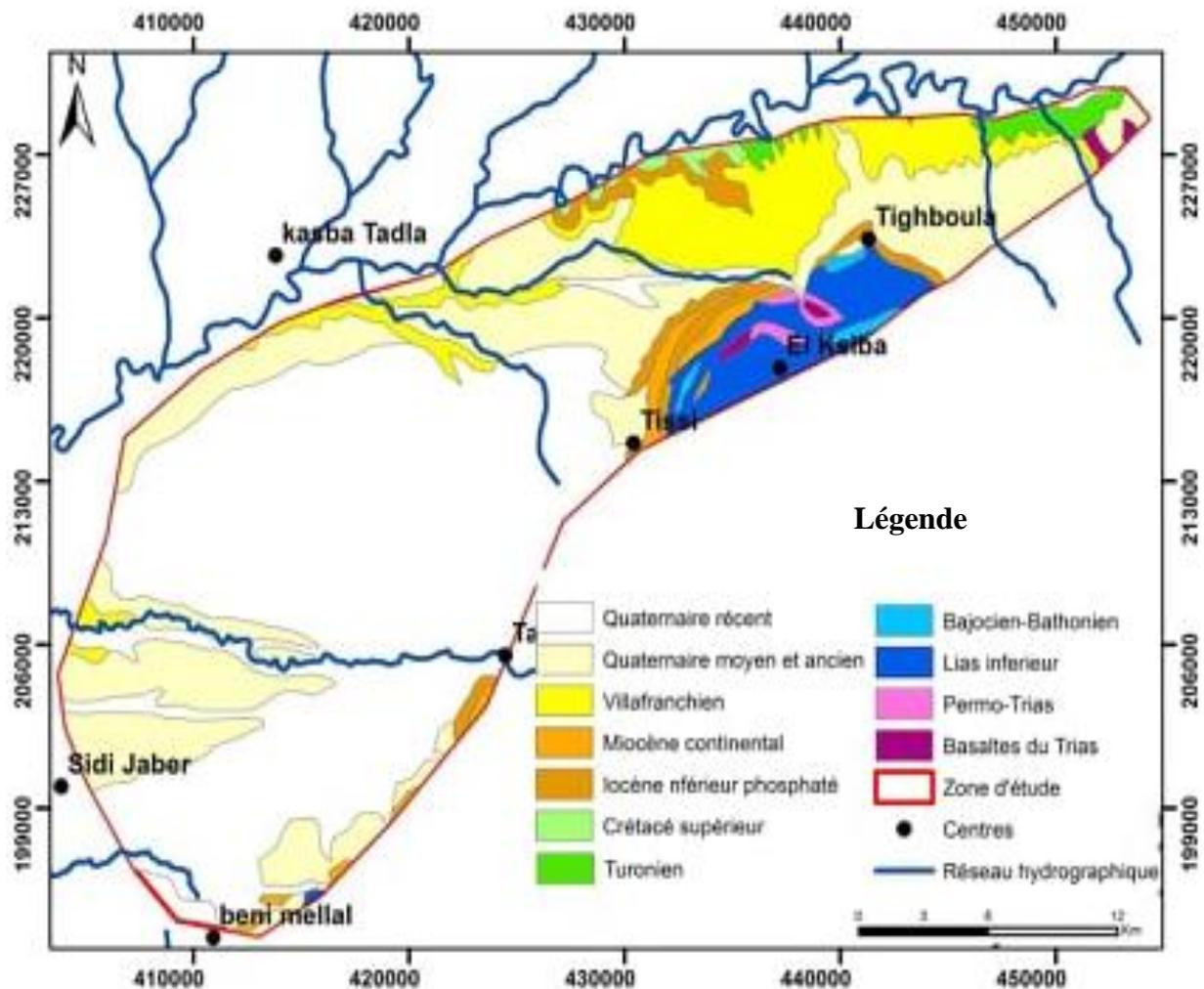


Figure II. 4: Carte géologique de la zone d'étude

II.2.5. Cadre hydrogéologique

Dans la plaine du Tadla, les ressources en eau souterraines sont constituées par un système aquifère multicouche se composent de quatre aquifères principaux qui sont séparés par des formations semi-perméables, ce qui favorise des transferts verticaux entre elles (PDAIR OER, 2008 ; Hammani et al, 2007), notamment les nappes phréatiques des Béni Moussa, des Béni Amir et les nappes profondes de l'Éocène, Sénonien et du Turonien, on distingue:

- Nappe de Béni Amir: La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir circule dans un complexe d'âge plio-quaternaire, Correspondant à une série continentale fluvio-lacustre très hétérogènes s'étendant sur environ 600 km² et composée essentiellement par des alternances de marnes, de calcaires et de conglomérats polygéniques à ciment argileux. Son mur se situe au sommet d'une formation phosphatée éocène à une profondeur de 90 m

correspondant à des argiles dolomitiques. Son épaisseur croît du nord vers le Sud, elle est comprise entre 50 et 100 m sur la majeure partie de son étendue (BRGM, 1993).

- Nappe de Béni Moussa: Elle s'étend sur une superficie de 885 km² environ. Les formations moi-plio-quaternaires constituant l'aquifère de Béni Moussa sont semblables à celles déposées dans la plaine de Béni Amir. Elles correspondent à une série fluvio-lacustre extrêmement hétérogène formée essentiellement d'alternance de calcaires, de marnes et de conglomérats. L'épaisseur des formations continentales déposées au niveau de la plaine des Béni Moussa est extrêmement variable, elle varie entre 150 m et peut dépasser 600 m (Aghzar et al. 2002).

Ce qui nous intéresse dans cette étude c'est la nappe du turonien de Tadla (figure II.5) :

a) Faciès lithologique

L'aquifère turonien est situé au centre du Maroc dans le bassin de Tadla (5000 km²) et fait partie d'un système aquifère multicouche (Mio-Plio Quaternaire, le Maastrichtien-Éocène, le Sénonien et le Turonien) du bassin d'Oum Er-Rbia. L'aquifère turonien est formé au nord par du calcaire karstique et de la dolomite, et se caractérise principalement par de la dolomite au sud. C'est l'une des principales ressources en eau avec des taux de production élevés jusqu'à 1300 l/s dans le bassin, et l'une des sources aquifères les plus importantes au Maroc (Bouchaou et al. 2009). Elle se trouve sous une formation marneuse imperméable de Cénomaniens. L'épaisseur de la formation turonienne varie de 50 m (au nord) à 100 m (au sud).

b) Piézométrie

Une partie septentrionale libre et un écoulement général vers le sud et une partie méridionale captive où les gradients hydrauliques sont relativement faibles (0,3-0,1%) et où l'écoulement est dirigé vers le sud-ouest avec une limite de partage des eaux dans le secteur nord-ouest, d'est en ouest, un grand axe de drainage situé dans la partie nord de la nappe captive, dans une zone qui présente les meilleures caractéristiques hydrodynamiques et une convergence des écoulements vers le sud-ouest. La limite sud de cet axe de drainage correspond sans doute à celle du changement de faciès du Turonien qui devient plus marneux et évaporitique (Hsissou et al. 1996).

c) Caractéristiques hydrodynamiques

Concernant les caractéristiques hydrodynamiques, la partie libre de la nappe est peu connue. La seule valeur du coefficient d'emmagasinement mesurée est de $1,6 \cdot 10^{-2}$. Pour la porosité efficace, les quelques mesures effectuées au niveau d'un forage donnent une moyenne de 20%. Par contre dans le secteur où la nappe est captive, les coefficients d'emmagasinement sont compris entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ et $6 \cdot 10^{-4}$.

d) Qualité des eaux

La qualité de l'eau de l'aquifère du Turonien est bonne (salinité comprise entre 500 et 1000 mg/l). La partie libre présente un faciès chimique généralement bicarbonaté calcique à magnésien, rarement chloruré et des teneurs en nitrates faibles à moyennes (7 à 35 mg/l).

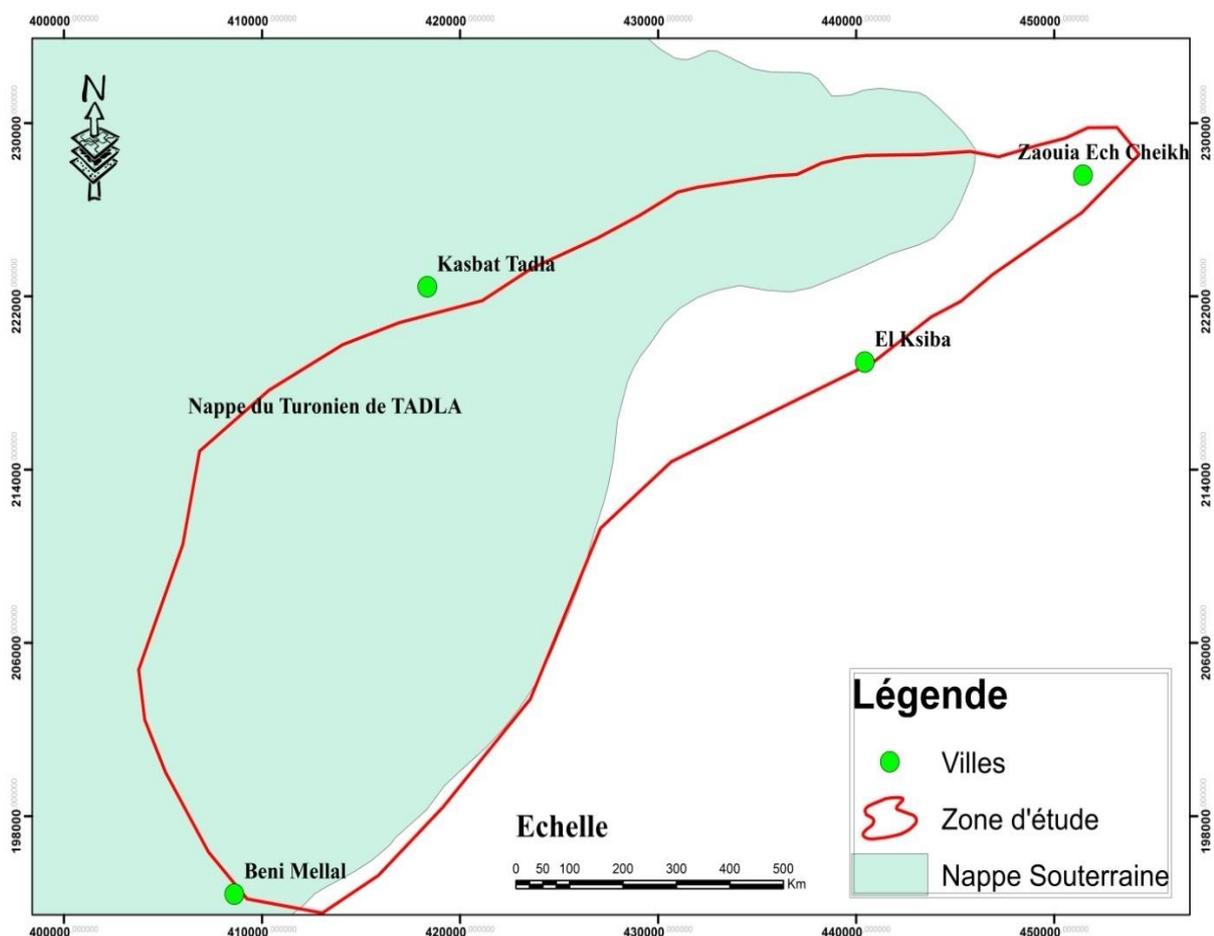


Figure II. 5: les ressources en eaux souterraines dans la zone d'étude

II.2.6. Cadre pédologique

D'après plusieurs études consacrées sur la cartographie et la caractérisation des sols dans la plaine de Tadla (Loukili et al. 1999; Bellouti et al. 2002; Badraoui, 2003), les principaux types des sols sont :

II.2.6.1. Sols isohumiques

Les sols isohumiques représentent 83% des sols dans les zones irriguées. Ce sont des sols épais, noirs, très riches en matière organique, une faible rubéfaction, et un profil organique isohumique (Billaux et Bryssine, 1970). De ce fait, cette classe de sols se caractérise par un profil calcaire avec une accumulation en profondeur sous forme de nodules individuels. On distingue deux groupes parmi ces sols (Billaux et Bryssine, 1970), les sols châtaîns et les sols bruns :

- Les sols châtaîns isohumiques subtropicaux sont plus argileux, plus rubéfiés, et ils sont totalement décalcarisés en surface. Ces sols sont caractérisés par une structure prismatique en profondeur, et une accumulation important de calcaire par rapport à la roche-mère. Ils ont une faible teneur en matière organique à la surface, environ 2 à 3%.
- Les sols bruns isohumiques subtropicaux caractérisé par une faible teneur en matière organique de l'ordre de 1 à 2%. Ils restent souvent calcaires en surface et sont moins rubéfiés, leur structure est polyédrique en profondeur, leur accumulation en calcaire est généralement moins forte.

II.2.6.2. Sols calcimagnésiques

Ce sont des sols peu profonds, très calcaires, caillouteux, mais de texture équilibrée. Ces sols se caractérisent par une décalcarisations partielle par rapport à la roche-mère, ce qui les différencie des sols peu évolués, et par l'absence d'accumulation et d'individualisation du calcaire, ce qui les différencie des sols isohumiques (Billaux et Bryssine, 1970; Badraoui et al. 1989).

II.2.6.3. Sols peu évolués d'apport alluvial

Ils sont généralement profonds et propres à l'agriculture. Ces sols se caractérisent par une faible altération, ils sont les résultats de l'érosion alluvio-colluvial (Badraoui et al.,1989). Il existe deux groupes :

- Sols modaux calcimorphes sur alluvions argilo-calcaire,
- Sols modaux calcimorphes peu profonds reposants sur poudingue.

Ils sont formés sur les alluvions récentes originaires du Moyen Atlas. Les sols sont brun-clair, très calcaires, argilo-sablonneux, avec parfois quelques lits caillouteux. Le profil est d'aspect continu, les mottes sont poreuses se cassant en polyèdres fins à moyens et en éléments particuliers (Massoni et al., 1970).

II.2.6.4. Sols fersiallitiques

Les sols fersiallitiques sont des sols rouges très riches en oxydes de fer et en oxydes d'alumine, ils sont très vieux par rapport aux autres types des sols. La particularité de leurs profils texturaux est sablonneuse en surface et argileuse en profondeur avec une abondance en fer libre (Badraoui et al. 1989). Ces sols sont caractérisés par deux sous-classes.

- La première sous-classe regroupe les sols à caractère isohumique, sur argile à silex reposant sur calcaire dure.
- La seconde sous-classe, elle regroupe les sols à caractère isohumique, souvent érodés, caillouteux, sur argile à silex reposant sur calcaire dure, avec affleurement.

II.2.6.5. Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes existent partout au Maroc lorsque les conditions topographique le permettent. Ce sont des sols profonds, peu graveleux, moyennement ou peu organiques, reposant sur une croûte calcaire, et situés en zone de cuvette ou bas-fonds. Ces sols, qui ne couvrent que de petites surfaces sont vraiment intéressants, car ils posent le problème de l'hydromorphie en milieu très calcaire (Massoni et al., 1970; Billaux et Bryssine, 1970).

Les types des sols les plus dominants dans notre zone d'étude sont illustrés dans la figure II.6.

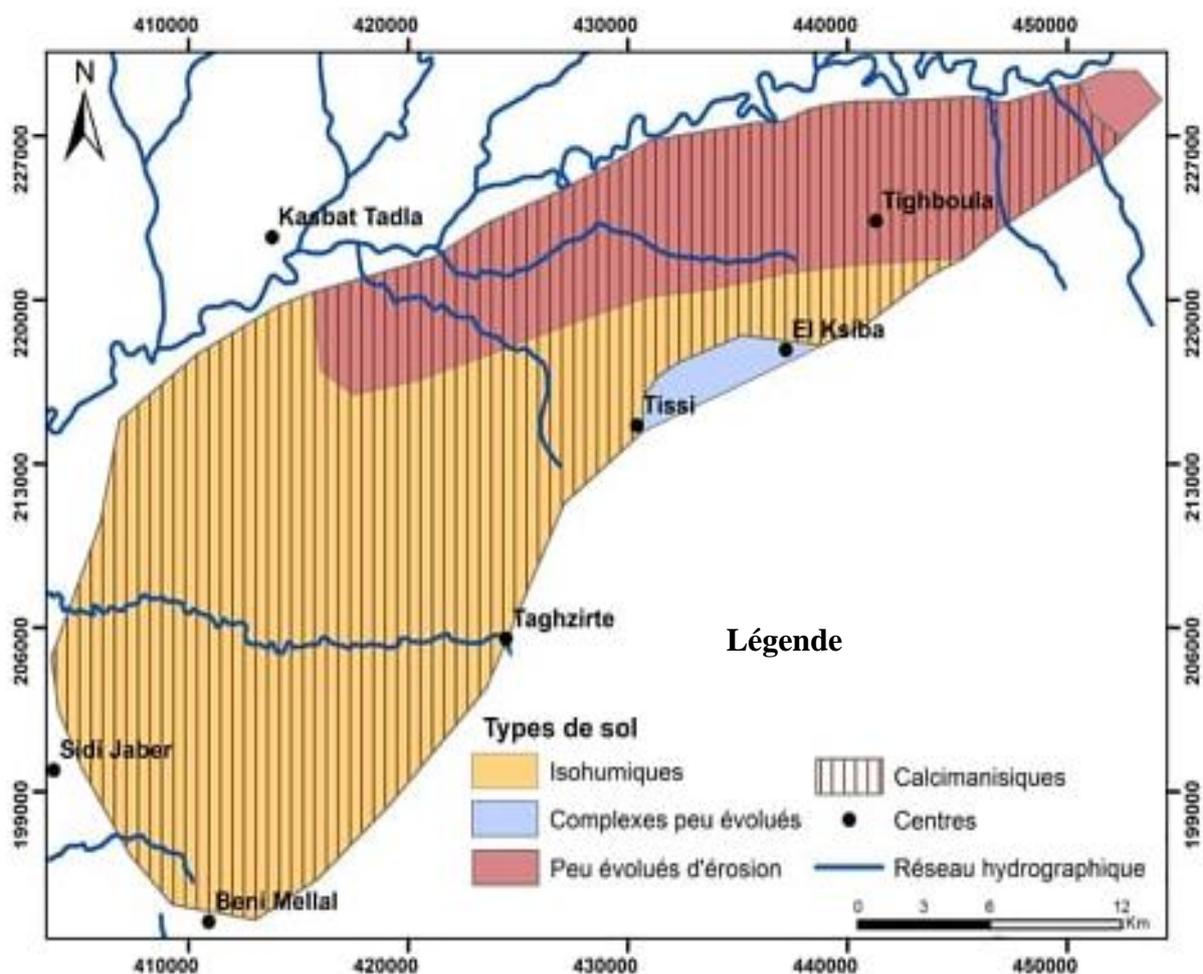


Figure II. 6: Carte pédologique de la zone d'étude

II.2.7. Cadre socio-économique (agriculture)

Au niveau de l'économie de la plaine de Tadla, le secteur de l'agriculture y compris l'élevage, constitue la principale activité de la région, avec plus de 225000 actifs occupés et chômeurs ayant déjà travaillé dans l'agriculture (soit plus de 52%). Elle oppose un secteur « moderne » dans la plaine du Tadla, équipé en grande hydraulique à partir du barrage de Bin El Ouidane (périmètre de Beni Moussa) et Kasbat Zidania et Ahmed El Hansali (périmètre Beni Amir), et un secteur « traditionnel » en Bour ou en petite hydraulique. La plaine se partage entre secteurs irrigués en grande hydraulique (49% de la SAU) et secteurs non équipés, domaine des cultures Bour (51% de la SAU) (Zitouni and Ibouh.2016). De plus en plus, l'agriculture intensive dans la plaine de Tadla se base essentiellement sur la culture des céréales, betterave sucrière, maraîchage, fourrage et arboriculture (oliviers et agrumes). Le système agro-sylvopastoral est particulièrement abouti en montagne où les cultures

saisonniers de céréales, légumes et fruits sont complétées par l'élevage (viande, lait, animaux de trait). La forêt fournit combustible, bois d'œuvre et une partie du fourrage. L'opposition entre la plaine modernisée et la montagne apparaît également à travers les moyens utilisés pour les travaux de labourage des terres, rudimentaires et non mécanisés en montagne où 74,6 % des superficies sont travaillées à l'aide de charrues en bois contre 0,6 % seulement par des araires (Taibi et al.2015).

II.3. Méthodologie de travail

II.3.1. Échantillonnage des sols

Des échantillons de sol ont été prélevés pendant les sorties de terrain organisé les mois mars et avril en 2015. 60 échantillons représentatifs de surface des terres agricoles (0 à 20 cm) et 10 profils avec des profondeurs différentes (dont le but de déterminer visuellement l'état du sol grâce à l'observation de paramètres tels que la structure du sol, l'aération, et le développement des racines), ont été collectés de manière à couvrir toute la partie nord-est de la plaine de Tadla. Chaque échantillon composite est préparé à partir d'un mélange de quatre échantillons individuels prélevés dans une parcelle carrée. Les échantillons de sol ont été placés dans des paquets composés de 500 à 1 000 g de sol pour éviter toute contamination et transportés immédiatement au laboratoire. Les coordonnées exactes de chaque échantillon composite ont été calculées à l'aide d'un système de positionnement global (GPS) avec une précision de ± 5 m. La figure II.7, montre la répartition spatiale de nos points d'échantillonnage.

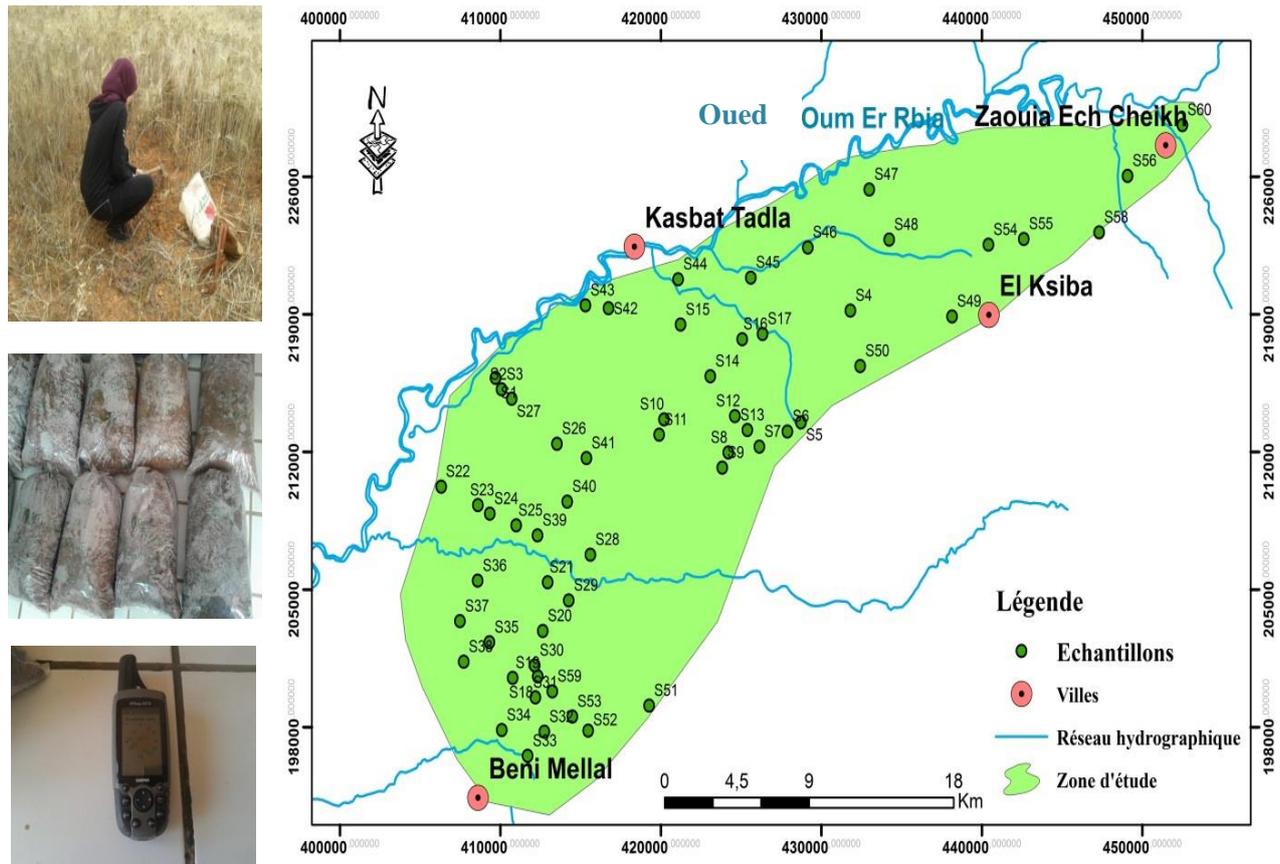


Figure II. 7: Plan de positionnement des sites échantillonnés sur la zone d'étude et photo d'illustration de l'échantillonnage.

II.3.2. Prétraitement du sol

Les échantillons des sols collectés sont nettoyés par élimination du matériel végétal et autres galets et séchés à une température ambiante. Chaque échantillon de sol représentatif a été tamisé à travers un tamis de mailles en acier inoxydable de 2 mm, puis analysé au Laboratoire Géo-ressources et environnement de la Faculté des Sciences et Techniques de Beni-Mellal afin déterminer les paramètres physiques et chimiques (pH, matière organique du sol, texture, les métaux lourds...)

II.3.3. Méthodes analytiques

Les composantes du sol-minéraux, matières organiques et organo-minérales, eau et air ne sont pas simplement combinés au hasard, mais forment un corps de sol organisé, de structure définie et de propriétés physiques et chimiques distinctives. Ces propriétés, qui résultent en

partie des composants individuels, sont spécifiques au système de sol intégré. Les propriétés résultantes des différents sols déterminent leurs réponses à l'environnement et à l'utilisation du sol.

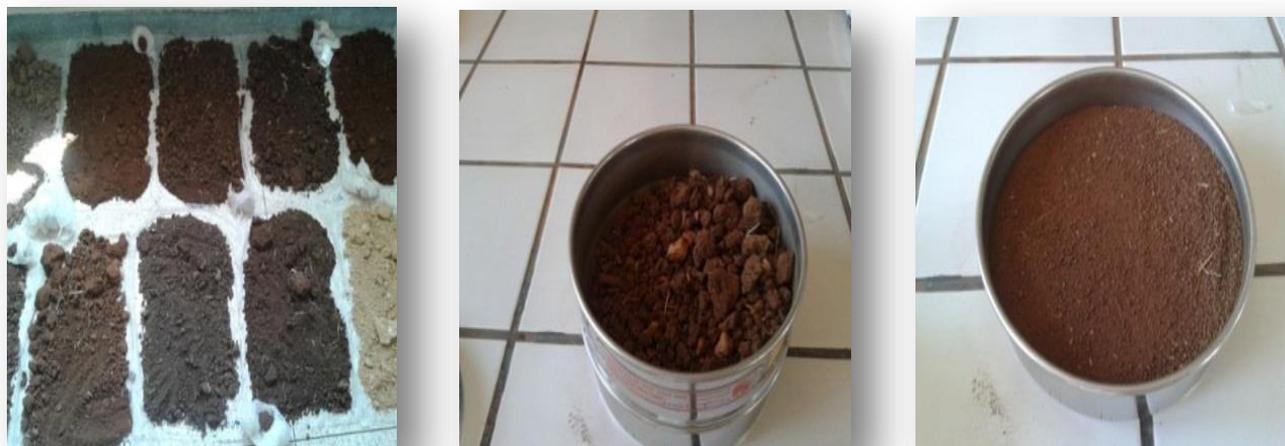


Figure II. 8: Préparation des échantillons (séchage et tamisage)

II.3.3.1. Caractérisations physiques des sols –Granulométrie-

La granulométrie d'un sol est une caractéristique physique importante qui influe sur la fertilité du sol et le comportement de la croissance des plantes, car elle affecte la texture, la qualité et l'érosion du sol (Aderonke et Gbadegesin 2013). Elle a aussi un impact sur beaucoup de propriétés du sol, telles que : la facilité du labour, la conductivité capillaire d'un sol, l'humidité disponible, la perméabilité, le tassement, etc. (Benazzouz, 2011). La texture peut s'apprécier sur le terrain, mais elle demande un minimum d'expérience, divers éléments peuvent modifier les sensations (exemple des critères d'appréciation: les sables grattent sous les doigts à partir de 0.1mm, les sols riches en limons donnent entre les doigts des sensations d'onctuosité, les argiles peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main), ou être déduite d'une analyse granulométrique (laboratoire) qui permet, précisément, de déterminer les proportions des diverses particules, réparties en classes de dimensions. La texture est définie par les proportions relatives (%) de particules argileuses, limoneuses et sableuses qui constituent la terre fine des sols. Le tableau II.1 résume les classes de dimension les plus couramment utilisées pour classer granulométriquement ces particules.

Tableau II. 1: Classes conventionnelles de la granulométrie (Directives de la FAO 2006)

Classe granulométrique	Dimension (en μm)
Argile	< 2
Limon fin	2-20
Limon grossier	20-50
Sable fin	50-200
Sable grossier	200-2000

La répartition des particules du sol est couramment représentée par un graphique ternaire ou triangle de texture. En France, un des triangles les plus utilisés est le triangle de texture issu de la carte pédologique de l'Aisne (Jamagne, 1967). Au niveau international, la classification la plus utilisée est celle de l'USDA (United States Department of Agriculture, IUSS Working Group WRB, 2006). Ce triangle permet de classer les sols selon 12 classes de texture (voir l'annexe).

Différentes méthodes ont été proposées dans la littérature pour les analyses granulométriques: dans le cadre de cette recherche, la méthode internationale de Robinson selon la norme AFNOR NF X31-107 a été retenue, en utilisant de l'hexaméta-phosphate de sodium pour la dispersion de particules. Cette méthode est basée sur la différence de vitesse de sédimentation entre les petites particules et les plus grosses.

II.3.3.2. Caractérisations chimiques des sols

II.3.3.2.1. pH du sol

Le pH du sol est un indicateur important de la santé des sols en raison de son influence sur l'apport d'éléments nutritifs (cations et anions) aux plantes et sur l'activité microbienne. Il affecte spécifiquement la disponibilité des nutriments pour les plantes en contrôlant les formes chimiques des différents nutriments et en influençant les réactions chimiques qu'ils subissent. La plage de pH optimale pour la plupart des plantes est comprise entre 5,5 et 7,5 (QDEHP, 2017). Un pH faible indiquant un sol acide conduit à une mauvaise absorption de divers minéraux. Cependant, de nombreuses plantes se sont adaptées pour prospérer à des valeurs de pH situées en dehors de cette plage. Le pH de chaque sol de la zone d'étude a été

mesuré conformément à la norme ISO 10390, dans une suspension d'eau dés-ionisée et de sol en utilisant un rapport 1/2,5 (sol/ eau).

II.3.3.2.2. Matière organique

Comme dans le cas de la science du sol en général, l'étude de la matière organique a mis l'accent sur son lien avec la productivité du sol. Même dans les sols bien fertilisés, la productivité du sol est réduite par la perte de la matière organique (Johnston, 1991; Aref et Wander, 1997). Ces pertes de potentiel de production sont accompagnées de pertes d'efficacité de l'agroécosystème. La matière organique d'origine récente est étroitement liée à l'activité biologique dans les sols, tandis que les matériaux récents et d'âge intermédiaire contribuent notamment à l'état physique des sols. Les matériaux ayant des temps de séjour plus longs constituent généralement les plus grands réservoirs dans les sols et exercent la plus grande influence sur la réactivité physico-chimique des sols. La réponse des cultures aux intrants minéraux augmente dans les sols où l'état de la matière organique et les propriétés biologiques et physiques influencées par la matière organique sont améliorés (Cassman, 1999; Avnimelech, 1986). Des rendements compétitifs obtenus avec moins d'intrants externes sont attribués aux systèmes de culture qui améliorent les caractéristiques de la matière organique (Liebhardt et al. 1989; Johnston, 1991; Poudel et al. 2001; Nissen et Wander, 2003).

La matière organique est généralement localisée dans l'horizon superficiel du sol (0 à 20 cm). Elle joue un rôle primordial dans le comportement global du sol. Au niveau de l'aspect physique du sol, elle est le liant des particules minérales (argiles, limons et sables) à travers le complexe argilo-humique, et conséquemment elle participe à la qualité de la structure du sol et à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (érosion par la pluie et le vent, compaction entraînée par le passage d'engins agricoles, etc.) (Benazzouz, 2011). La matière organique du sol comprend quatre fractions : la matière organique vivante composée d'êtres vivants (appelée biomasse), la matière organique fraîche, les produits transitoires et l'humus. Matière organique fraîche, produits transitoires et humus constituent la matière organique morte. La teneur en matière organique d'un sol dépend de la nature du sol et du travail effectué.

La teneur en matière organique totale (TOM) pour les échantillons des sols a été mesurée par le four à moufle thermolyne pendant 4 heures à 550 °C. Il est à noter que cette méthode est normalisée selon AFNOR (1996) et Saidi et al (2008).

II.3.3.2.3. Carbone organique (CO)

Le carbone organique est l'élément fondamental de tous les êtres vivants et le principal constituant de la matière organique du sol. Le CO du sol est également un attribut essentiel pour mesurer la durabilité d'un système de culture (Barakat et al.2017a). Il a souvent été corrélé positivement avec le rendement des cultures en raison de ses contributions bénéfiques aux propriétés du sol (Bennett et al. 2010). Le manque ou la faible teneur en CO ont des effets négatifs sur l'agriculture et la vie végétale. Toutefois, dans le cadre du processus de décomposition, une petite partie du carbone organique des plantes et des animaux dans le sol se transforme en matière organique qui se décompose moins facilement. La détermination du carbone organique dans cette étude a été calculée par la formule suivante

$$CO = \frac{MO}{1.724} \quad (2)$$

II.3.3.2.4. Azote total (N)

L'azote joue un rôle déterminant à la fois sur le rendement et sur la qualité des productions. Les plantes s'alimentent dans le sol en azote minéral et le transforment en protéines, composants essentiels de la vie pour l'homme et les animaux. Un sol agricole moyen contient de l'ordre de 2 à 10 tonnes d'azote total par hectare, dans son horizon de surface. L'azote du sol se présente sous deux formes :

- l'azote organique : représente plus de 95 % de l'azote total et n'est pas assimilable par les plantes. Il se trouve dans des protéines (35-50%), des acides nucléiques (3-10%), des amino-sucres (5-10%), des formes complexées avec la lignine, les microorganismes, etc.
- l'azote minéral : formé principalement de l'azote nitrique (présent dans le sol sous forme de nitrates) et de l'azote ammoniacal (NH_4^+), représente la fraction directement utilisable par les plantes (azote assimilable). Cette fraction est quasi négligeable (en termes de bilan) face à l'énorme proportion de l'azote organique.

La quantité et la disponibilité des formes d'azote (et notamment de l'azote minéral) varient avec la saison et le climat, mais également en fonction du type de sol. Ainsi, dans les sols acides l'ammonium (NH_4^+) est mieux représenté tandis que dans les sols basiques, ce sont les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-) qui sont les plus présents. Il existe plusieurs méthodes normalisées de mesure de l'azote total, dans cette étude on a utilisé la méthode de kjeldahl.

Elle est décrite dans la norme NF ISO 11261. Cette méthode est basée sur une minéralisation de l'azote organique en ammonium par le mélange H_2SO_4/K_2SO . Cette méthode dose la somme de l'azote organique et ammoniacal, elle ne prend pas en compte les formes nitriques.

II.3.3.2.5. Rapport C/N

Le rapport C/N ou rapport massique carbone sur azote est un facteur essentiel de la dynamique du carbone et de l'azote, qui permet de juger le degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol. La valeur du rapport C/N (carbone / azote) renseigne sur l'état biologique du sol, en évaluant l'évolution de la matière organique. En effet, lorsque la matière organique est décomposée, il y a perte de carbone sous forme de CO^2 , l'azote se combine à l'humus donc le rapport C/N diminue. Si le rapport est trop élevé, il doit y avoir un problème de décomposition de la matière organique.

II.3.3.2.6. Calcaire total

Le calcaire total est une des composantes héritées du sol, éventuellement légèrement modifiable par apports massifs et répétés d'amendements basiques. La présence de calcaire confère au sol des caractéristiques spécifiques en termes de comportement physique et chimique et influe sur son activité biologique. Son absence totale a pour conséquence une acidification progressive, plus ou moins rapide suivant le contexte pédoclimatique, qu'il est nécessaire de compenser par des apports réguliers d'amendements basiques (chaulage). L'analyse du calcaire total est nécessaire pour affiner la caractérisation des constituants du sol et améliorer les choix stratégiques en termes de chaulage. Comme la granulométrie, c'est une caractéristique stable du sol, qu'il n'est pas utile de mesurer à chaque analyse, pour peu que la zone de prélèvement soit stable et correctement repérée. Dans la littérature il existe différentes méthodes afin de déterminer le calcaire total dans un échantillon de sol (Baize, 2000). Néanmoins, dans cette étude nous avons utilisé la méthode volumétrique nommée aussi la méthode « Calcimètre de Bernard ». Elle est basée sur la mesure du volume de CO_2 dégagé suite à l'action d'un excès d'acide chlorhydrique (HCL) sur un poids connu d'un échantillon de sol (Baize, 2000). Cette méthode d'analyse courante est décrite dans la norme internationale NF ISO 10693.

II.3.3.2.7. Salinité du sol

La salinisation est défini par Servant (1975), comme étant l'ensemble des mécanismes suivant lesquels le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert, à un degré plus ou moins fort, le caractère salé. Cherbuy (1991) a ajouté qu'il s'agit d'un processus résultant de la migration des sels à travers le profil du sol et de leur accumulation, par précipitation en profondeur. Mermoud (2001) vient d'indiquer que ce phénomène d'accumulation des sels solubles (en particulier le sodium) à la surface du sol et dans la zone racinaire, occasionne des effets nocifs sur les végétaux qui vont induire une diminution des rendements et une stérilisation du sol. François (2008) a actualisé la définition de la salinisation comme étant un phénomène par lequel un sol devient sur salé. La salinisation résulte le plus souvent de l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage. La teneur en sel soluble dans notre étude est évaluée la méthode de la pâte saturée qui est la méthode la plus recommandée pour estimer la salinité du sol.

II.3.3.2.8. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique du sol représente la taille du réservoir permettant de stocker de manière réversible certains éléments fertilisants cationiques (potassium, magnésium, calcium...). La CEC est liée au complexe argilo-humique. La valeur de la CEC d'un sol est donc fonction des quantités d'argile et de MO qu'il contient, mais aussi de la nature de ces éléments et du pH du sol. Les sols ayant une CEC élevée peuvent retenir davantage de cations et possèdent une plus grande capacité à les échanger que les sols ayant une faible CEC. Les cations qui sont le plus souvent mentionnés dans un rapport d'analyse de sol sont les suivants : le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}) et le calcium (Ca^{2+}). Les cations sont retenus sur des sites chargés négativement que l'on retrouve à la surface de particules de matière organique et d'argile. La matière organique possède plus de sites d'échanges que les particules d'argile. Ces sites sont des sources importantes de tous les cations assimilables par les végétaux. Les cations ne sont pas retenus fortement à ces surfaces. En fait, ces surfaces réalimentent constamment la solution de sol en cations à mesure que ces derniers sont prélevés par les plantes.

La capacité d'échange cationique s'agit de la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'un poids déterminé de sol (habituellement 100 g) est capable de retenir. On l'exprime traditionnellement en milliéquivalents (még) par 100 grammes de terre fine séchée. Le milliéquivalent représente le millième de l'équivalent-gramme d'un corps, qui se calcule à l'aide de la formule suivante:

$$\text{még} = \frac{\text{masse atomique de l'élément}}{\text{valence de l'élément}} \quad (3)$$

Il existe plusieurs méthodes normalisées de mesure de la CEC, mais la plus courante, c'est la méthode Metson. Elle est décrite dans la norme AFNOR NF X31-130. Cette méthode consiste à déplacer tous les cations adsorbés sur les sites d'échanges de la CEC, puis de saturer ces sites par un cation unique, qui est l'ammonium (NH₄⁺). L'ammonium est à son tour déplacé, puis dosé par spectrophoto-colorimétrie automatique. Le nombre de sites d'échange de la CEC correspond exactement au nombre d'ions ammonium dosés.

II.3.3.2.9. Éléments échangeables

a) Phosphore / P2O5 assimilable

Le phosphore est présent dans le sol sous plusieurs formes :

- le phosphore insoluble combiné dans des composés minéraux ;
- le phosphore peu soluble fixé ou rétrogradé entre les feuillets d'argile ;
- le phosphore combiné à la fraction organique : la minéralisation de la matière organique libère du phosphore ;
- le phosphore adsorbé : il est retenu soit par les charges positives des colloïdes minéraux et organiques, soit par les colloïdes électropositifs comme les hydroxydes de fer ou d'aluminium. Le processus d'adsorption est réversible ;
- les ions phosphates libres dans la solution du sol : leur présence dépend du pH. Principalement sous forme HPO₄²⁻ et H₂PO₄⁻, ils sont présents en très faible quantité (moins de 1 kg/ha).

Le phosphore présent dans les sols n'est pas un ensemble homogène. 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. C'est un élément peu présent à l'état naturel dans les sols. La détermination de la teneur du sol en phosphore assimilable est indispensable pour optimiser

au plan agronomique et économique la fertilisation complémentaire en fonction des besoins du sol et des cultures et maintenir durablement sa fertilité phosphatée. Dans cette étude on a choisi la méthode Olsen suivant la norme internationale NF ISO 11263, cette méthode est reconnue internationalement comme la plus représentative des échanges sols-racines et la plus universelle, c'est-à-dire fiable et interprétable dans la très grande majorité des situations pédologiques. Les autres méthodes peuvent surestimer l'offre alimentaire des sols en phosphore bio-disponible dans certaines situations (sols calcaires, apports d'engrais peu solubles, apports de boues ayant subi de nombreux traitements physico-chimiques...).

b) Potassium (K₂O) échangeable

Le potassium est présent dans le sol sous plusieurs formes :

- le potassium solidement fixé dans les minéraux primaires. Cette forme ne participe pas à l'alimentation de la plante ;
- le potassium associé à l'argile : la quantité fixée ou rétrogradée entre les feuillets d'argile est difficilement échangeable ;
- le potassium adsorbé sur le complexe argilo-humique est facilement échangeable ;
- le potassium présent dans la solution du sol sous forme d'ions K⁺.

Le potassium échangeable et potassium en solution sont les deux formes qui servent à alimenter les plantes. La teneur totale en potassium du sol varie de 1,5 à 3 % de K₂O, mais la connaissance de la teneur totale à peu d'intérêt quant à l'alimentation des plantes.

Le potassium, comme le phosphore, est un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des végétaux. Il joue un rôle multiple dans la plante : échanges ioniques dans la cellule, activation de la photosynthèse, synthèse des protéines....C'est un élément peu présent à l'état naturel dans les sols, à l'exception de certains sols calcaires ou argileux. La détermination de la teneur du sol en potassium est réalisée par une solution d'acétate d'ammonium, suivant la norme AFNOR NF X31-108. L'extrait obtenu est dosé par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP).

c) Magnésium (MgO) échangeable

Le magnésium est présent dans le sol sous plusieurs formes :

- une réserve inaltérée : magnésium présent dans le substrat, dans les minéraux primaires silicatés;
- une réserve mobilisable : magnésium des oxydes et hydroxydes. Ce magnésium peut passer sous forme échangeable, à la hauteur d'environ 15 kg de MgO/ha/an ;
- le magnésium échangeable : adsorbé sur le complexe argilo-humique, il représente environ 0,05 à 0.10%0 de MgO ;
- le magnésium présent dans la solution du sol sous forme d'ions Mg^{2+} : environ 5 à 100 mg de MgO/l de solution.

Le magnésium échangeable et le magnésium en solution sont les deux formes qui servent à alimenter les plantes. Le magnésium est faiblement retenu sur le complexe argilo-humique. Sa rétention limitée explique l'appauvrissement des couches superficielles du sol et l'importance des pertes par drainage.

Mg est un élément secondaire en quantité, mais essentiel en tant que constituant actif de la chlorophylle. Il se trouve principalement dans les feuilles, et joue un rôle proche de celui du calcium sur la fertilité physique des sols. Sa teneur naturelle peut être très faible (cas des sols de craie) ou très élevée (cas des sols sur calcaires dolomitiques). La connaissance de sa teneur est indispensable pour vérifier l'opportunité d'un apport de magnésie et optimiser la stratégie de fertilisation magnésienne. La détermination de la teneur du sol en Mg est réalisée par une solution d'acétate d'ammonium, suivant la norme AFNOR NF X31-108. L'extrait obtenu est dosé par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP-AES).

II.3.3.2.10. Métaux lourds

Les métaux lourds se caractérisent par une grande stabilité dans l'environnement et ne sont généralement pas biodégradables ni lessivés (Mmolawa et al, 2011). La mobilisation des métaux lourds dans le sol a lieu dans des conditions anaérobies (Zadrozny et al, 2015). La capacité d'accumulation de métaux lourds est associée au type de sol, à ses propriétés physiques (texture, en particulier la teneur en argile), à ses propriétés chimiques et ainsi qu'à la nature de chaque métal lourd (Kabata-Pendias, 2011). En outre, l'accumulation de métaux lourds dans le sol perturbe les processus biochimiques habituels qui s'y déroulent, ce qui peut par conséquent avoir un effet négatif sur l'activité biologique (Zawadzka et Łukowski, 2010).

La répartition des métaux lourds dans le sol est variée et dépend de plusieurs processus intervenant dans le sol, notamment la pédogenèse, l'altération du matériau d'origine ou la

capacité d'un métal lourd particulier de se lier à la matière organique (Słowik et al, 2008). La teneur la plus élevée en métaux lourds se trouve généralement dans la couche arable (Acosta et al, 2015); les couches de surface, en particulier les horizons organiques, sont caractérisées par la plus grande capacité de liaison des métaux lourds (Gu et al, 2016). Pour déterminer les concentrations de métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb et Zn) dans les sols échantillonnés, la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES) a été utilisée après digestion des échantillons de sol avec HNO₃ et HCl. Les solutions d'extraction des éléments de la solution digérée ont été déterminées par la méthode 3050B (USEPA1996).

II.3.4. Analyses statistiques

Dans le cadre de cette recherche, l'analyse statistique (min, max, moyenne, écart-type, et l'analyse en composantes principales) des différents paramètres utilisés a été traitée à l'aide du logiciel SPSS (version 21). En outre, les cartes de distribution spatiale des paramètres physico-chimiques des sols ont été réalisées à l'aide du logiciel Arc-GIS, nous avons utilisé comme méthode d'interpolation, la méthode du poids de distance inverse (IDW).

Tableau II. 2: Analyses physico-chimiques effectuées pour des sols échantillonnés et les méthodes utilisées

Paramètres physico-chimiques	Méthodes utilisés	Unités
Granulométrie	Méthode de la pipette de Robinson	%
pH	Méthode de McLean	-
Matière organique	Méthode de calcination par four	%
Calcaire total	Méthode de Calcimètre de Bernard	%
Azote total	Méthode de kjeldahl	%
Capacité d'échange cationique	Méthode de Métson	méq/100 g
Salinité	Méthode extraits de saturation (Richards)	dS/m
Phosphore	Méthode d'Olsen	mg/kg
Magnésium	Méthode d'extraction par l'acétate d'ammonium	mg/kg

Paramètres physico-chimiques	Méthodes utilisés	Unités
Potassium	Méthode d'extraction par l'acétate d'ammonium	mg/kg
Métaux lourds	méthode 3050B (USEPA1996).	mg/kg

II.4. Conclusion

La région d'étude se caractérise par un climat de type aride à semi-aride, avec un caractère continental. Les sols sont de types isohumiques, calcimagnésiques et peu évolués. Ils sont exposés aux plusieurs menaces pouvant impactés la qualité de la zone d'études, telles que les activités anthropiques, les pratiques agricoles inappropriées, et l'intensification agricole non maîtrisée. Les sols ont été choisis avec précaution et de manière représentative et dispersés dans toute la zone d'étude. L'objectif de ce travail est d'évaluer la qualité des sols agricoles de la partie nord-est de la plaine de Tadla, cette approche pédologique, donc pluridisciplinaire a nécessité (1) un mode d'échantillonnage des sols soigné (2) l'utilisation de méthodes diversifiées de caractérisations physico-chimiques, et (3) l'utilisation de traitements statistiques permettant de quantifier et d'évalué la qualité des sols.

Chapitre III

Evaluation de la qualité et de la fertilité des sols agricoles dans la partie nord-est de la plaine de Tadla

III.1 : Diagnostic de la qualité des sols pour une agriculture intensive et durable en intégrant les méthodes multicritères (AHP)

III.1.1. Introduction

Compte tenu de la demande croissante de production végétale, l'évaluation de la qualité des sols est devenue un défi majeur pour prévoir l'utilisation durable future de la qualité de chaque sol. Néanmoins, le concept de qualité du sol n'est pas bien défini, car il fait partie intégrante des perspectives des utilisateurs des terres. En conséquence, de nombreux indicateurs ont récemment été utilisés pour évaluer la qualité des sols en fonction de leurs utilisations et de leurs contextes, car les propriétés des sols varient considérablement selon les types de sols et les systèmes de gestion (Bastida et al. 2008; Filep et al. 2016; Barakat et al. 2017a). La combinaison et la comparaison de ces indicateurs ainsi que leur analyse et leur modélisation spatiales ont été rendues possibles grâce aux systèmes de données géographiques (SIG) capables de traiter différents types de données (Khormi et Hassan, 2013). Les avantages de l'utilisation des SIG dans l'évaluation de la qualité des sols ont été démontrés dans de nombreuses études (Nguyen et al. 2015; Kazemi et al. 2016; Barakat et al. 2017a; Mokarram et Hojati 2017). La plupart de ces études ont utilisé l'évaluation multicritère (MCE) avec un SIG. L'utilisation de méthodes de prise de décision multicritères SIG a permis de disposer d'informations provenant de différentes données, nécessaires pour identifier le modèle spatial le plus approprié pour les utilisations futures des sols. Le processus de hiérarchie analytique (AHP) devient une technique à plusieurs attributs qui a été appliquée aux techniques d'évaluation des terres. Par conséquent, des techniques AHP et SIG basées sur le MCE ont été utilisées dans notre étude pour aider interpréter les données de différentes mesures de sol et cartographier l'adéquation des sols pour une agriculture durable dans la zone nord-est de la plaine de Tadla à l'aide des indicateurs d'influence. Le Maroc exploite 9,2 millions d'hectares pour l'agriculture, qui constitue le secteur économique le plus important. En outre, l'agriculture est considérée comme très vulnérable au changement climatique et à la pollution agricole. Cependant, au fil du temps, l'agriculture intensive et l'activité humaine inadéquate ont contribué à la dégradation des sols dans de nombreuses zones agricoles irriguées telles que la plaine irriguée de Tadla, périmètre de Souss-Massa et périmètre irrigué de Haouz (Debbarh et Badraoui 2001). Pour conserver les fonctions du sol, il est nécessaire d'atténuer l'impact négatif de l'intensification de l'agriculture sur la qualité du sol, de l'eau, de l'air et de la biodiversité. L'agriculture intensive durable est une approche récente visant à accroître la production alimentaire de la planète afin de nourrir convenablement la population

mondiale, tout en préservant les processus éco systémiques et les ressources naturelles de la planète. Avec l'intensification agricole insuffisante ajoutée à l'écosystème fragile caractérisé par le climat aride, le Maroc commence à avoir un grave problème non seulement de qualité des sols, mais également de quantité et de qualité d'eau douce et de biodiversité. Les éléments nutritifs du sol sont devenus insuffisants pour répondre aux besoins élevés en nutriments de l'agriculture intensive, et l'engrais chimique les intrants contribueraient à l'acidification et à la salinisation des sols, ce qui réduirait leur qualité. Dans ces circonstances, des pratiques d'agriculture durable basées sur la connaissance des fonctions du sol sont nécessaires pour la plupart des régions agricoles du pays. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la qualité des sols dans la partie nord-est de la plaine de Tadla (Maroc) afin de soutenir une agriculture durable sans détérioration de l'écosystème et avec des coûts économiques et environnementaux minimes, en utilisant les techniques SIG et AHP. Les résultats de cette étude seraient cruciaux pour la prise de décisions concernant la gestion durable des terres dans la région nord-est de la plaine de Tadla.

III.1.2. Matériels et méthodes

La méthodologie utilisée dans cette étude vise à générer la carte de pertinence de la qualité des sols agricoles dans la zone d'étude. Deux étapes importantes appliquées dans ce processus consistent en deux parties. Le premier est consacré à la préparation des données et le second est destiné à l'évaluation de l'aptitude des terres. Les objectifs sont (i) de caractériser les propriétés physicochimiques du sol et de générer des cartes d'interpolation de chaque paramètre en utilisant la distance inversée pondérée (IDW), et (ii) élaborer la carte de qualité du sol dans la zone d'étude en utilisant des méthodes de processus d'analyse multicritère hiérarchique (AHP) pour identifier les zones appropriées pour l'agriculture.

III.1.2.1. Indicateurs des sols utilisés

Pour une évaluation précise de la qualité spatiale du sol, certains indicateurs de la qualité du sol fréquemment utilisés pour évaluer la qualité du sol et son adéquation à l'agriculture (Schiefer et al. 2015; Filep et al. 2016; Barakat et al. 2017b), tels que la pente, la texture, Le pH, la salinité, la capacité d'échange cationique (CEC) et le carbone organique (CO) ont été utilisés pour cartographier la qualité des 60 échantillons du terres dans cette zone d'étude. Les paramètres surveillés, et leur valeur statistique sont résumés dans le tableau III.2. Les paramètres utilisés et les raisons de leur sélection sont expliqués en détail dans les sections

suivantes. Des cartes thématiques de tous les paramètres analysés ont été préparées sur la base des résultats obtenus, en utilisant des techniques d'interpolation par pondération inverse de la distance (IDW). La carte des pentes a été préparée en utilisant un modèle numérique d'altitude (MNT) avec une taille de cellule de 30 x 30 m de la zone d'étude. Toutes les cartes thématiques ont été générées à l'aide du logiciel Arc GIS 10.2.2.

III.1.2.2. Présentation de la méthode AHP

L'approche AHP développée par Saaty (1977, 1994) et permet de décomposer un problème complexe en un système hiérarchique, dans lequel sont établies des combinaisons binaires à chacun des niveaux de la hiérarchie, c'est la méthode multicritères la plus utilisée pour quantifier la comparaison des critères de décision dans une technique par paires (Laskar, 2003). Elle permet de écosser un problème d'une manière logique en passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur jusqu'à réussir à une comparaison simple pour chaque paire de critères, par la suite on peut remonter au niveau supérieur pour la prise de décision.

La comparaison par paires est effectuée en utilisant une approche d'évaluation qualitative ou quantitative. En général, une échelle numérique allant de 1 à 9, appelée échelle de Saaty pour évaluer le rang des priorités relatives de deux critères, est recommandée pour les comparaisons (Saaty et Vargas, 2001). Cette échelle est détaillée dans le tableau III.1.

Pour la méthode AHP, l'importance relative de la composante ou critère i par rapport à la composante j est déterminée à l'aide de l'échelle de Saaty et est affecté à la $(i,j)^{\text{ème}}$ position de la matrice de comparaison par paires. Obligatoirement, l'inverse du numéro attribué est associé à la $(j,i)^{\text{ème}}$ position selon la règle suivante (Chang et al, 2007) :

$$a_{ij} > 0, \quad a_{ij} = 1 / a_{ji}, \quad a_{ij} = v_i \quad (4)$$

Une fois que la matrice de comparaison par paires est formée, la principale valeur propre et le vecteur propre droit normalisé correspondant de la matrice de comparaison donnent l'importance relative des différents critères étant comparée. Les éléments du vecteur propre normalisé sont appelés poids par rapport aux critères ou sous-critères, et notes par rapport aux alternatives. On calcule par la suite un score pondéré pour chaque individu afin de les classer par la suite par ordre décroissant suivant ce score. Ainsi on tient compte des coefficients ou valeurs propres λ_j relatives à chaque critère de classification et aussi des valeurs normalisées y_{ij}^* comme suit :

$$S_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{ij} * = \lambda_1 y_{i1} * + \lambda_2 y_{i2} * + \dots + \lambda_n y_{in} * \quad (5)$$

Pour assurer la crédibilité du classement d'influence relatif utilisé, l'indice du rapport de cohérence (CR) sera calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$CR = \frac{CI}{RI} (6)$$

Où CI est l'indice de cohérence et RI est la matrice aléatoire. Saaty (1997) suggère des valeurs de CR acceptables allant jusqu'à 0.1, ou un jugement révisé pour une CR supérieure à 0.1. Les scores des sous-indicateurs (tampons d'indicateurs) ont été attribués, sur la base de la littérature (Barakat et al. 2017a), de 1 à 9, sur les conditions favorables à une agriculture durable, c'est-à-dire que le score le plus élevé suggère le niveau d'importance maximale des sous-indicateurs (Tableau III.3). Ensuite, toutes les couches thématiques ont été intégrées les unes aux autres dans les SIG en utilisant la technique de superposition pondérée pour produire la carte finale de qualité des terres. La carte finale (figure III.8) a été déterminée en calculant l'indice d'aptitude des terres (LSI), de la manière suivante:

$$LSI = \sum_{i=1}^n w_i * x_i \quad (d'après Cengiz et Akbulak 2009) (7)$$

Où n est le nombre total des critères LSI, w_i est l'indice de pondération du facteur et x_i , l'indice de pondération des sous-critères. Des valeurs LSI plus élevées indiquent que les zones conviennent mieux à l'agriculture durable.

La carte d'aptitude finale générée à l'aide d'Arc GIS 10.2.2 en combinant six cartes de critères et des pondérations superposées de critères individuels a été reclassée en excellents appropriés, bons, moyens et médiocres. La matrice de comparaison par paires a été créée pour déterminer les poids des paramètres selon la méthode AHP (Tableau III.3). Les avis des experts (Saaty et Vargas, 2001) ont été utilisés pour déterminer le classement des critères d'influence et de la matrice de comparaison par paire (MCP) par rapport au logiciel de super décision utilisé pour déterminer les poids.

Les étapes impliquées dans le processus AHP utilisé dans cette étude peuvent être décrites comme suit: la comparaison par paires, le calcul des poids et l'analyse de superposition pondérée (figure III.1).

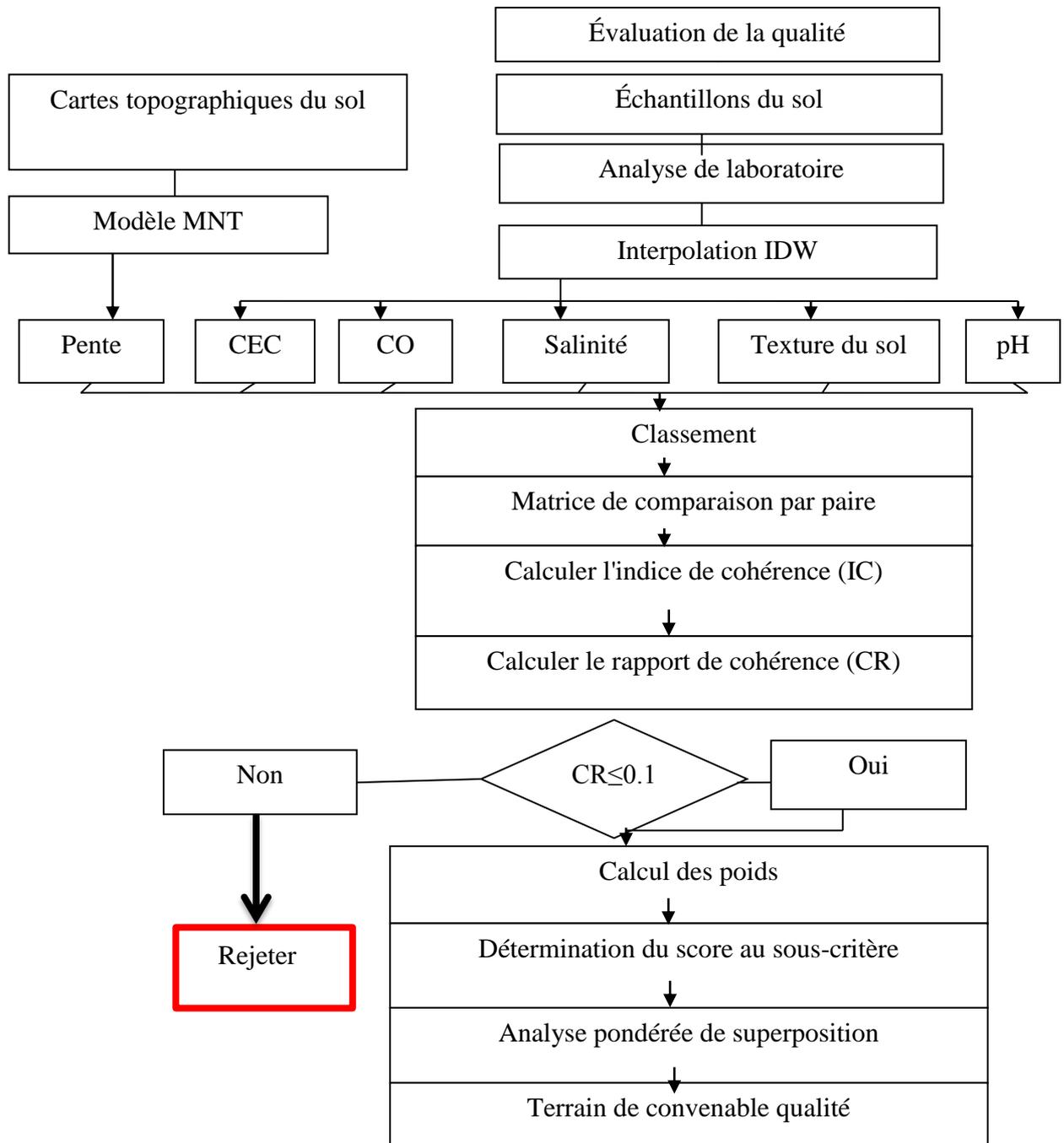


Figure III. 1: Organigramme détaillé du processus de décision de la méthode AHP

Tableau III. 1: Échelles de préférences de Saaty et Vargas (1984)

Description	Poids ou intensité de la comparaison
Même importance	1
Valeur intermédiaire entre deux jugements	2
Importance moyenne	3
Importance moyenne à forte	4
Importance Forte	5
Importance forte à très forte	6
Importance très forte	7
Fortement important	8
Absolument plus important	9

III.1.3. Résultats et discussions

III.1.3.1. Description des indicateurs

La délimitation des zones de bonne qualité est un processus très important pour le succès du développement d'une agriculture intensive durable. L'évaluation de la qualité des sols implique un processus d'évaluation approfondi visant à identifier le bon emplacement des terres agricoles. Les sols appropriés identifiés doivent contenir les éléments nutritifs essentiels à la nutrition de base des plantes afin de réduire les intrants organiques et chimiques afin de minimiser les dommages économiques causés aux côtes et à l'environnement. Dans cette étude, six indicateurs de qualité du sol, à savoir la pente, la texture, le pH, la salinité, la CEC et le CO, ont été pris en compte pour cartographier la qualité du sol pour l'agriculture intensive dans la région nord-est de la plaine de Tadla. Tous les indicateurs sont expliqués ci-dessous et leurs concentrations mesurées ont été résumées dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: Résultat d'analyse des indicateurs de qualité du sol et leur donnée statistique

Indicateurs	pH (H₂O)	CEC (Cmol/kg)	OC (%)	Argile et limon (%)	Salinité (dS/m)
Échantillons					
S1	8.5	21.5	1.05	68	1.82
S2	8.6	29.2	1.59	74	1.462
S3	8.4	16.5	1.43	55.3	1.14
S4	8.1	10.7	1.30	27.7	0.98
S5	8.2	30.8	1.68	76.7	0.946
S6	8.3	29.6	1.60	78.3	1.032
S7	8.1	35.5	1.80	75.7	1.634
S8	8.3	44.2	1.43	75.7	1.032
S9	8.3	37.7	1.58	69.8	1.032
S10	8.5	23.4	1.61	51.5	1.29
S11	8.3	23.5	1.77	56.5	2.38
S12	8.1	34.6	1.28	69.8	0.688
S13	8.2	37.4	1.66	80	0.946
S14	8.5	21.1	0.71	61.1	1.68
S15	8.3	21.5	2.20	68.4	1.29
S16	8.3	39.7	1.66	79	1.29
S17	8.1	43.9	1.95	76.2	1.118
S18	8.1	33.4	1.18	75.5	0.516
S19	8	30.7	1.26	74.5	0.774
S20	8.4	29.9	1.24	81.5	1.032
S21	8.3	18.3	1.43	61.5	1.96
S22	8.2	27.6	2.06	71.5	2.322
S23	8.5	25.8	1.62	65.5	1.96
S24	8.3	18.1	1.43	66.5	2.94
S25	8.5	29	1.66	70.1	1.29
S26	8.5	30.3	1.62	70	1.118
S27	8.3	33.8	2.25	72	1.548
S28	8.5	27.5	1.49	61.9	1.96
S29	8	32.6	1.47	64.7	1.892
S30	8.3	26.6	2.07	59.7	1.29
S31	8.4	14.2	0.94	52	1.33
S32	8.3	22.4	2.19	56.5	1.82
S33	8.3	18.7	1.55	62.5	2.52
S34	8.5	28.4	1.40	68.5	1.118
S35	8.2	29.6	2.05	60.1	1.806
S36	8.4	19.7	1.79	67.7	2.8
S37	8.4	25.3	1.32	59.3	1.54
S38	8.5	19.2	1.16	63	2.38
S39	8.5	12.6	0.70	26.8	2.1
S40	8.2	34.5	1.44	66.7	0.946
S41	8.3	35.9	1.41	64.8	1.204
S42	8.6	23.1	0.96	49.6	1.14
S43	8.3	20.2	1.69	53.7	2.52
S44	8.4	48.6	1.18	84.5	2.15
S45	8.1	25.3	1.28	53.5	1.032
S46	8.3	23.9	2.12	64.7	2.1
S47	8.3	40.8	2.96	75.3	1.376

Indicateurs	pH (H₂O)	CEC (Cmol/kg)	OC (%)	Argile et limon (%)	Salinité (dS/m)
Échantillons					
S48	8	26.4	2.24	59.9	0.86
S49	7.6	19.1	1.82	68.5	1.12
S50	8.3	32.9	2.52	84	2.236
S51	8.3	26.4	2.72	65.5	2.1
S52	7.9	24.7	1.94	68.5	1.032
S53	8.3	23.8	1.87	58.8	1.68
S54	8	23	2.04	69.3	1.032
S55	8.3	30.5	2.21	75.2	1.118
S56	8.4	19.3	1.69	71	1.68
S57	8.3	22.1	2.26	65.2	2.66
S58	8.2	35.6	2.43	86.3	1.118
S59	8.5	23.3	1.42	61.2	1.032
S60	8.3	32.2	1.58	76.8	1.29
Min	7.6	10.7	0.70	26.8	0.516
Max	8.6	48.6	2.96	86.3	2.94
Moyenne	8.29	27.44	1.67	66.3	1.52
Écart type	0.184	7.932	0.46	11.310	0.578

III.1.3.1.1. Texture

La taille des particules de sol est une caractéristique physique importante qui influe sur le comportement de la croissance des plantes, car elle affecte la texture, la qualité et l'érosion du sol (Aderonke al. 2013). Les teneurs en fraction argile + limon mesurées dans les sols étudiés allaient de 26,8% à 86,3%. Selon les normes de qualité (Tableau III.3), la fraction argile + limon classent les sols dans les catégories de qualité moyenne, bonne et excellente couvrant, respectivement, 0,22% (151,61 ha), 0,91% (636,39 ha), 98,88% (69421,25 ha) de la zone d'étude (Figure III.2).

III.1.3.1.2. pH du sol

Le pH du sol ou la réaction du sol est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité dans le sol et se mesure en unités de pH. C'est un indicateur important de la santé des sols en raison de son influence sur l'apport d'éléments nutritifs (cations et anions) aux plantes et sur l'activité microbienne. Le pH du sol mesuré dans l'eau se situait entre 7,6 et 8,6 et se classait par qualité médiocre avec un pourcentage de 98% (68806,23 ha) et par niveau de bonne qualité occupant environ 1,10% (1403,3 ha) de la superficie totale de la zone d'étude (figure III.3).

III.1.3.1.3. Carbone organique (CO)

Le CO a longtemps été identifié comme l'un des facteurs importants pour la qualité du sol (Kucharik et al. 2001), car il sert de source d'éléments nutritifs pour les plantes et contribue à la capacité d'amortissement du pH du sol. De plus, le carbone organique influence les relations de l'eau, l'aération et la maniabilité par son influence sur certaines propriétés physiques et chimiques du sol telles que la couleur, la structure du sol, la capacité d'échange, le renouvellement des éléments nutritifs, la capacité de rétention des éléments nutritifs et la stabilité. Les valeurs de CO obtenues variaient entre 0,70% et 2,96% et montraient ainsi que 0,35% (246,8 ha) de la superficie totale avait des sols de mauvaise qualité pour une agriculture intensive, 80,88% (56788, 57 ha) convenaient moyennement et 18,76% (13172, 84 ha) était bien adapté (figure III.4).

III.1.3.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC est une mesure de la capacité du sol à retenir des ions chargés positivement. C'est une propriété très importante du sol qui influence la stabilité de la structure du sol, la disponibilité des éléments nutritifs, le pH du sol et la réaction du sol aux engrais et à d'autres agents d'amélioration. La CEC moyenne dans la zone d'étude était comprise entre 10,7 et 48,6% et classée en catégories moyenne et bonne représentant respectivement environ 25,71% (18048,87 ha) et 74,30% (52158, 81 ha) de la zone d'étude (figure III.5).

III.1.3.1.5. Salinité

La salinité du sol fait référence à une accumulation de sels en surface ou près de la surface (Tanji 2004). Les sols peuvent devenir salins du fait de l'utilisation des sols, notamment de l'eau d'irrigation très salée. La valeur de la salinité mesurée était comprise entre 0,516 (dS/m) et 2,94 (dS/m) et elle était classée dans les classes moyennes et convenant à l'agriculture intensive. Environ 94,04% (66022,15 ha) de la zone d'étude conviennent bien à l'agriculture, et seulement 5,97% (4186,76 ha) présentent une superficie moyenne (figure III.6).

III.1.3.1.6. La pente

La pente du sol est particulièrement importante en termes d'effet sur l'érosion. L'épaisseur du sol diminue à mesure que la pente augmente et augmente à mesure que la pente diminue (Atalay, 2006). Dans la zone d'étude, la pente du sol extraite de la MNT a montré que 87,60% (61498,07 ha) du total des terres qui constituent des zones planes considérées comme étant

meilleures pour l'agriculture intensive; de bonne qualité, 7,20% (5055 ha) ont un taux de pente moyen, et seulement 3,19% (2245,16 ha) sont raides et ne conviennent donc pas à l'agriculture intensive (figure III.7).

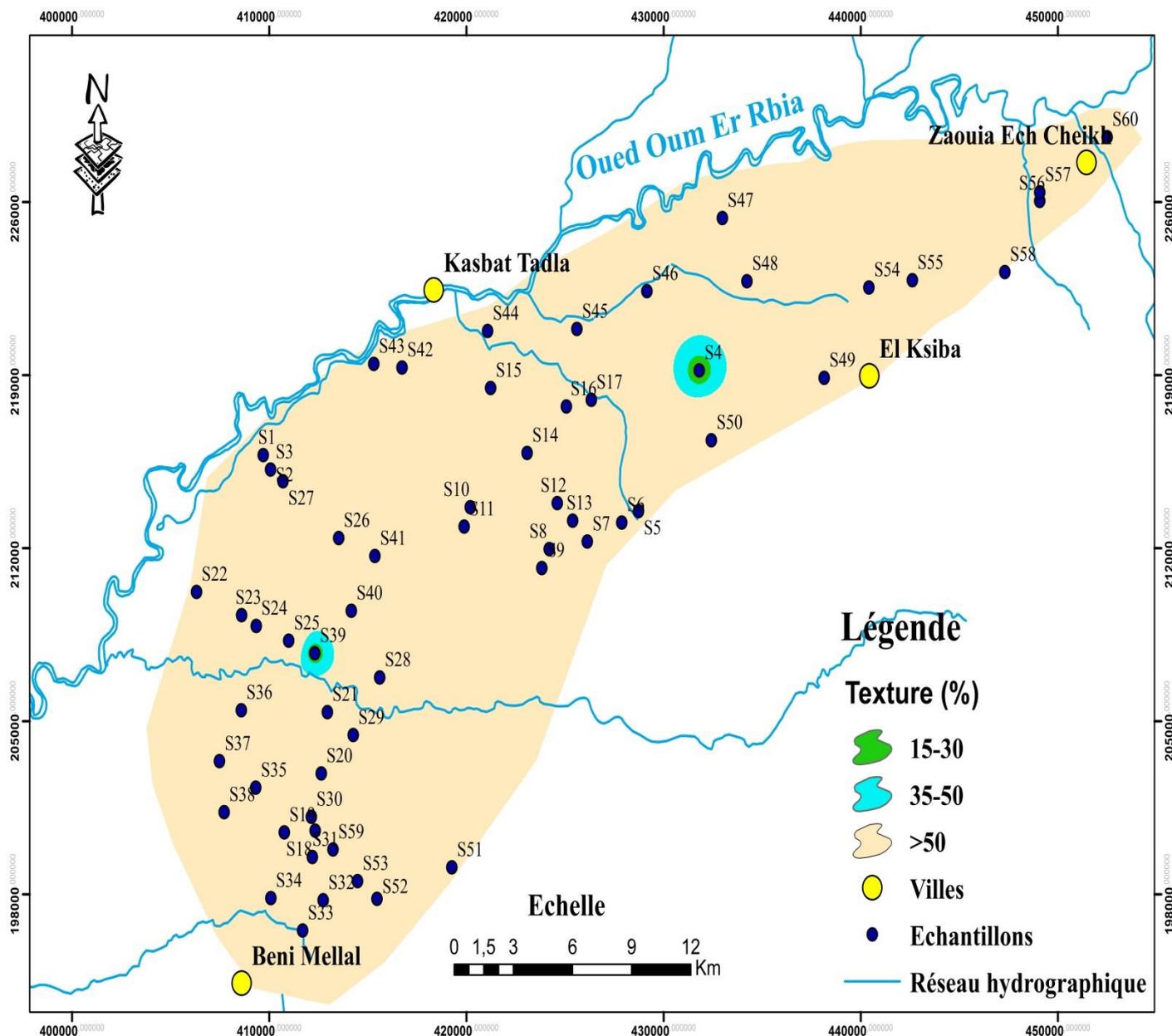


Figure III. 2: Distribution spatiale de la texture dans la zone d'étude

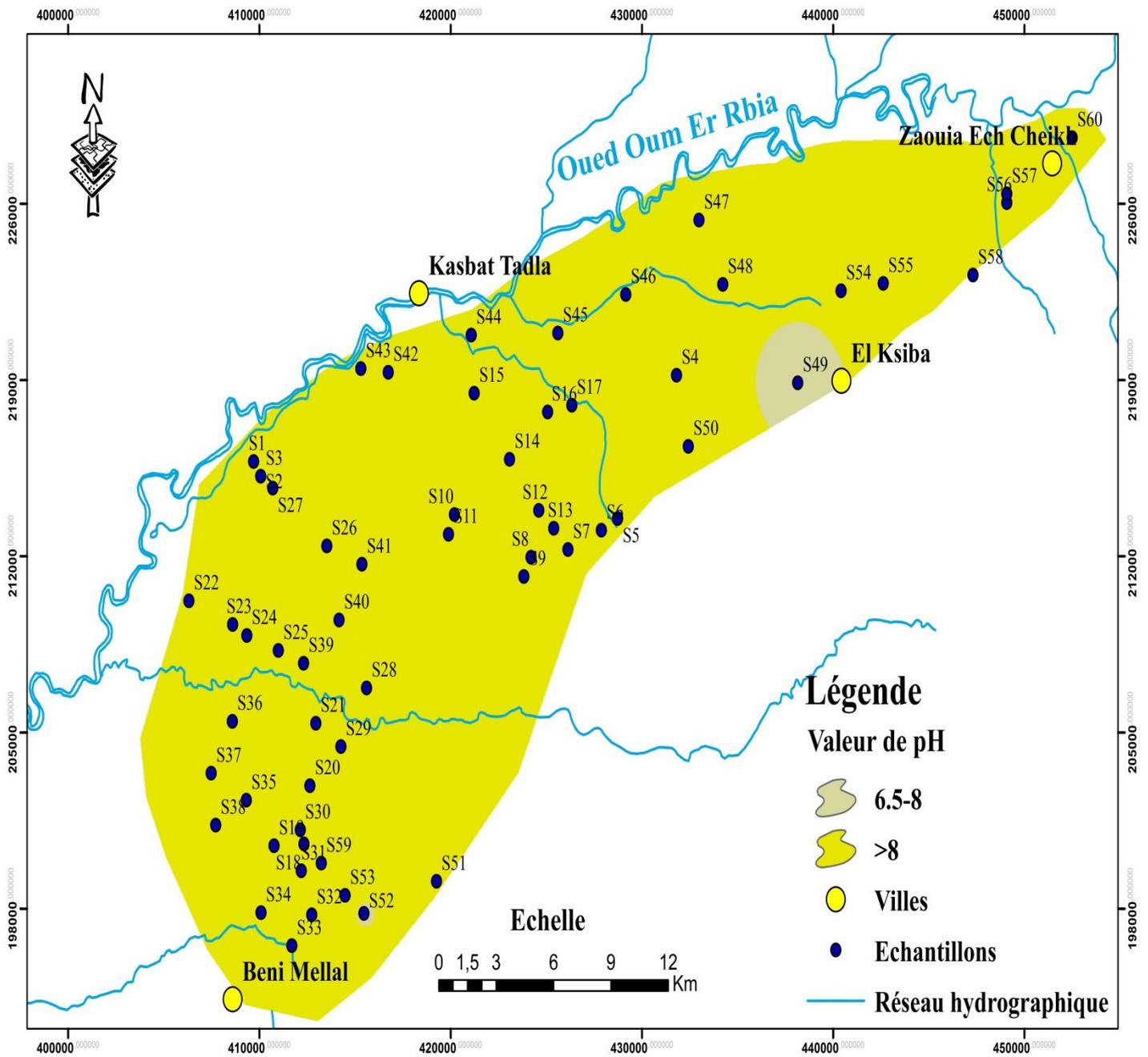


Figure III. 3: Distribution spatiale du pH dans la zone d'étude

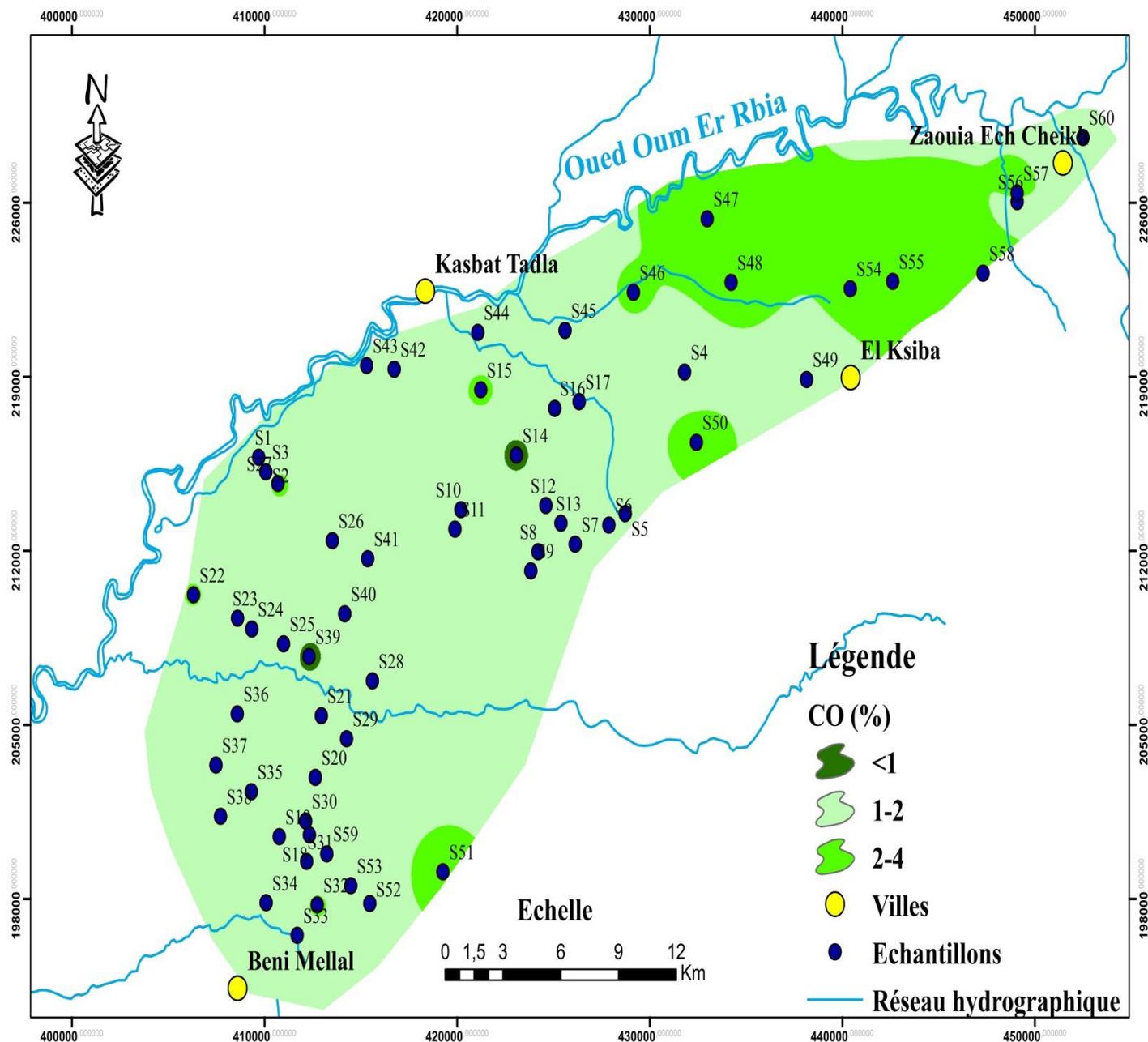


Figure III. 4: Distribution spatiale du carbone organique dans la zone d'étude

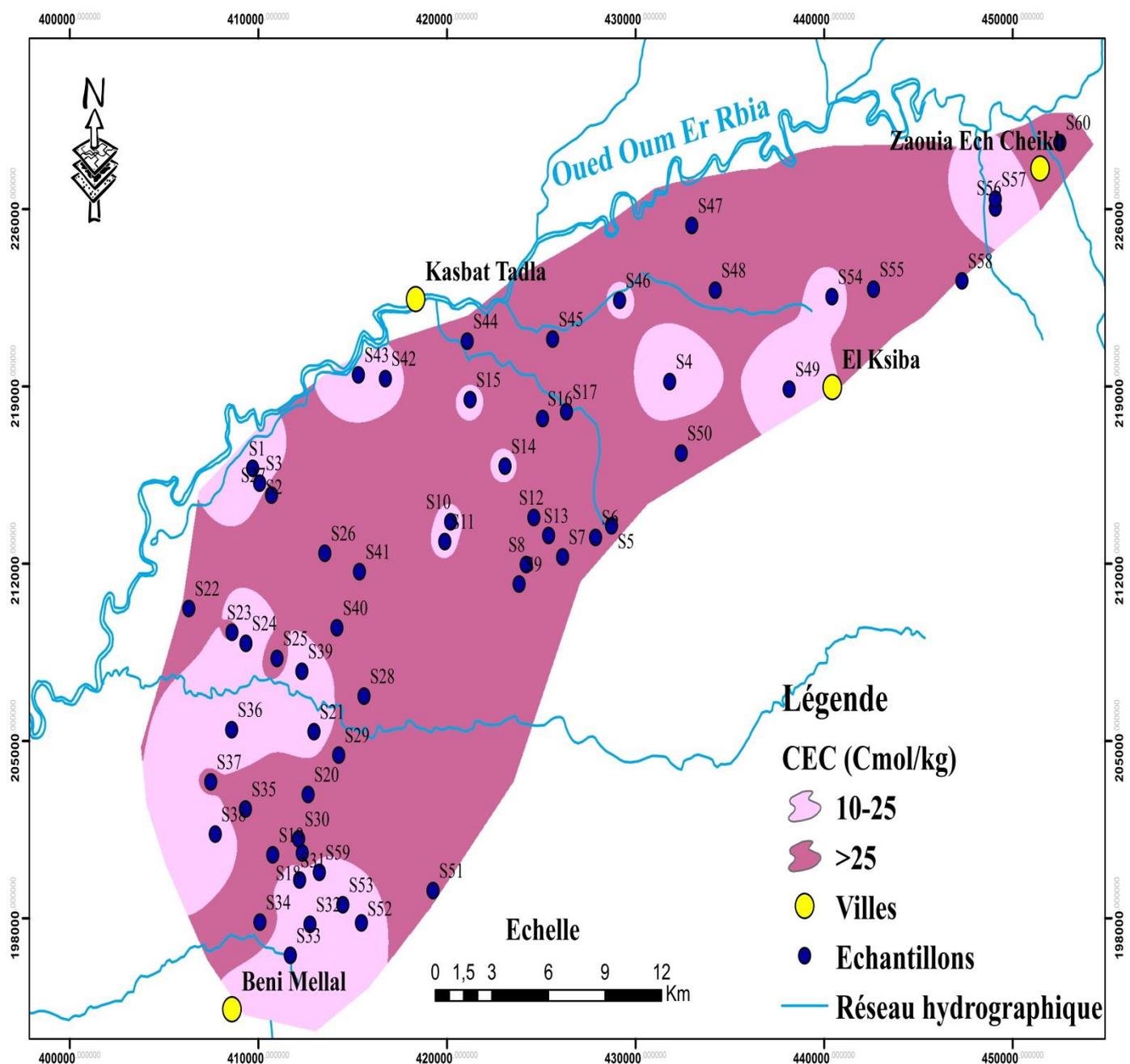


Figure III. 5: Distribution spatiale de la capacité d'échange cationique dans la zone d'étude

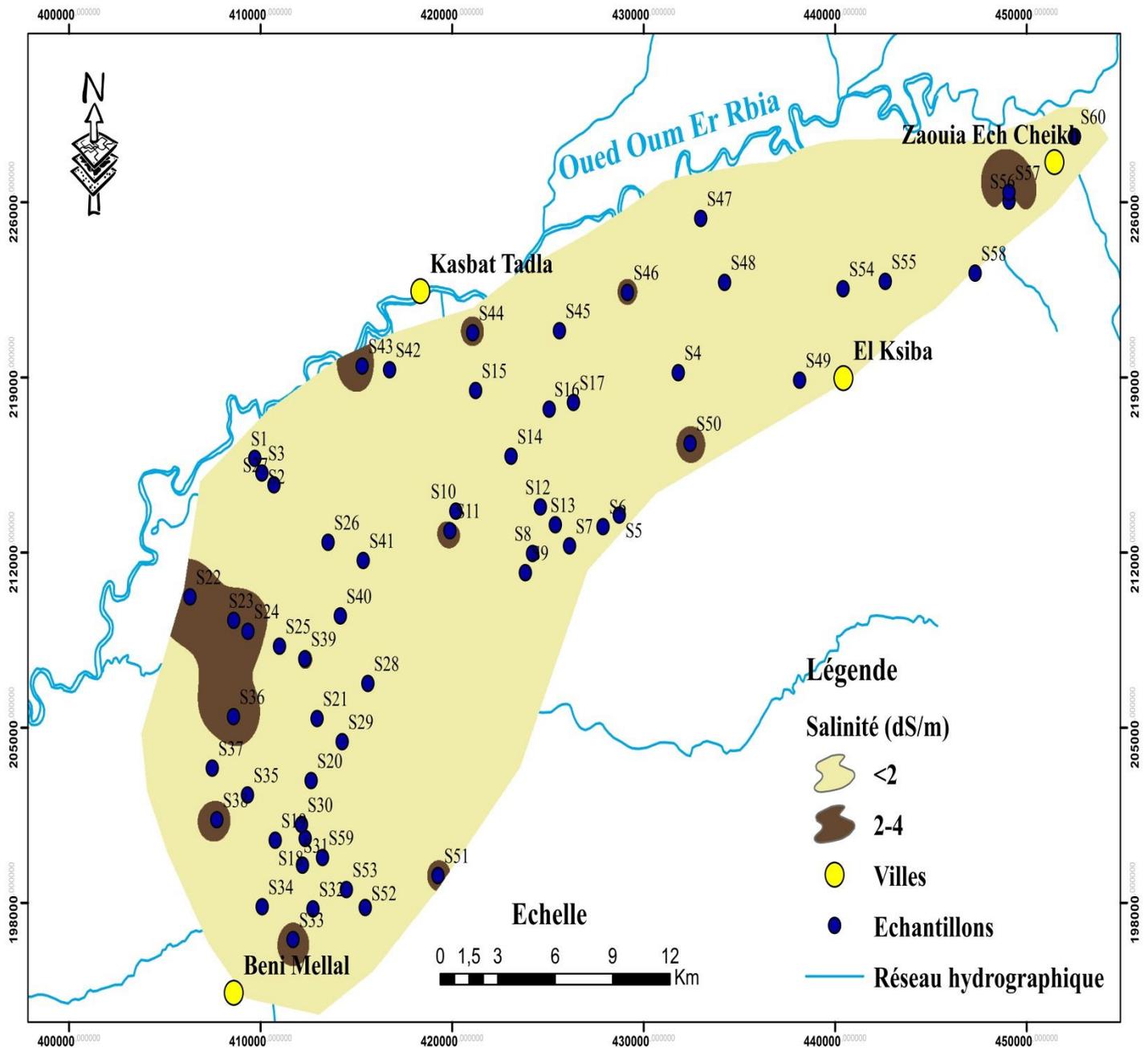


Figure III. 6: Distribution spatiale de la salinité dans la zone d'étude

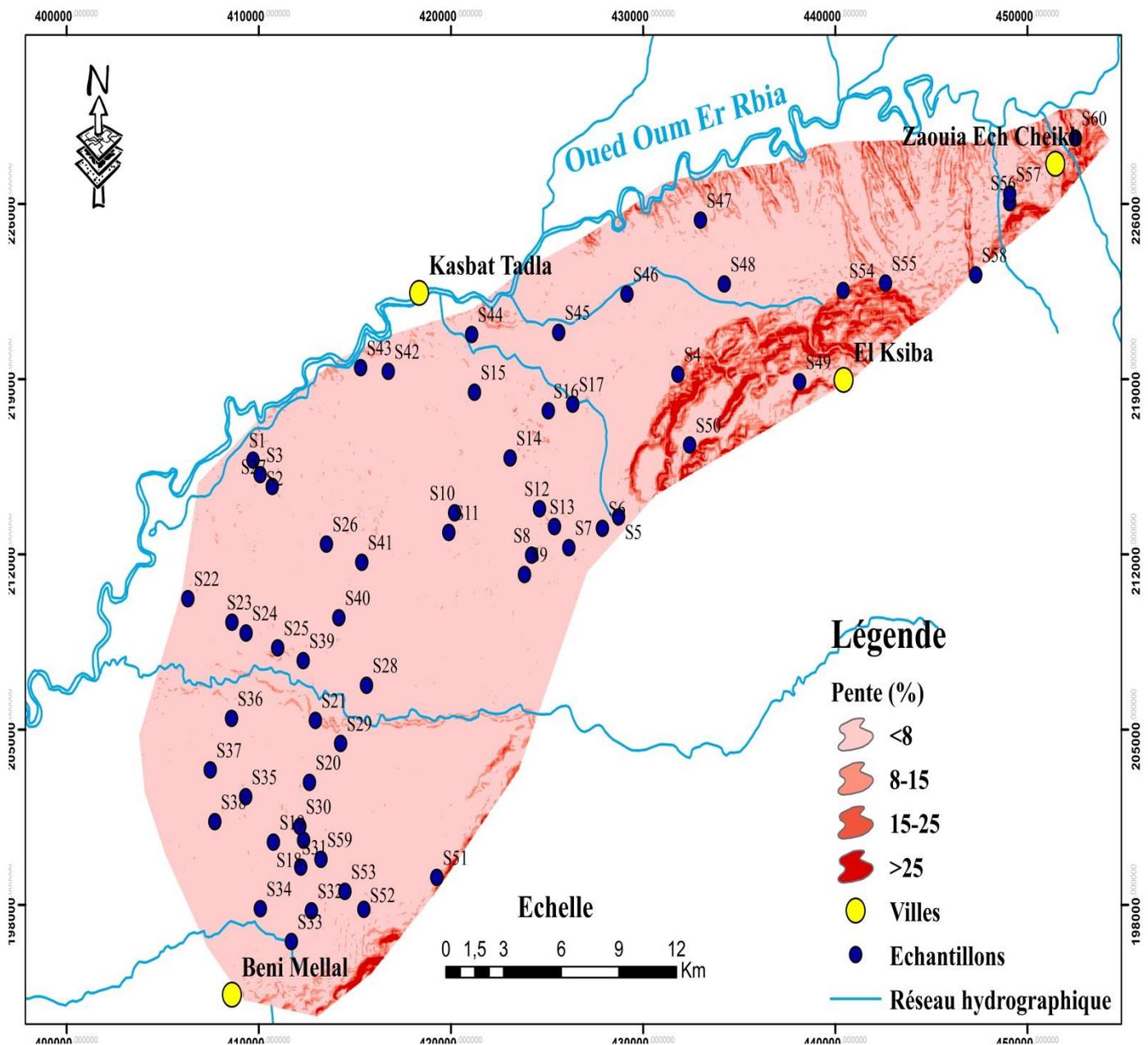


Figure III. 7: Distribution spatiale de la pente dans la zone d'étude

III.1.4. Carte d'aptitude des terres

L'utilisation des SIG nous permet d'obtenir des cartes matricielles thématiques de variables physico-chimiques indépendantes correspondant aux indicateurs de la qualité des sols. En fonction de l'importance de ces indicateurs, le poids de chaque indicateur a été calculé à l'aide de l'analyse multicritère AHP (Tableau III.3), puis la carte de la qualité des sols de la zone d'étude a été générée par la superposition de toutes les cartes matricielles thématiques à l'aide de l'extension de somme des pondérations de superposition dans le logiciel Arc GIS 10.2.2 (figure III.8).

Tableau III. 3: Indicateurs et sous-indicateurs utilisés dans l'évaluation de la qualité du sol et leurs poids relatifs avec la méthode AHP.

Critères	Unités	CR	Poids	Sous-critère (avec l'intervalle)	CR	Poids	Surface (ha)	Surface (%)
pH	En H2O	0,023	0.126	Pauvre (<5.5- >8)	0.033	0.106	68806.23	98
				Bonne (6.5-8)		0.894	1403.3	2
Salinité	ds/m		0.286	Moyenne (2-4dS/m)		0.25	4186.76	5.96
				Bonne (<2dS/m)		0.75	66022.15	94.04
Pente	%		0.052	Pauvre (15-25%)		0.106	2245.16	3.20
				Moyenne (8-15%)		0.26	5055	7.20
				Bonne (<8%)		0.633	61498.07	87.60
CO	%		0.126	Pauvre (<1%)		0.106	246.8	0.35
				Moyenne (1-2%)		0.26	56788.57	80.89
				Bonne (2-4%)		0.633	13172.84	18.76
Texture	%		0.286	Moyenne (15-35%)		0.106	151.61	0.22
				Bonne (35-50%)		0.26	636.39	0.91
				Excellente (>50%)		0.633	69421.25	98.88
CEC	Cmol/kg		0.126	Moyenne (10-25Cmol/kg)		0.25	18048.87	25.71
				Bonne (>25Cmol/kg)		0.75	52158.81	74.29

La carte d'aptitude des sols pour l'agriculture intensive durable dans la zone d'étude est générée et classée en quatre catégories (Figure III.8), c'est-à-dire une qualité de sol excellente, bonne, moyenne et médiocre. Elle a montré qu'environ 11807,51 ha de la zone étudiée conviennent parfaitement, 42849,74 ha, 141414,61 ha sont moyennement adaptés et seulement 787,56 ha sont de mauvaise qualité pour une agriculture intensive durable. Ensemble, les catégories de qualité excellente et de qualité convenable représentent environ 78% de la superficie totale qui pourrait être recommandée pour l'agriculture intensive. En outre, 22% du sol agricole était délimité comme non recommandé pour l'agriculture (Tableau III.4). Géographiquement, ces zones non recommandables sont caractérisées par une texture et salinité insuffisante. Ces deux facteurs ont été considérés comme des facteurs limitant permettant de catégoriser la qualité du sol de la zone d'étude située dans la zone irriguée de la plaine de Tadla, qui a rencontré plusieurs problèmes tels que la dégradation des sols, l'irrigation excessive et la salinisation des sols. Ces effets pourraient sans aucun doute réduire la qualité et la capacité du sol à soutenir la croissance des cultures, ce qui pourrait affecter par conséquent la production agricole.

Tableau III. 4: Degré d'aptitude des sols au nord-est de la plaine de Tadla (Maroc)

Degré d'aptitude	Surface totale classée par l'analyse d'aptitude	
	ha	%
Pauvre	787.56	1.12
Moyenne	14714.61	20.97
Bonne	42849.74	61.08
Excellente	11807.51	16.83
Totale	70159.42	100

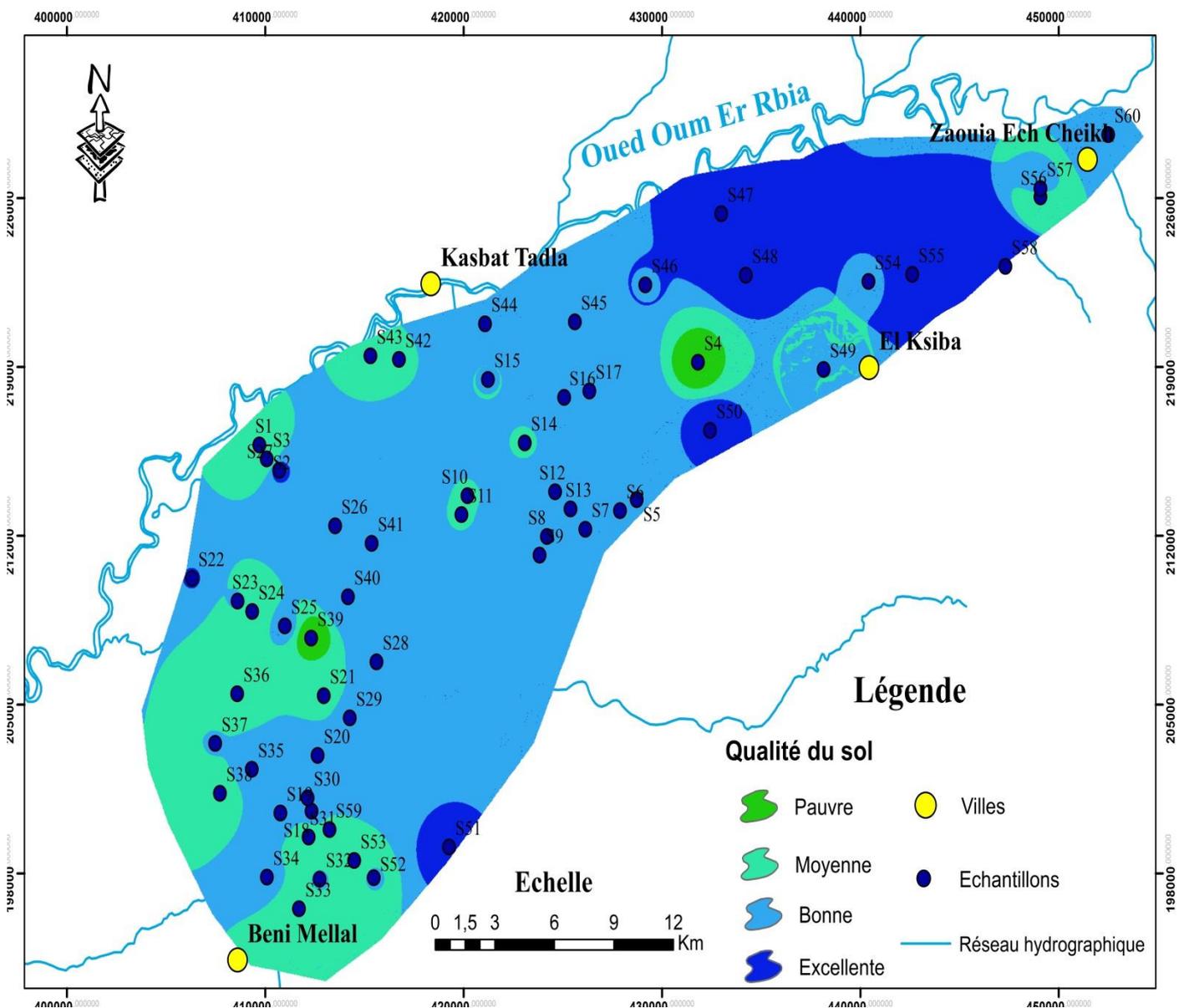


Figure III. 8: Carte de l'adéquation du sol pour l'agriculture intensive

III.1.5. Conclusion

La présente étude a été réalisée pour évaluer l'adéquation des terres agricoles actuelles de la région nord-est de la plaine de Tadla à une agriculture intensive durable en utilisant les approches SIG et AHP. L'étude a été réalisée en utilisant 6 indicateurs reflétant la qualité du sol, à savoir le pH, CO, CEC, la texture, la salinité du sol et la pente.

L'approche AHP a été appliquée pour estimer les poids de l'indicateur et des sous-indicateurs en tenant compte de leurs influences dans la sélection des terres appropriées pour l'agriculture intensive. L'outil spatial analyst a été utilisé pour générer les cartes thématiques à l'aide de l'interpolation IDW, puis chaque carte thématique a été pixellisée à l'aide des poids obtenus de l'AHP. La fonction de calculateur d'Arc GIS et les analyses de superposition de l'analyste spatial Arc GIS ont été utilisées pour produire la carte d'aptitude finale. Sur la base de la carte finale d'aptitude des sols pour une agriculture durable, 16,83% des terres de la zone d'étude ont une excellente aptitude, 61,08% ont une bonne aptitude, 20,97% une moyenne, et 1,12% sont peu adaptées à une agriculture intensive durable.

La méthode multicritères AHP combinée aux SIG a démontré son utilité en tant qu'approche d'évaluation de la qualité des sols et de l'aptitude des sols à l'agriculture intensive. La méthodologie proposée a été utile pour cartographier la qualité des terres pour l'agriculture intensive et durable, en reliant des indicateurs jugés importants. Les résultats obtenus pourraient donc être utiles pour la gestion de l'activité agricole.

III.2 : Évaluation statistique de la fertilité des sols étudiés

III.2.1. Introduction

La fertilité (ou la productivité) du sol désigne la capacité d'un sol à soutenir la croissance des plantes et à fournir des rendements (cultures ou biomasse). Un sol fertile est considéré comme ayant une production de biomasse élevée, une végétation diversifiée et une faible variabilité de la production. Dans les systèmes agricoles permanents, la fertilité des sols est maintenue grâce à l'épandage de fumier, d'autres matières organiques, d'engrais inorganiques, de chaux et à la présence de légumineuses dans les systèmes de culture, ou une combinaison de ceux-ci. Dans de nombreuses régions du monde, la disponibilité, l'utilisation et la rentabilité des engrais inorganiques ont été faibles, tandis que l'utilisation des terres a été intensifiée. De ce fait, la fertilité des sols a diminué, en particulier dans les apports d'éléments nutritifs (Pieri.1989 ; Smaling.1993). Considérée comme une cause importante de la faible productivité de nombreux sols (Lal.1989 ; Sanchez.2002), la faible fertilité des sols est considérée comme un obstacle important à l'augmentation de la production alimentaire et des revenus agricoles dans de nombreuses régions (Shepherd et al.1998).

L'évaluation de l'état de fertilité du sol est difficile, car la plupart des propriétés chimiques du sol changent très lentement ou ont de grandes fluctuations saisonnières. La croissance des cultures agricoles implique que les éléments nutritifs (N, P, K, etc.) soient retirés du sol par le biais de produits agricoles (aliments, fibres, bois) et de la culture. La recherche sur la fertilité du sol et les équilibres en éléments nutritifs, déclenchée par l'étude continentale Stoorvogel et Smaling (1990), a récemment été relancée par Geurts (1997). De nombreuses techniques ont été utilisées pour évaluer la fertilité des sols. Aujourd'hui, il existe de nouvelles méthodes d'évaluation soit des méthodes statistiques ou des méthodes de modélisations par exemple le modèle QUEFTS qui permet de prévoir les rendements culturaux à partir des caractéristiques chimiques des sols. Des travaux sur la fertilité des sols ont été menés dans plusieurs pays (Appiah et al. 2006 ; Belachew et al. 2010, Koko et al. 2008 ; Jiménez et al.2018).L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer l'état de fertilité des sols étudiés à l'aide d'indicateurs locaux de la fertilité et de données analytiques. Ces informations et données aideraient donc à caractériser la fertilité des sols dans la région. Pour ce faire, des données physicochimiques de ces sols ont été traitées par application de l'analyse statistique multivariée et par comparaison aux valeurs seuils utilisées souvent comme références en agronomie.

III.2.2. Types de fertilité des sols et besoins nutritifs des végétaux

La productivité des terres agricoles est affectée par une série de facteurs dont certains, tels que le climat (précipitations, évaporation, rayonnement solaire, température et vent), échappent au contrôle des agriculteurs. D'autres cependant, comme la fertilité des sols, sont davantage influencés par les activités passées et présentes des agriculteurs. La fertilité des sols affecte et est affectée par les choix des agriculteurs en matière de production agricole, de fertilisation et de régimes de conservation des sols et de l'eau. La fertilité englobe classiquement trois types de composantes interdépendantes (Mérelle, 1998) :

- ❖ la fertilité physique est la manière dont les différents constituants du sol sont agencés ensemble. Elle est essentielle pour la pénétration racinaire, et aussi détermine les conditions de germination des semences, d'aération et d'économie en eau, et ce, à travers une structure meuble, perméable et aérée du sol,
- ❖ la fertilité chimique a trait à la nutrition minérale des végétaux via les concepts de biodisponibilité des éléments, de toxicités et d'équilibres,
- ❖ la fertilité biologique est une aptitude biologique d'un sol, à fournir naturellement par les éléments biologiques fertiles, par les cycles biologiques et les éléments fertilisants pour la croissance des végétaux.

Cette partie traite plus particulièrement la fertilité physique et chimique des sols.

III.2.3. Facteurs contrôlant la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols

Il existe de nombreux nutriments dans les sols sous différentes formes (cations, anions, complexes, etc.) et à des concentrations variables, en fonction par exemple de la nature des sols et du type de fertilisation pratiquée. Chaque élément ayant sa propre fonction spécifique pour la plante (Tableau III.5). Dans cette partie, nous discuterons des principaux nutriments et de leurs fonctions. Outre le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, les plantes ont besoin d'éléments. La plupart de ces éléments sont indispensables pour les organismes qui consomment des végétaux.

Tableau III. 5: Rôle des principaux éléments nutritifs dans la croissance végétale (Genot et al.2009)

Symbole	Élément	Action
c	Carbone	Élément constitutif de la matière organique, assimilé à partir de l'atmosphère sous forme de CO ₂ (photosynthèse par les végétaux, assimilation pour certains micro-organismes)
N	Azote	Élément constitutif des organismes vivants, assimilé par les végétaux essentiellement sous forme de nitrate (NO ₃) ou d'ammonium (NH ₄) à partir de la solution du sol. Un excès de N dans le sol peut entraîner une concentration en nitrate trop importante dans les plantes et un risque de lixiviation et de contamination des eaux.
P	Phosphore	Rôles plastique (paroi cellulaire) et métabolique (échanges énergétiques (ATP/ADP))
K	Potassium	Rôles au niveau de l'absorption et du transport de l'eau, ainsi que dans l'activation d'enzymes
Mg	Magnésium	Constitution de la chlorophylle, synthèse des acides aminés, assimilation et transport du P, résistance aux stress. En cas de carence, le Mg migre vers les parties les plus jeunes de la plante et provoque un jaunissement des feuilles plus âgées.

III.2.4. Matériels et méthodes

L'évaluation technique de la fertilité du sol a impliqué un échantillonnage et une analyse du sol. Au total, 60 échantillons composites ont été recueillis dans la partie nord-est de la plaine de Tadla pour cette étude.

III.2.4.1. État et évolution de la fertilité des terres agricoles

Les principaux indicateurs du suivi de la fertilité des terres agricoles concernent la texture, le statut acido-basique, le statut organique et le statut en éléments nutritifs:

- ❖ le statut acido-basique est déterminé par le pH du sol. Il représente une expression synthétique des conditions physico-chimiques qui président en partie à la structuration du sol, à l'activité microbienne et à la disponibilité des éléments. Les grandes cultures présentent souvent un optimum de croissance dans une gamme de pH comprise entre 6 et 7,
- ❖ le statut organique est généralement évalué par la mesure de la concentration totale en carbone organique (COT) et en azote (NT) dans les sols. Le rapport C/N, qui renseigne sur l'état qualitatif de la matière organique, est également calculé.
- ❖ Le statut nutritif est évalué par la mesure des concentrations en éléments bio disponibles dans les sols : cations (Mg et K), phosphore.

III.2.4.2. Analyses physico-chimiques

Les 60 échantillons de sol ont été analysés selon les méthodes standards, pour la texture, pH, la matière organique, le rapport C/N sont analysées au sien du laboratoire des sols de géo-ressources et environnement à la faculté des sciences et technique de Béni-Mellal, et les autres analyses telles que les taux d'azote total, phosphore assimilable, potassium échangeable, et le magnésium sont analysées au laboratoire Labo-Mag à Casablanca. Les détails des méthodes pour les paramètres utilisés sont bien présentés dans le chapitre. II (matériels et méthodes). Les résultats obtenus de chaque indicateur sont comparés avec les données seuils, qui sont celles utilisées, en général, comme références en agronomie (Tableau III.6).

Tableau III. 6: Synthèse des seuils des paramètres physico-chimiques dans les sols (Lacharme, 2001 ; LANO, 2008)

Variables des sols	Seuils	Signification agronomique
Taux des matières organiques (MO) (g/kg)	MO < 14	Sol très pauvre
	14 ≤ MO < 20	Sol pauvre
	20 ≤ MO < 30	Sol bien à moyennement pourvu
	30 ≤ MO < 40	Sol pauvre, Sol bien pourvu
	MO ≥ 40	Teneur élevée
pH	pH ≤ 5,5	Sol très acide
	5,5 < pH ≤ 6	Sol acide
	6 < pH ≤ 6,5	Sol peu acide
	6,5 < pH ≤ 7	Sol neutre
	7 < pH ≤ 7,5	Sol peu alcalin

	pH > 7,5	Sol alcalin (basique)
Rapport C/N	<p>C/N < 15</p> <p>15 ≤ C/N < 20</p> <p>C/N ≥ 20</p>	<p>Vitesse de décomposition de la matière organique croissante; besoins en azote non couverts</p> <p>Bonne vitesse de décomposition des matières organiques; besoins en azote couverts.</p> <p>Besoins en azote non couverts pour permettre une bonne décomposition de la matière carbonée</p>
Taux d'azote total (N) (g/kg)	<p>N < 0,75</p> <p>0,75 ≤ N ≤ 1,25</p> <p>1,25 < N ≤ 1,75</p> <p>1,75 < N ≤ 2,25</p> <p>N > 2,25</p>	<p>Sol très pauvre</p> <p>Sol pauvre</p> <p>Sol moyennement pourvu</p> <p>Sol riche</p> <p>Sol très riche</p>
Taux de phosphore assimilable (P) (g/kg)	<p>P < 0,1</p> <p>0,1 ≤ P ≤ 0,2</p> <p>0,2 < P ≤ 0,3</p> <p>0,3 < P ≤ 0,4</p> <p>P > 0,4</p>	<p>Sol très pauvre</p> <p>Sol pauvre</p> <p>Sol moyennement pourvu</p> <p>Sol riche</p> <p>Sol très riche</p>
Taux de potassium échangeable (K) (g/kg)	<p>K < 0,1</p> <p>0,1 ≤ K ≤ 0,2</p> <p>0,2 < K ≤ 0,3</p> <p>0,3 < K ≤ 0,45</p> <p>K > 0,45</p>	<p>Sol très pauvre</p> <p>Sol pauvre</p> <p>Sol moyennement pourvu</p> <p>Sol riche</p> <p>Sol très riche</p>

III.2.4.3. Analyses statistiques

Des statistiques descriptives ont été utilisées pour chaque paramètre de fertilité des sols. Ces paramètres ont été soumises à une analyse en composantes principales (ACP) dans le but d'évaluer et de déterminer les corrélations entre les principales variables chimiques. Ces analyses ont été traitées à l'aide du logiciel SPSS Statistics 21 et Origin 2018.

III.2.5. Résultats et discussions

Les statistiques de base des paramètres indicateurs de fertilité des sols sont présentées dans le Tableau III.7.

Tableau III. 7: Les données statistiques des indicateurs de fertilité

N=60	Texture (%)			pH	MO (g/kg)	C/N	P (g/kg)	K (g/kg)	Mg (g/kg)	N (g/kg)
	sable	argile	limon							
Min	12.5	16.2	8.5	7.6	12	9,54	0,007	0,096	0,293	0,6
Max	73.7	63.5	38	8.6	51,1	11,91	0,223	1,65	3,73	2,6
Moyenne	33.3 2	41.26	25.04	8.2 9	28,73	11,13	0,0483	0,46	1,34	1,49
Écart- type	11.7 2	9.45	6.54	0.1 8	7,95	0,55	0,039	0,25	0,67	0,39

III.2.5.1. Analyse au laboratoire

III.2.5.1.1. Distribution granulométrique (texture)

L'analyse de la texture indique que les sols sont fortement dominés par la fraction argileuse, la moyenne des fractions de sable, de limon et d'argile était de 33.32%, 25.04% et 41.26%, respectivement. La teneur en argile varie de 16.2% dans la surface à 63.5% avec des augmentations successives. Les sols ayant une texture argileuse sont en général chimiquement riches, mais aux propriétés physiques très mauvaises (milieu imperméable et mal aéré, empêchant une pénétration harmonieuse des racines ; travail du sol difficile, en raison de la compacité dans le cas d'un sol sec ou de la forte plasticité dans le cas d'un sol humide. Le rapport limon/argile (= 0.60) des sols dans la région étudiée était relativement élevé. Comme indiqué par (Ribeiro. 1976), le rapport supérieur à 0,12 a été considéré comme un sol moins altéré.

III.2.5.1.2. Réaction du sol

Le pH avec des valeurs de 7,6 à 8,6 et une moyenne de 8,29, est considéré comme légèrement alcalin. Le pH du sol influe sur la croissance des plantes. Certaines plantes préfèrent un sol acide ($\text{pH} < 7$), d'autres un sol neutre ($\text{pH} = 7$), d'autres encore un sol basique - ou alcalin ($\text{pH} > 7$). Pour les cultures calcicoles, on aura une meilleure absorption des éléments nutritifs quand le pH est supérieur à 8. En agronomie, on considère que le potentiel de fertilité n'est pas affecté quand le pH se situe dans une plage entre 6,5 (légèrement acide) à 7,5 (légèrement alcalin). La plupart des éléments nutritifs sont absorbés de façon optimale par les plantes dans cette plage de pH qui est aussi compatible avec la croissance de leurs racines. D'après les valeurs de pH, on conclure que le potentiel de fertilité n'est pas affecté dans la zone d'étude.

III.2.5.1.3. Matière organique

La matière organique peut constituer un des indicateurs de la fertilité d'une parcelle pour évaluer les effets d'un système de culture. En effet, elle joue un rôle important dans de nombreuses propriétés du sol et détermine donc partiellement la conservation de la ressource de sol et la productivité végétale. Les valeurs de la matière organique illustrées dans la figure III.9 variaient entre 12 et 51 g/kg avec une moyenne de 28.7g/kg, suggérant que la matière organique est bien à moyennement pourvue dans la zone d'étude.

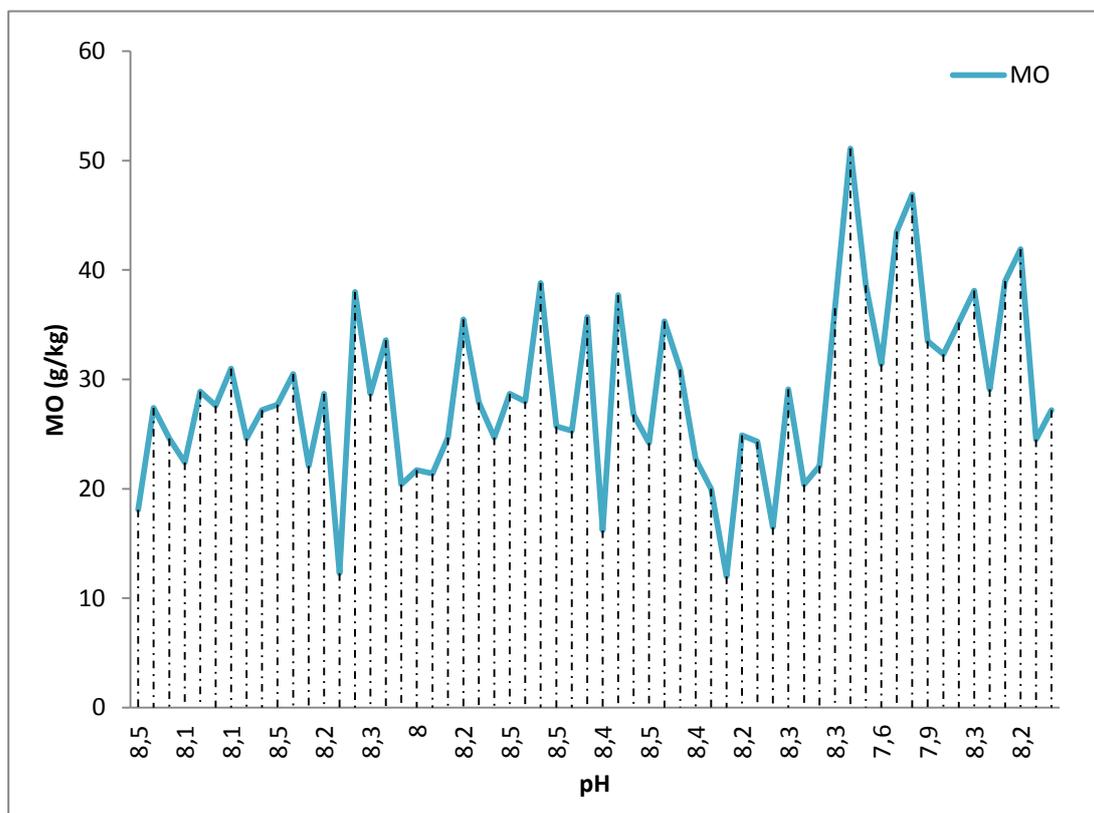


Figure III. 9: Variations de la MO du sol échantillonné

III.2.5.1.4. Rapport C/N

Le rapport carbone/azote (C/N), qui est un indicateur de la qualité de la matière organique dans les sols, est compris entre 9.54 et 11.91 avec une moyenne égale à 11.13 (Figure III.10), cela signifie que la vitesse de décomposition de la matière organique est croissante. La valeur de ce rapport est en relation étroite avec le type humus et le degré de décomposition de la litière. Ainsi, la majorité des sols avec un humus de type mull et moder mulleux (c'est-à-dire bien décomposé) sont caractérisés par un rapport C/N inférieur à 20, ce qui témoigne de conditions relativement favorables pour la minéralisation de la matière organique.

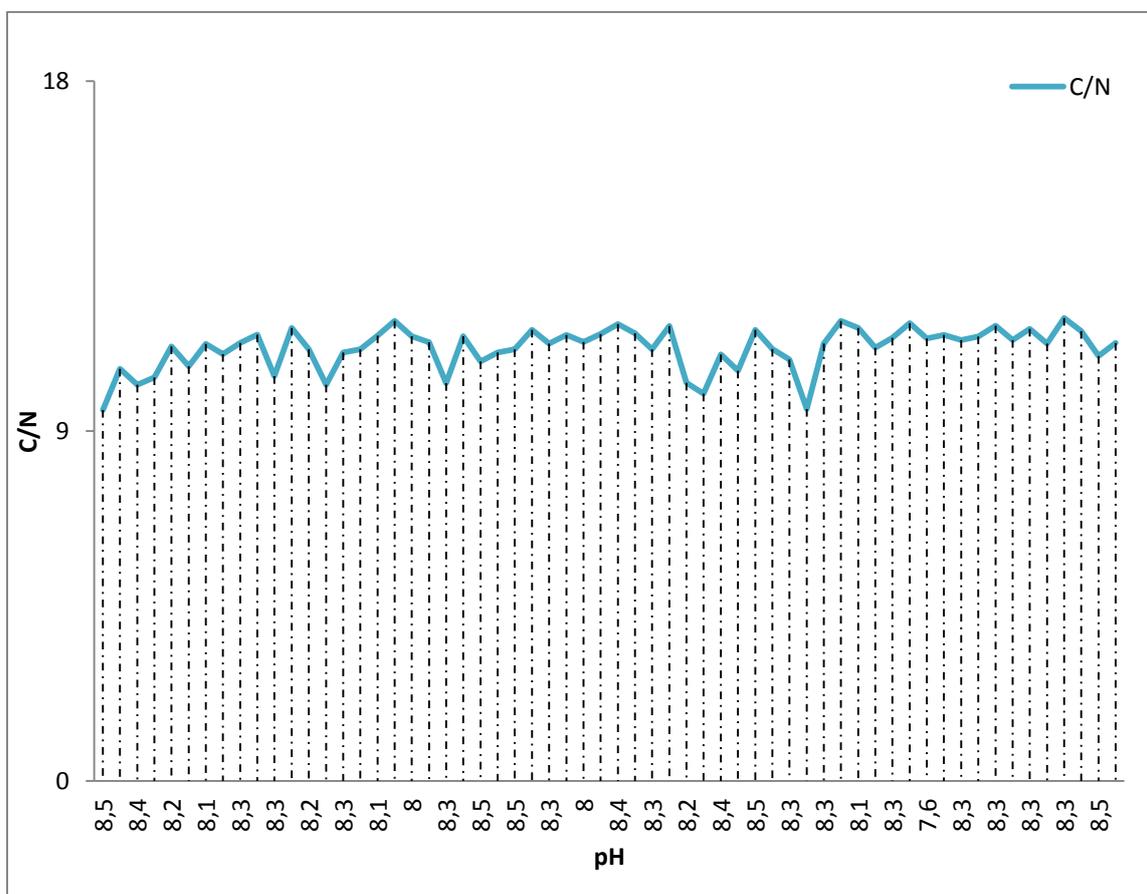


Figure III. 10: Variations du rapport C/N des sols étudiés

III.2.5.1.5. Phosphore assimilable

Différents paramètres sont utilisés pour évaluer les risques potentiels de stress nutritif et de toxicité dans les sols agricoles. Les teneurs en éléments nutritifs (K, Mg, P) sont comparées à des seuils agronomiques. Le phosphore disponible (Olsen P) à 0,5 mg/kg a été fixé comme seuil pour le niveau le plus bas et s'est avéré modérément disponible puisque la valeur analysée à toutes les profondeurs de sol se situe dans la plage allant de 0.007 à 0.223 g/ kg

(Figure III.11), cela indique que les sols dans notre zone d'étude sont très pauvres en phosphore. D'autre part, le pH du sol était significativement alcalin, cette alcalinité rend une grande majorité du phosphore est sous une forme non disponible dans les sols.

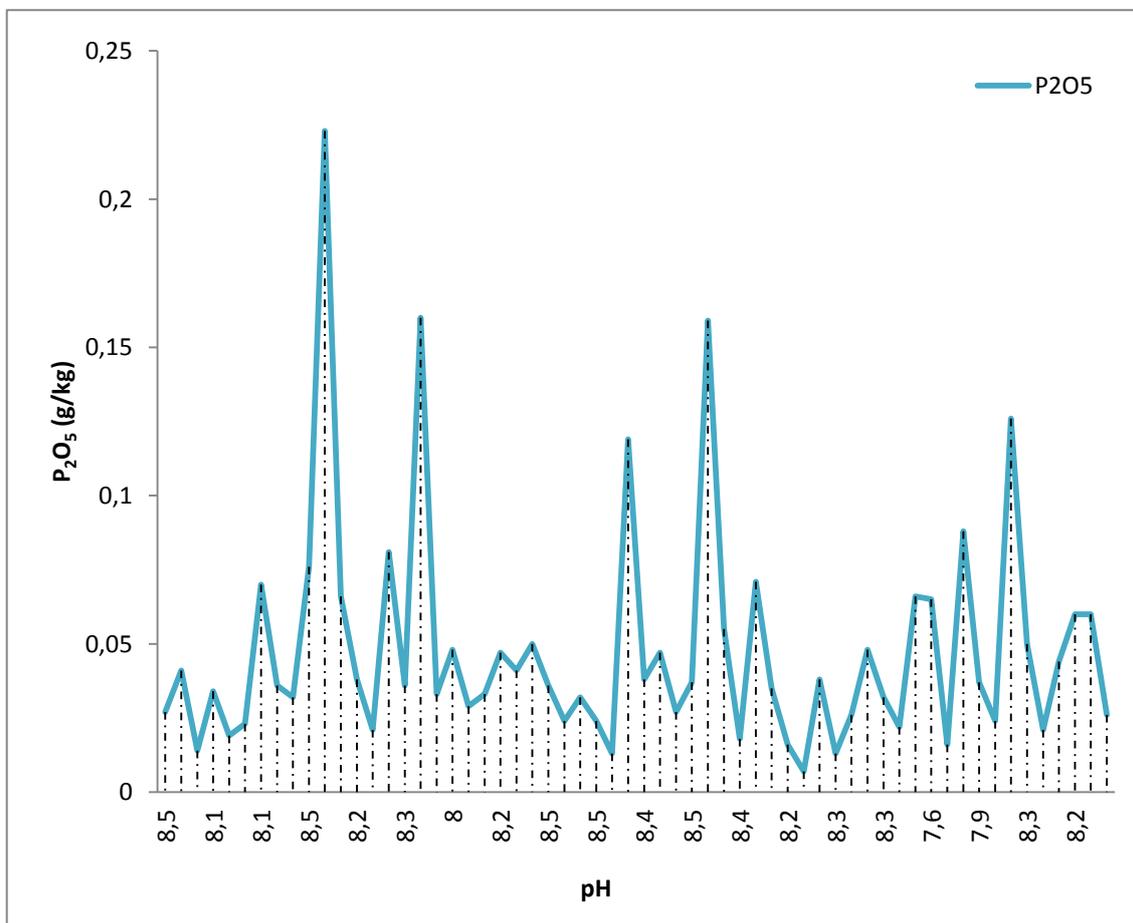


Figure III. 11: Les variations de phosphore assimilable des sols étudiés

III.2.5.1.6. Potassium

Les teneurs en potassium disponible dans la zone d'étude allaient de 0.096 à 1.65g/kg (Figure III.12), avec une moyenned'environ0.45 g /100 kg ce qui indique clairement que le sol est riche en potassium dans la partie nord-est de la plaine de Tadla d'après les normes agronomie. Le potassium, joue un rôle primordial comme activateur de plusieurs enzymes, il intervient dans des métabolismes comme la synthèse des glucoses et des protéines et dans leur transport aux organes de réserves. Le niveau relativement élevé des teneurs en K disponible des sols

agricoles est plus préoccupant que : 65% des échantillons présentant, en moyenne, des teneurs élevées aux valeurs optimales.

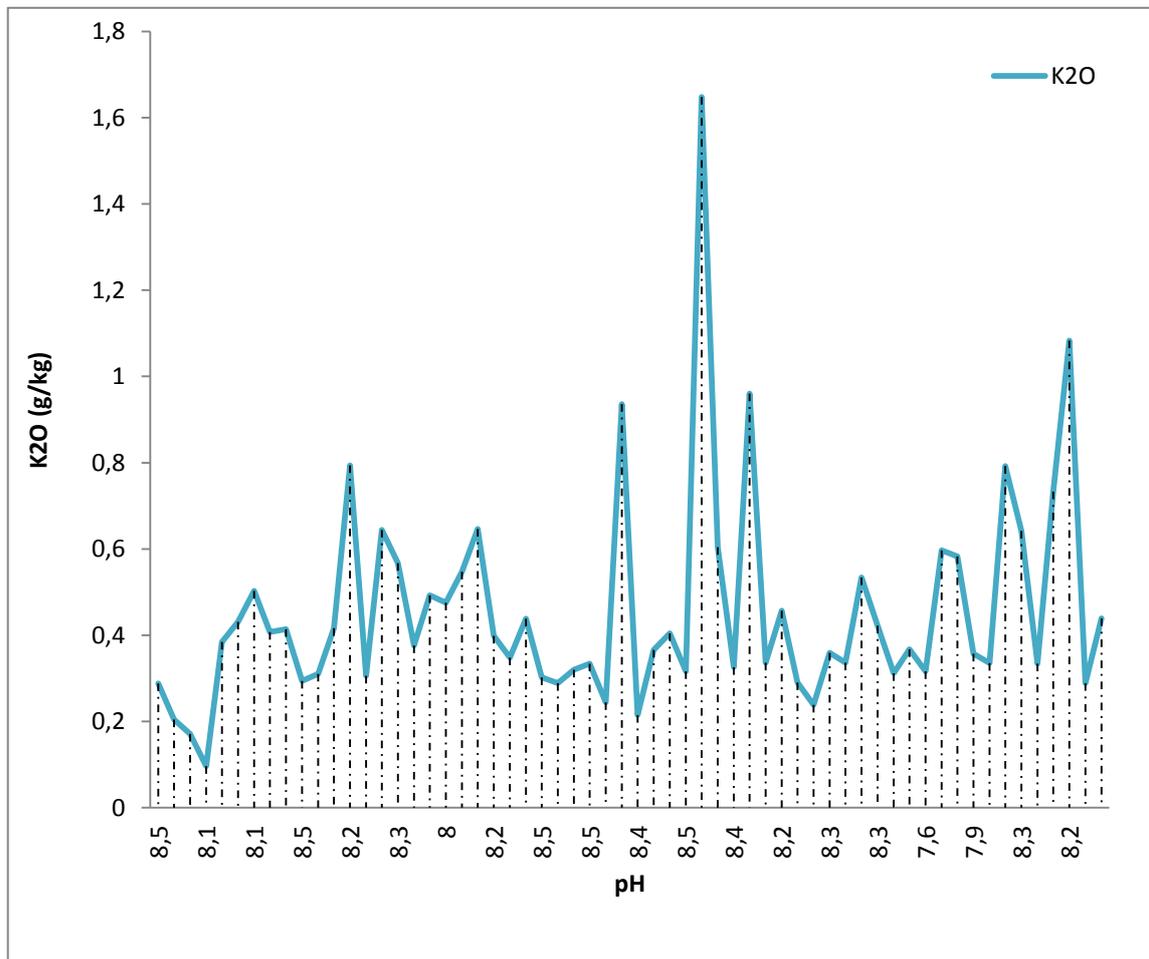


Figure III. 12: Les variations de potassium dans la zone d'étude

III.2.5.1.7. Magnésium

Le statut magnésien indiquer une augmentation sensible des teneurs en Mg disponible, de l'ordre de 0.29 à 3.73 g/kg (Figure III.13) avec une moyenne 1.33g/kg. Cette évolution est difficile à interpréter, en l'absence notamment de statistiques sur l'emploi de fertilisants magnésiens en région d'étude. La disponibilité de magnésium dépend de l'utilisation d'engrais minéraux et de l'altération de certains constituants du sol (argiles magnésiennes, dolomies, etc.).

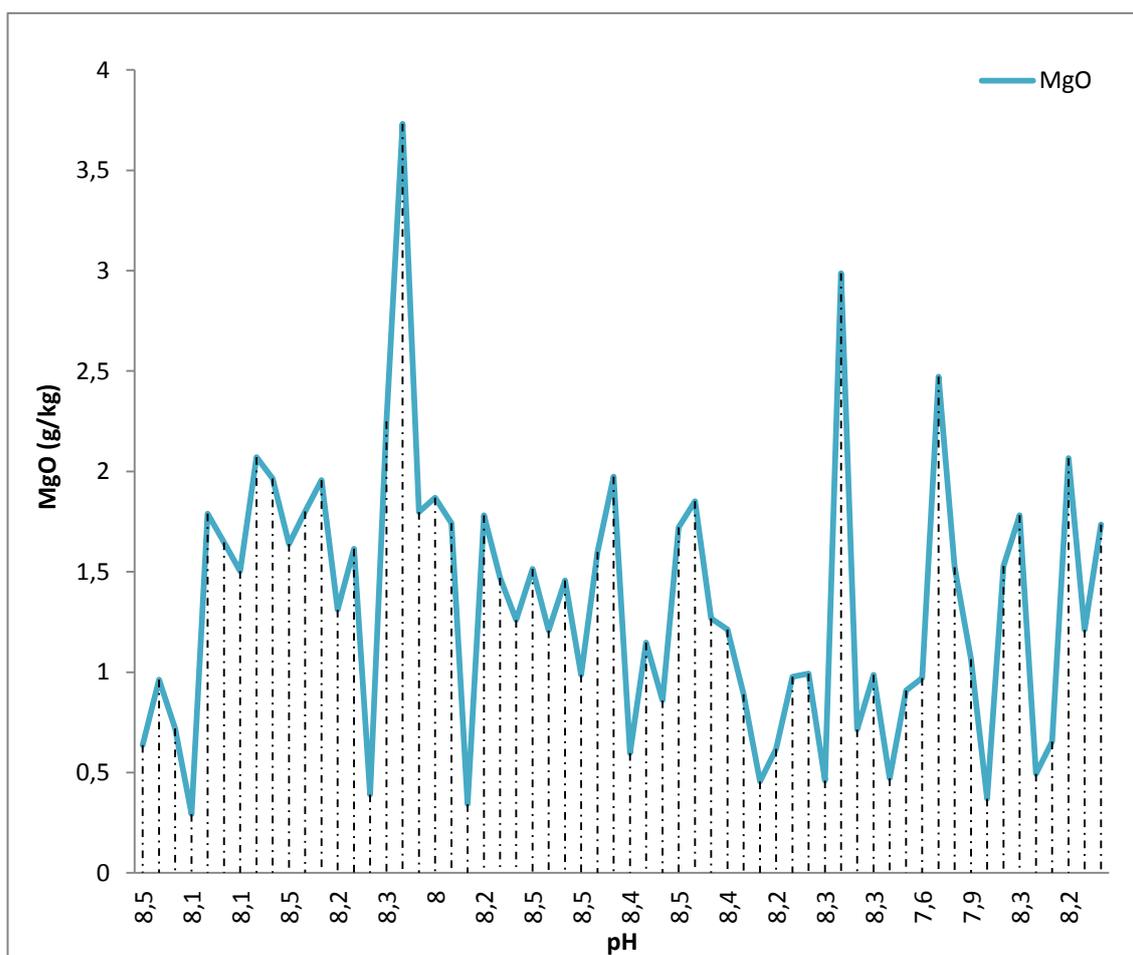


Figure III. 13: Les variations de magnésium dans la zone d'étude

III.2.5.1.8. Azote total

L'azote existe sous plusieurs formes et joue un rôle déterminant dans la croissance végétative des plantes. La plus importante partie de l'azote du sol se trouve à l'état organique. Cette forme n'est pas absorbée directement par les racines des plantes et elle doit être transformée en azote minéral pour être disponible. L'azote qui est un indicateur important de la fertilité des sols est compris entre 0.6g/kg et 2.6g/kg (Figure III.14) avec une moyenne de 1.49g/kg. Selon Dabin, 1970, qui propose 5 échelles de fertilité (1 à 5) en fonction de la teneur en azote totale et le pH, on trouve que les sols de la zone d'étude ayant une fertilité très bonne.

Ces méthodes reposent toutes sur les mêmes notions théoriques, mais chacune produit un genre de résumé spécifique et s'applique sur un type de donnée précis. C'est pourquoi on a choisi l'ACP comme méthode la plus adaptée phénomène étudié.

III.2.5.2.2. Aspect fondamental de l'ACP

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode descriptive permettant d'analyser un tableau de données quantitatives conduisant à des représentations graphiques. L'ACP est un outil de réduction de dimensionnalité d'un ensemble de variables quantitatives (Nie et al.2014).

L'ACP répond à trois objectifs :

- Identification de groupes d'individus et liens entre variables : L'ACP sert à décrire un jeu de données comportant de nombreux individus et variables quantitatives. L'analyse permet d'extraire l'information pertinente et la synthétise sous forme de composantes principales
- Vérification d'un jeu de données multi variées : L'ACP sert également à préparer un jeu de données avant toute autre analyse statistique. Elle identifie les individus outliers très rapidement sur la carte factorielle.
- Etape préalable pour un autre traitement statistique : L'ACP permet de remplacer les variables initiales par des variables synthétiques.

III.2.5.2.3. Résultats obtenu

La part d'informations restituées par les 2 composantes (Figure III.15) les plus importantes retenues est de 60.11 % de la variance originale. La première composante permet d'expliquer 39,28 % de la variance. Elle a rassemblé des caractéristiques de la matière organique et du complexe absorbant (P_2O_5 , K_2O , MgO , N). Ces éléments sont fortement reliés les uns aux autres, avec des coefficients de corrélation significatifs variant de 0,51 à 0,89. La deuxième composante avec 20.89 % de la variance originale a été représentée par d'autres caractéristiques comme le pH et le rapport C/N.

Le coefficient de variation du rapport C/N élevé indique également que les processus de décomposition sont globalement variables et rapides. De même, les teneurs en matière organique des sols sont dans les normes suggérées, par contre les teneurs en phosphore

inférieures au seuil établi par les références, ce qui indique que les sols ont besoin d'apport de phosphore. Les teneurs en azote sont supérieures aux recommandations pour tous les sols échantillonnés, donc considérées comme élevées. L'explication qui suit est que l'azote est facilement adsorbable sur le complexe échangeur de cations. Et il reste également la seule source d'approvisionnement nutritif. Le pH est relativement élevé donc on aura une meilleure absorption des éléments nutritifs. Pour le potassium et le magnésium sont supérieurs aux seuils suggérés dans l'agronomie pour tous les sols échantillonnés.

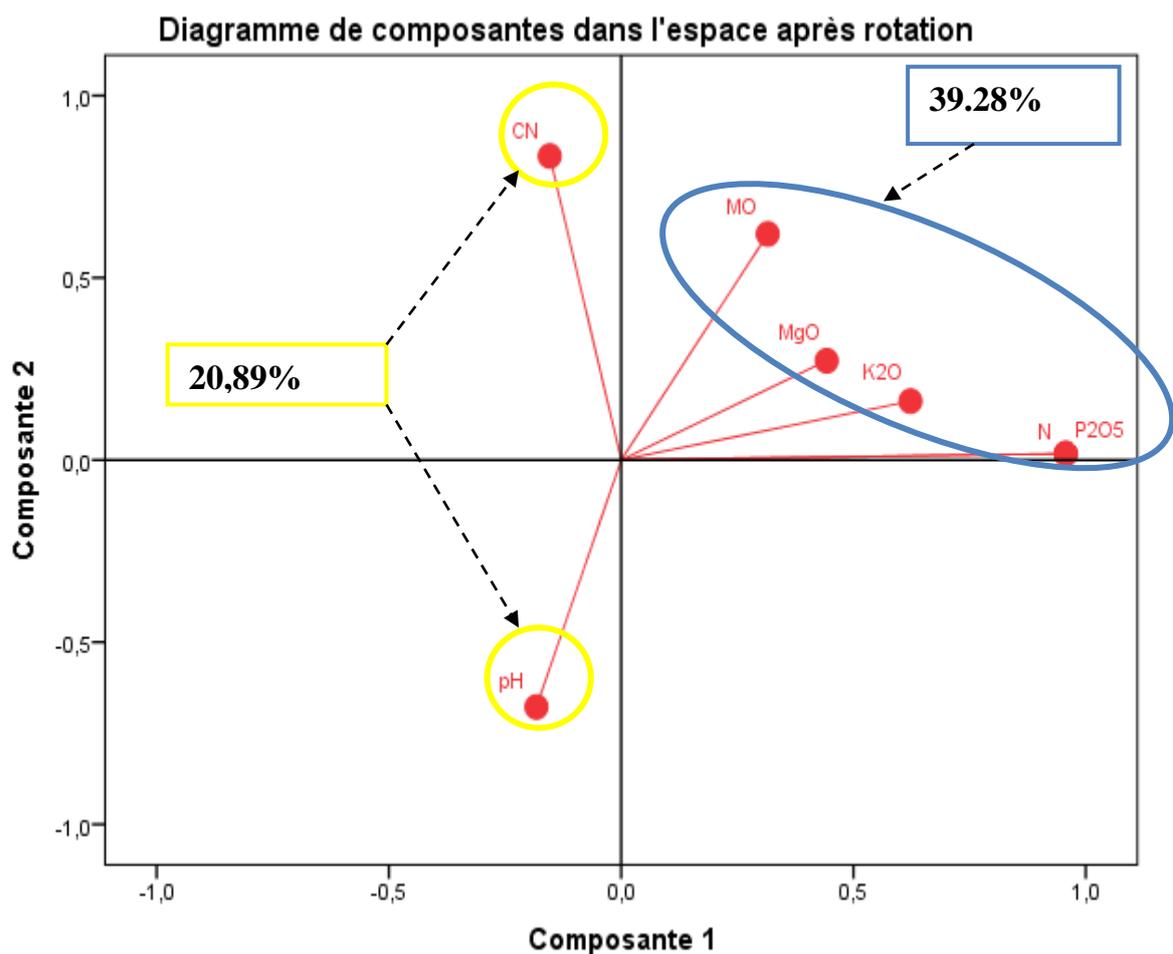


Figure III. 15: ACP des paramètres physicochimiques dans des échantillons de sol

III.2.6. Conclusion

Cette étude consisté l'utilisation des méthodes statistiques pour évaluer la fertilité des sols agricoles de la partie nord-est de la plaine de Tadla. Elle a nécessité la création d'une base de données constituée essentiellement par les caractéristiques physico-chimiques des 60 échantillons de sol représentatifs. Ces paramètres physico-chimiques a permis de déterminer un ensemble de variables pédologiques utilisées comme indicateurs du niveau de fertilité des sols. L'analyse des variables sélectionnées a montré que les valeurs obtenues des sols échantillonnés sont supérieures aux seuils suggérés en agronomie sauf le phosphore, on peut conclure que la fertilité des sols dans la zone d'étude et de bonne qualité.

Chapitre IV

Évaluation de la pollution métallique et le risque écologique des sols étudiés

IV.1. Introduction

Le sol est généralement considéré comme la partie de l'environnement largement exposée à l'accumulation de métaux lourds (Mazurek et al. 2017; Marchand et al. 2011). La contamination des sols agricoles par des éléments toxiques tels que les métaux lourds est devenue un grave problème environnemental (Alghamdi et al. 2018; Tang et al. 2017; Ali et Khan, 2018) et une menace potentielle pour la production agricole dans le monde entier, en raison de leur nature biodégradable, longues demi-vies biologiques à éliminer (Jian et al. 2018, Muhammad et al. 2011), leur persistance, leur toxicité et leur bioaccumulation dans l'aliment chaîne. (Douay et al. 2013). En outre, cette pollution est devenue plus grave avec le développement rapide de l'industrialisation, urbanisation et recours croissant aux produits agrochimiques (Jordanova et al. 2018). Bien que les métaux lourds soient omniprésents dans l'environnement, ils nuisent aux systèmes écologiques et à la santé humaine (Vijaya et al. 2010), que ce soit par la consommation de légumes, par contact cutané direct ou par ingestion, et s'accumulent dans les différents organes du corps, notamment les reins, les os et foie (Singh 2010, Wei et Yang 2010).

Le sol implique de nombreux métaux provenant à la fois de la présence naturelle et d'activités anthropiques (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Les concentrations naturelles de métaux lourds dans les sols dépendent principalement du type et de la chimie des matériaux de base à partir desquels les sols sont dérivés. Les activités humaines peuvent considérablement augmenter les concentrations de métaux dans le sol. Les principales sources anthropiques de métaux lourds dans les sols agricoles sont l'excédent d'engrais et de pesticides, l'irrigation des eaux usées, les dépôts atmosphériques et industriels.

Néanmoins, le Maroc est actuellement confronté à de graves problèmes de contamination par les métaux. Les activités humaines sont la principale source de pollution des sols au Maroc. Plusieurs questions se posent quant aux changements constants des propriétés des sols et à l'accumulation de polluants dans les sols, qui affectent par conséquent la qualité des sols, en raison des changements climatiques locaux et mondiaux (Pielke, 2005). De plus, la teneur en métaux lourds peut être affectée par les interactions avec les propriétés physicochimiques du sol, telles que: pH du sol, capacité d'accumulation dans le sol, taille des fractions du sol (Gąsiorek et al.2017), et la teneur en matière organique qui joue un rôle important dans la rétention, la mobilisation et la migration des métaux lourds dans le sol (Weber et al.2018).

De nombreuses études ont été menées sur la pollution par les métaux lourds dans les sols agricoles, tels que les grandes villes, dans les pays développés et sous-développés (Michał et al. 2017, Oumenskou et al. 2018 ; Barakat et al. 2019c) .L'utilisation des indices de pollution est une méthode complète pour évaluer les concentrations de métaux lourds et l'état de la pollution dans le sol. Les indices de pollution les plus fréquemment utilisés sont l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur d'enrichissement (EF), le facteur de contamination (FC), l'indice de charge de pollution (PLI) et l'indice de risque écologique potentiel (IR) (Wang, 2012; Solgi, 2016; Saddique et al. 2018). À cette fin, nous avons mené cette étude pour évaluer le risque posé par l'accumulation de métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Pb, Zn,) dans les sols de la partie nord-est de la plaine de Tadla. En conséquence, les objectifs spécifiques de cette étude étaient les suivants: 1) déterminer les concentrations de cinq métaux (Cd, Cr, Cu, Pb, et Zn) dans les échantillons de sol. 2) Identifier la distribution spatiale de la pollution par les métaux à l'aide de systèmes SIG. 3) Évaluer la contamination des sols dans la zone d'étude à l'aide des indices de pollution EF, Igeo, CF, PLI et RI. 4) Comparer les valeurs obtenues à celles publiées dans d'autres travaux de recherche. Cette recherche sert à fournir des informations importantes pour aider à la prise de décision sur l'état de la qualité des sols agricoles et de l'environnement et pour protéger la santé humaine.

IV.2. Les métaux lourds

Les concentrations naturelles de métaux lourds dans les sols dépendent principalement du type et de la chimie des matériaux de base à partir desquels les sols sont dérivés. Cependant, les apports anthropiques peuvent conduire à des concentrations très supérieures à celles provenant de sources naturelles.

IV.2.1. Plomb

Le plomb est l'un des plus anciens polluants métalliques introduits par l'homme dans l'environnement. Les tuyaux d'évacuation des eaux en plomb et portant les insignes de certains empereurs romains sont toujours utilisés, bien qu'ils introduisent le plomb en tant que polluants dangereux dans le sol lorsqu'il devient poreux. L'utilisation de plomb pour la fabrication de conduites d'eau n'est plus autorisée en raison de son effet dangereux sur l'environnement et des dommages causés à l'homme. Le plomb peut, s'il est ingéré avec de la nourriture ou de l'eau, endommager gravement le système nerveux, le système urinaire et le

système reproducteur. Il peut également provoquer une anémie en empêchant la biosynthèse de l'hémoglobine.

IV.2.2. Cadmium

Le cadmium est un métal lourd, principalement utilisé dans la production de piles au nickel / cadmium ou dans la fabrication de pigments et de stabilisants pour le PVC; dans les industries métallurgiques et électroniques, il est l'un des polluants métalliques les plus fréquemment enregistrés. Il passe dans l'environnement par les émissions des industries métallurgiques ou par l'application d'engrais phosphatés en agriculture. Les détergents et les produits pétroliers peuvent également contribuer à sa circulation en tant que polluant de l'environnement. Chez l'homme, une exposition prolongée au cadmium peut entraîner un dysfonctionnement rénal et une maladie pulmonaire obstructive. Il est également lié à des troubles osseux tels que la déminéralisation de la substance osseuse ostéomalacie et ostéoporose. L'apport quotidien de cadmium chez l'homme est estimé entre 0,15 et 1,5 µg.

IV.2.3. Cuivre

Le cuivre est peut-être le plus ancien produit métallurgique connu et extrait par l'homme. Il est utilisé dans de nombreuses industries, principalement pour le câblage dans les industries électriques, en raison de la facilité de fabrication de fils. Il est également utilisé dans les industries métallurgiques pour la fabrication d'alliages. Des exemples sont les alliages utilisés pour les pièces de faible valeur et les alliages de cuivre-zinc connus sous le nom de laiton. Les alliages de cuivre, de zinc et d'étain sont très durs et ont déjà servi à fabriquer des fusils et des canons. Le cuivre passe dans l'environnement sous forme de polluants particuliers, de complexes organiques dans l'eau et de composés métalliques ou inorganiques. Cela provoque une augmentation constante de la teneur en cuivre des sols et par conséquent une augmentation des dommages pour les organismes du sol. Ses effets sur la santé humaine sont également graves et certaines études l'associent à des maladies et troubles graves tels que des lésions du foie et des reins. Les spéculations sur son rôle en tant qu'agent carcinogène n'ont toutefois pas été soulignées.

IV.2.4. Zinc

Le zinc est principalement utilisé pour la galvanisation de l'acier; il forme également un très important composant de nombreux alliages. Un exemple de tels alliages est celui utilisé pour

fabriquer des pièces de monnaie américaines, dont le principal composant est le zinc. Parmi les autres applications importantes du zinc, on trouve le moulage dans l'industrie automobile, la fabrication de certains éléments de construction, la fabrication de papier pour photocopieurs et d'aquarelles, la fabrication d'électrodes négatives pour certaines batteries, ainsi que son utilisation comme activateur et catalyseur dans l'industrie du caoutchouc. Le zinc est ajouté aux sols, soit par l'altération des minéraux et des roches contenant du zinc, soit par les activités humaines, y compris l'élimination des déchets industriels.

Le zinc est lié à certains troubles de la santé, tels que la maladie du pancréas et le métabolisme perturbé. Bowen (1979) a ensuite étudié les relations entre la concentration de métaux dans les sols et leur matériau de base, puis Martin et Coughtrey (1982).

IV.2.5. Fer

Le fer est le quatrième élément le plus abondant dans le sol, bien qu'il soit largement présent sous des formes impossibles à assimiler par les plantes. Le fer, en petites quantités, est essentiel à la croissance saine des plantes et est classé parmi les micronutriments. Il est important pour le développement et le fonctionnement de la chlorophylle et d'une gamme d'enzymes et de protéines. Il joue également un rôle dans la respiration, la fixation de l'azote, le transfert d'énergie et le métabolisme. Comme avec d'autres nutriments, les plantes peuvent avoir trop de fer, mais ceci affecte principalement l'absorption d'autres nutriments plutôt que de produire des symptômes de toxicité directs.

Le sol contient généralement entre 1% et 5% de fer, mais la majeure partie de ce fer étant indisponible, il est difficile de fixer une quantité idéale pour le sol. Certaines estimations suggèrent que le sol devrait contenir au moins 0,001 g de fer par 100 g de sol (ou 10 mg / kg). La toxicité ferreuse est le plus souvent associée à un sol très acide, bien que les symptômes de la toxicité ferreuse soient principalement des symptômes de carences nutritionnelles.

IV.2.6. Chrome

Le chrome est un élément naturel dans les roches et le sol. Le sol naturel contient généralement entre 10 et 50 mg de chrome par kg de sol. Le chrome est toxique en grande quantité pour les plantes et les humains, mais la toxicité dépend de la valence. Le chrome affecte la germination des graines, la croissance des plantes, la photosynthèse et l'absorption d'une variété de nutriments. Il est important de noter que le chrome est bénéfique pour

l'homme en très petites quantités (il a en fait été considéré comme un élément essentiel), car il est impliqué dans l'action de l'insuline. Comme il est naturellement présent dans une large gamme d'aliments, une carence est peu probable.

L'inhalation de chrome provoque divers effets, mais il est peu probable que cela pose problème en jardinage, sauf si de grandes quantités de sol très sec sont inhalées. Le chrome peut provoquer une sensibilisation de la peau et le cancer, mais des recherches ont montré qu'il existait un risque très faible de contamination par l'exposition au contact avec un sol contaminé. L'ingestion de chrome peut causer des dommages aux reins et au foie, des ulcères d'estomac, des vomissements, une hémolyse, des problèmes cardiaques et éventuellement des problèmes de reproduction.

IV.3. Métaux lourds et système de sol

Le sol est un système tridimensionnel composé principalement d'un composant à l'état solide, à côté des deux autres composants -la phase solide et le composant gazeux. Les métaux lourds peuvent avoir, selon l'état physique et la forme chimique que le métal ou son composé peut prendre, un effet important sur l'une de ces phases. L'interaction des métaux avec l'état solide ne se produit pas, mais le pH, associé à d'autres propriétés de l'eau du sol, permettra de contrôler la solution, l'adsorption sur les surfaces solides et la faisabilité de réactions chimiques dans le système. Concrètement, l'interaction des métaux lourds avec l'état solide s'inscrira dans l'un des processus suivants:

- ❖ Adsorption. L'adsorption dans le sol dépend principalement des paramètres physico-chimiques, en particulier du pH et de l'adsorbant des métaux. Nous constatons donc que les minéraux argileux vont en général adsorber moins de métaux que les oxydes et les matières organiques. Les matières organiques dissoutes peuvent augmenter la solubilité des métaux et activer des surfaces minérales réactives, améliorant ainsi l'adsorption.
- ❖ Diffusion dans les matériaux du sol. Les ions métalliques sont capables de se diffuser dans le sol à des vitesses qui dépendent de leurs diamètres ioniques ainsi que du pH dominant du milieu. Cependant, les augmentations de pH peuvent entraîner la formation d'hydro-complexes pouvant entraîner une augmentation des diamètres ioniques, diminuant ainsi la vitesse de diffusion et immobilisant ainsi les métaux lourds aspirant à la diffusion.

- ❖ Formation complexe. Comme indiqué précédemment, les ions métalliques peuvent être coordonnés avec les substances organiques du sol, en particulier les acides humiques et fulviques.

IV.4. Transport de métaux lourds dans le sol

En fait, la diffusion et la dispersion des métaux lourds peuvent prendre la forme d'un processus de transport actif en fonction de nombreux facteurs, le plus important étant lié au mouvement et aux caractéristiques de la solution du sol et des eaux infiltrées. En résumé, ces facteurs sont l'intensité de la pluie, l'évaporation, la rétention d'eau du sol et les propriétés hydrauliques du sol telles que les propriétés de conductivité et de diffusion.

IV.5. Matériel et méthodes

Pour caractériser les propriétés physico-chimiques des sols de surface dans la partie nord-est de la plaine de Tadla, 60 échantillons composites de sub-surface (0 à 20 cm) ont été soigneusement prélevés (voir le chapitre II (matériel et méthodes)). Chaque échantillon représentatif de sol a été tamisé à sec à l'aide d'un tamis en acier inoxydable à maille carrée de 2 mm de diamètre, puis analysé pour déterminer les paramètres physico-chimiques (pH, MO, texture) et les concentrations totales de métaux lourds.

IV.5.1. Méthodes analytiques

Pour évaluer la qualité des sols pour une utilisation agricole intensive et durable, certains paramètres physico-chimiques, indicateurs de qualité, telles que le pH, la MO et la texture, ont été analysées. Le pH du sol a été mesuré dans une suspension de H₂O à 1:2,5 (p/v) (Litynski et al. 1976) en utilisant un appareil de mesure du pH / conductivité Thermo Scientifique Orion 4-Star Plus. La teneur en matière organique du sol (MO) a été déterminée en utilisant le four thermolyse pendant 4 h à 550 °C. Il est à noter que cette méthode est normalisée selon AFNOR (1996) et Saidi et al. (2008). Pour déterminer la texture du sol (sable, limon et argile), une méthode de Robinson a été utilisée (AFNOR 2003). Le type de sol a été classé à l'aide du triangle de texture du sol proposé par le Département de l'agriculture des États-Unis (USDA) (Gee et al. 2002).

Pour déterminer les concentrations de métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Pb et Zn) dans les sols échantillonnés, la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES) a été utilisée après digestion des échantillons de sol avec HNO₃ et HCl. Les solutions d'extraction des éléments de la solution digérée ont été déterminées par la méthode 3050B (USEPA 1996). Les distributions de concentration en métaux lourds ont été illustrées par le logiciel Arc GIS.

IV.5.2. Analyses statistiques

Des statistiques descriptives ont été produites pour calculer les valeurs d'écart-type, moyen, minimum, maximum des métaux lourds et les propriétés physico-chimiques (SOM, pH, texture) (Tableaux IV.2 et IV.3). De nombreux chercheurs ont utilisé des techniques statistiques pour clarifier la source des métaux lourds dans l'eau et le sol. (Yuan et al.2014; Patel et al.2018). Dans cette étude, l'analyse en composantes principales (ACP) a été incluse afin d'identifier la source de pollution des sols agricoles dans la partie nord-est de la plaine de Tadla. Avant l'application de l'ACP, la normalisation Kaiser des paramètres utilisés a été réalisée pour rendre chacun d'eux sans dimension. L'analyse de corrélation a été menée par corrélation de Pearson après normalisation des données utilisées. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées par logiciel (SPSS. 21). De plus, les cartes de distribution des teneurs individuelles en métaux lourds dans 60 échantillons de sol ont été développées (Figures. 2 à 7) en utilisant la méthode d'interpolation IDW (pondération de distance inverse) par le logiciel Arc-GIS.

IV.5.3. Évaluation du risque environnemental

Les indices de pollution sont de puissants outils et guides pour analyser, traiter et évaluer l'état de l'environnement du sol et transmettre des informations environnementales brutes aux gestionnaires, aux décideurs, aux techniciens et au public. Les indices géochimiques aident à estimer les risques écologiques et la dégradation des sols, contribuant ainsi à la protection de l'écosystème. En outre, les indices de pollution aident à déterminer si la source de contamination par les métaux est due à des processus naturels ou à des activités anthropiques. Divers indices de pollution tels que l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur d'enrichissement (EF), le facteur de contamination (FC), l'indice de charge de la pollution (PLI) et le risque écologique potentiel (RI) sont largement utilisés pour évaluer la pollution

par les métaux lourds des sols agricoles dans cette étude. Ces indices de pollution ont été calculés pour tous les échantillons recueillis, en fonction du contenu en métaux lourds, à l'aide des formules présentées ci-dessous. De plus, l'utilisation de fonds géochimiques est très importante pour évaluer la pollution des sols (Mazurek et al.2017). Les indices (Igeo, EF, CF, PLI et RI) obtenus pour la couche arable dans la partie nord-est de la plaine de Tadla ont été comparés aux autres indices calculés.

IV.5.3.1. Indice de géo-accumulation (Igeo)

Igeo est une valeur indicative utilisée pour évaluer les niveaux de contamination des métaux lourds dans les sols, qui est basée sur la comparaison de la teneur en métaux de la couche arable avec le fond géochimique des sols. L'indice est défini à l'origine par Müller (1979) est calculé à l'aide de l'équation suivante (8).

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 * B_n} \right) \quad (8)$$

Où :

- ❖ C_n est la concentration mesurée de métaux lourds dans l'échantillon de sol.
- ❖ B_n est la valeur de référence géochimique dans le sol. Dans cette étude, les compositions géochimiques de fond de la roche mère sont choisies comme valeurs de fond pour le calcul des valeurs d'Igeo.
- ❖ Le facteur 1,5 est utilisé pour minimiser les variations possibles des valeurs de fond résultant d'effets litho géniques.

Muller (1981) a identifié sept classes d'indice d'Igeo concernant le niveau de contamination, comme indiqué dans le tableau IV.1.

IV.5.3.2. Facteur d'enrichissement (EF)

EF, couramment utilisé pour évaluer le degré d'influence anthropique sur les métaux. La valeur d'EF a été calculée à l'aide de l'équation (9) comme suit (Baut-Ménard et Chesselet (1979) :

$$EF = \frac{\left(\frac{C}{Fe}\right)_{sample}}{\left(\frac{C}{Fe}\right)_{background}} \quad (9)$$

Où,

- ❖ (C / Fe) échantillon: sont les concentrations en i éléments x et Fe dans un échantillon de sol (mg / kg).
- ❖ (C / Fe) fond: concentrations en élément x et Fe dans le matériau de référence (mg / kg).

Généralement, Al, Fe, Mn, Ti et Sc sont utilisés comme élément de référence dans le calcul de EF (Amil et al. 2016; Hsu et al. 2016). Dans cette étude, le Fe a été choisi comme référence, car sa géochimie est similaire à celle de nombreux métaux traces. Les EF peuvent être classés en 5 niveaux, comme proposé par Sutherland (2000) et donnés dans le tableau IV.1.

IV.5.3.3. Facteur de contamination (CF) et l'Indice de charge de pollution (PLI)

Pour évaluer la contamination du sol, Håkanson (1980) a suggéré un facteur de contamination (CF), qui est le rapport obtenu en divisant le contenu de chaque métal dans le sol par la valeur de fond. CF est calculé en fonction de l'équation. (10).

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (10)$$

De plus, le PLI développé par Tomlinson et al. (1980) a été utilisé pour évaluer le niveau de pollution des sols étudiés par les métaux lourds. Le PLI est calculé en utilisant l'équation (11):

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (11)$$

Où : CF_n est le CF du métal n.

Les valeurs CF et PLI ont été interprétées dans différentes classes, comme présenté dans le tableau IV.1.

IV.5.3.4. Risque écologique (Ei) et indice de risque écologique (IR)

Ei et RI ont été proposés par Håkanson (1980). Ei est le facteur de risque écologique permettant d'évaluer le risque de toxicité de chaque métal lourd, à la fois dans l'eau et dans l'air, ainsi que dans le sol. Il est calculé à l'aide de l'équation. (12):

$$Ei = Ti \times CFi \quad (12)$$

Où :

- ❖ T_i est le facteur de réponse toxique des métaux pour une substance donnée; ils sont respectivement 30, 5, 5, 2 et 1 pour Cd, Cu, Pb, Cr et Zn, selon le facteur de réponse toxique normalisé proposé par Håkanson (1980).
- ❖ CF_i est le facteur de contamination du $i^{\text{ème}}$ paramètre.

Pour estimer le risque écologique potentiel (RI) des métaux lourds dans le sol, nous avons utilisé le RI initialement introduit par Hakanson (1980). RI est une méthode complète combine les concentrations et les effets écologiques, environnementaux et toxicologiques des métaux lourds. Il est calculé comme suit:

$$RI = \sum_{i=1}^n Ei \quad (13)$$

Où, E_i est un risque écologique. Håkanson (1980) a classé les indices CF, E_i et RI comme indiqué dans le tableau IV.1.

Tableau IV. 1: Classification des indices de pollution utilisés dans cette étude

Igeo		EF		CF		PLI		E_i		RI	
Igeo<0	Non pollué	EF <2	Enrichissement minimal	CF <1	Faible	PLI <1	Perfection	E _i < 40	Faible risque	RI < 150	Faible
0 ≤ Igeo < 1	Non pollué à moyennement pollué	2 ≤ EF < 5	Enrichissement modéré	1 ≤ CF < 3	Modéré	PLI = 1	Valeur de base	40 ≤ E _i < 80	Risque modéré	150 ≤ RI < 300	Modéré
1 ≤ Igeo < 2	Moyennement pollué	5 ≤ EF < 20	Enrichissement significatif	3 ≤ CF < 6	Élevé	PLI > 1	Détérioration	80 ≤ E _i < 160	Risque élevé	300 ≤ RI < 600	Élevé
2 ≤ Igeo < 3	Moyennement à fortement pollué	20 ≤ EF < 40	Très fort enrichissement	CF ≥ 6	Très élevé			160 ≤ E _i < 320	Risque très élevé	RI ≥ 600	Très élevé
3 ≤ Igeo < 4	Fortement pollué	EF ≥ 40	Enrichissement dangereux					E _i ≥ 320	Dangereux		
4 ≤ Igeo < 5	Fortement à très fortement pollué										

IV.6. Résultat et discussion

IV.6.1. Propriétés physico-chimiques

Les résultats analytiques du pH, de la MO et de la texture du sol ont été résumés dans le tableau IV.2. La valeur du pH du sol variait de 7,6 à 8,6 avec une moyenne de 8,29. Bien que le pH soit l'un des facteurs les plus importants pour déterminer l'activité des métaux dans le sol, les résultats ont montré que le pH du sol dans la zone d'étude est alcalin. Cette alcalinité du sol agricole peut réduire la rétention de métaux lourds et la mobilité dans les sols (Tian et al. 2017). Les teneurs en MOS variaient de 1,2 à 5,11%, avec une moyenne de 2,87% dans les sols échantillonnés. La texture du sol qui contrôle la vitesse à laquelle l'eau pénètre dans le sol a été principalement classée dans les échantillons étudiés comme limoneux (Figure IV.1) et se situait dans la plage suivante: 12,5 à 73,7% de sable, 8,5 à 38% de limon et 16,2 à 63,5% d'argile. Les sols limoneux ont un bon drainage et une faible rétention des métaux lourds par rapport aux sols argileux (Mandzhieva et al. 2014). La MOS est importante pour la formation des sols, la fertilité des sols, la protection de l'environnement et peut également influencer l'absorption des métaux lourds dans les sols (Chuan et al. 1996; Yin et al. 2002). Ainsi, l'ajout de matière organique permet d'immobiliser les métaux lourds du sol qui ont une grande affinité pour lui (Quenea et al.2009), mais la minéralisation ultérieure peut les remettre en solution (Cole 1978; Impellitteri et al. 2002). Donc, une immobilisation est temporaire.

Tableau IV. 2: Les résultats des paramètres physico-chimiques des sols agricoles dans différentes stations de la partie nord-est de la plaine de Tadla (n = 60)

N=60	Texture			pH	MO (%)
	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)		
Min	16.2	8.5	12.5	7.6	1.2
Max	63.5	38	73.7	8.6	5.11
Moyenne	41.26	25.04	33.32	8.29	2.87
DS	9.45	6.54	11.72	0.18	0.79

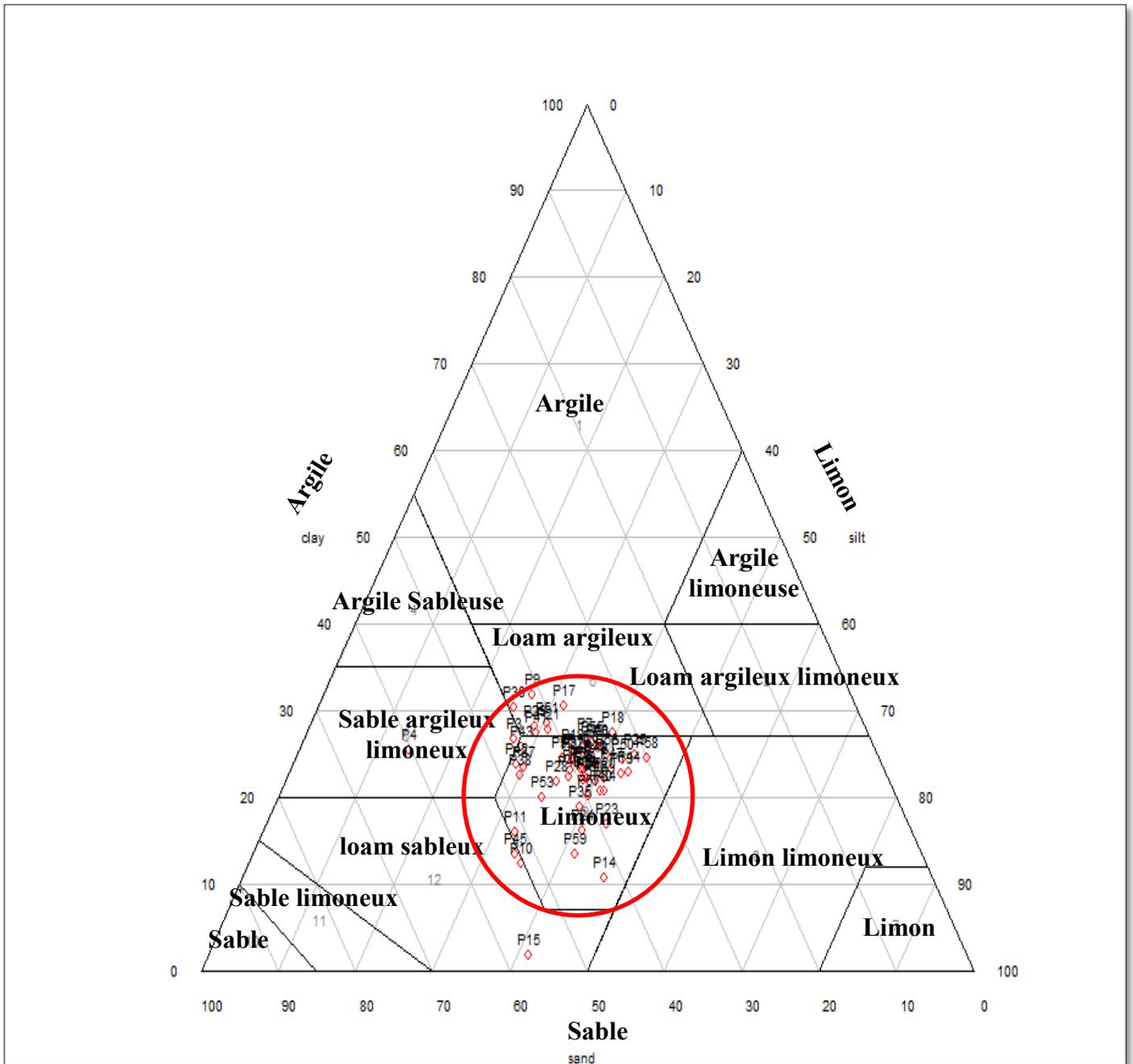


Figure IV. 1: Texture du sol des échantillons étudiés

IV.6.2. Concentrations des métaux lourds dans les sols

Les statistiques descriptives des concentrations de métaux lourds analysés (Cd, Cr, Cu, Zn, Pb et Fe) dans tous les échantillons de sol sont répertoriées dans le tableau IV.3. Les cartes de distribution spatiale des concentrations de métaux lourds dans notre zone d'étude sont illustrées dans les figures (IV.2 à IV.7). Les résultats ont indiqué que les concentrations moyennes de Cd, Cu, Cr, Pb et Zn dans les échantillons de sol étudiés étaient respectivement de 0,92, 138,10, 32,72, 31,72 et 162,11 mg / kg. Les concentrations des métaux étudiés présentaient l'ordre d'abondance suivant: Zn > Cu > Cr > Pb > Cd. Les valeurs moyennes des métaux lourds mesurés dans les sols agricoles, à l'exception du Pb, étaient supérieures à leurs valeurs de base (Tableau IV.3). On peut dire que cette augmentation des valeurs des éléments métalliques est probablement associée à des sources anthropiques par l'utilisation des pesticides, du fumier de volaille et d'engrais dans notre région, ce qui provoque l'introduction de ces métaux lourds et leurs composés dans le sol.

Les résultats obtenus sont comparés aux normes mondiales relatives aux métaux lourds dans la croûte terrestre et à certains sols agricoles locaux et régionaux afin de bien évaluer la pollution par les métaux lourds. Selon Barakat et al. (2019c), nous constatons que les valeurs moyennes de Cd et de Cr étaient supérieures aux valeurs de notre zone d'étude, que les valeurs moyennes de Cu, Pb et Zn sont inférieures à nos valeurs obtenues. Autres, concernant l'évaluation de la pollution métallique dans les sols agricoles par Oumenskou et al. (2018), nous notons que les valeurs de Zn, Cd et Pb sont supérieures à celles de nos sols étudiés. À l'exception du Cr, les autres métaux présentent des teneurs plus élevées que la moyenne de la croûte terrestre et les valeurs du sol mondial. D'après la comparaison des résultats avec les valeurs mondiales on a trouvé que les concentrations moyennes de Cd, Cr, Cu, Zn et Pb des échantillons de sol sont supérieures aux normes de l'Organisation mondiale de la santé (WHO) et de la limite d'origine pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Comme le montre le tableau IV.3, les concentrations de métaux lourds dans la zone d'étude étaient inférieures aux recommandations de la qualité au Canada pour les sols agricoles, à l'exception du Cu.

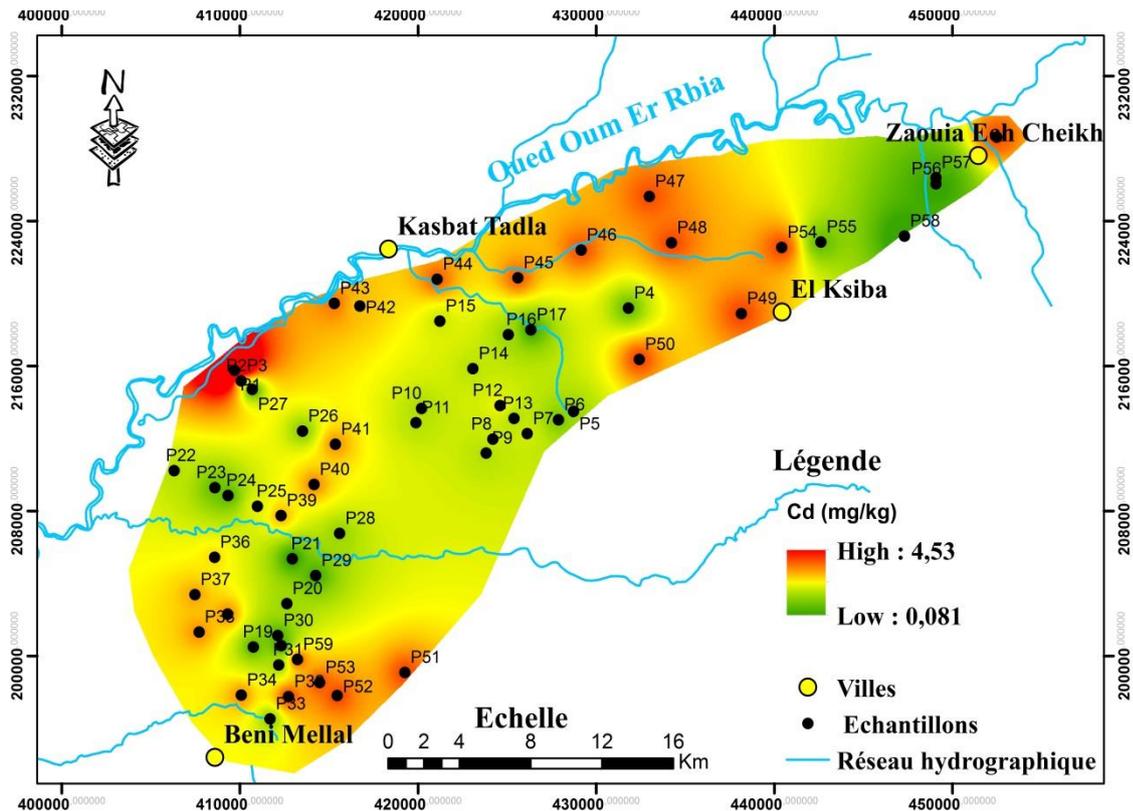


Figure IV. 2: Carte de répartition spatiale du Cadmium dans les sols agricoles de notre zone d'étude

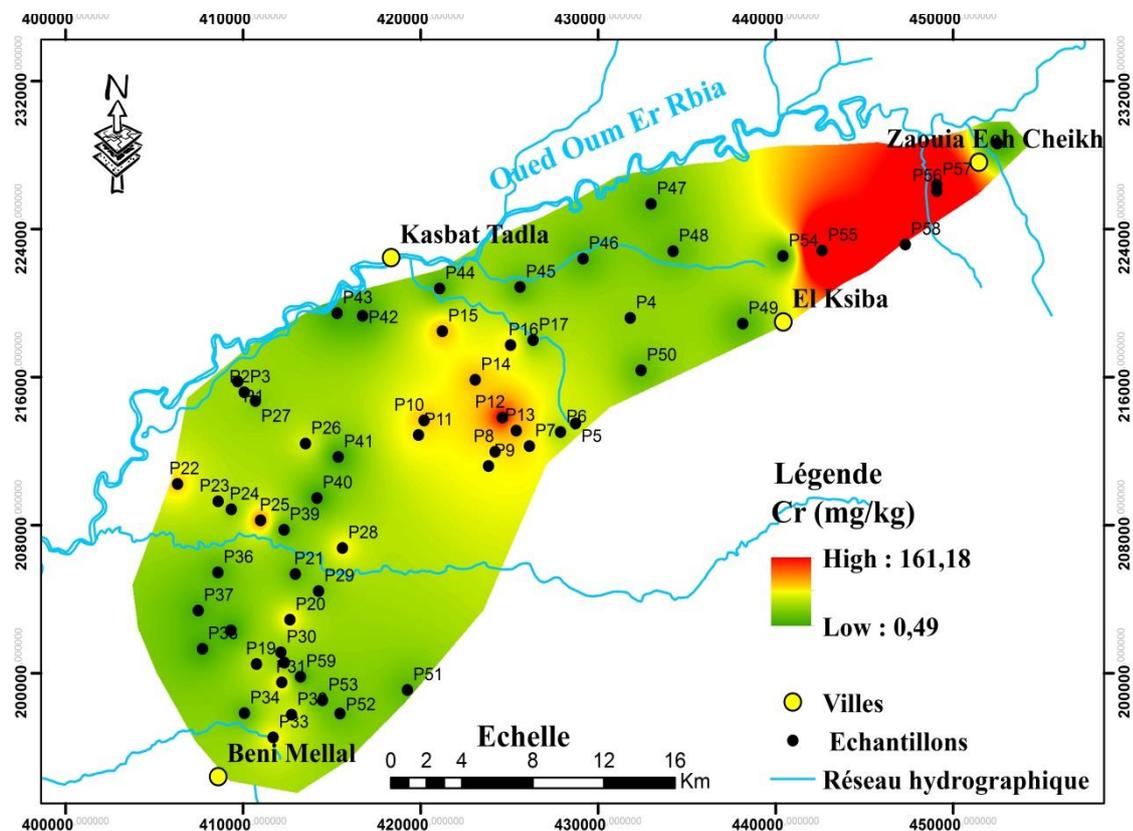


Figure IV. 3: Carte de répartition spatiale du Chrome dans les sols agricoles de notre zone d'étude

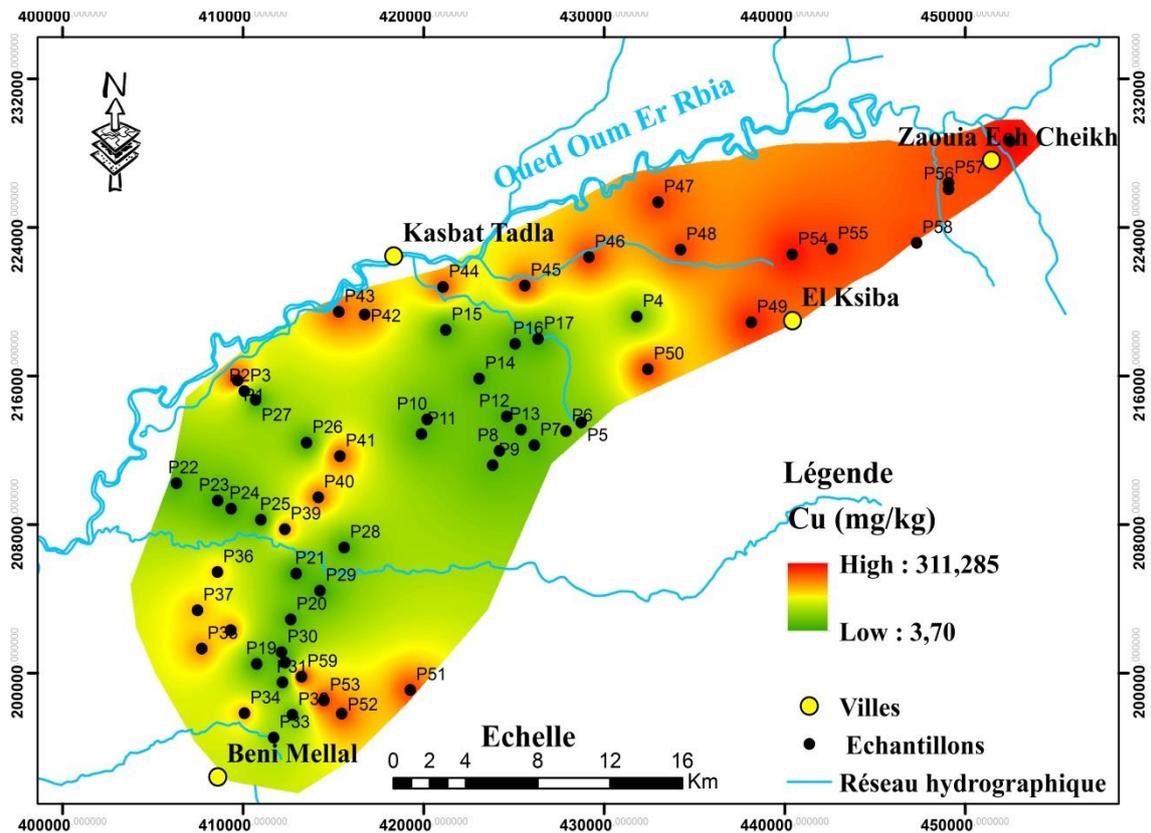


Figure IV. 4: Carte de répartition spatiale du Cuivre dans les sols agricoles de notre zone d'étude

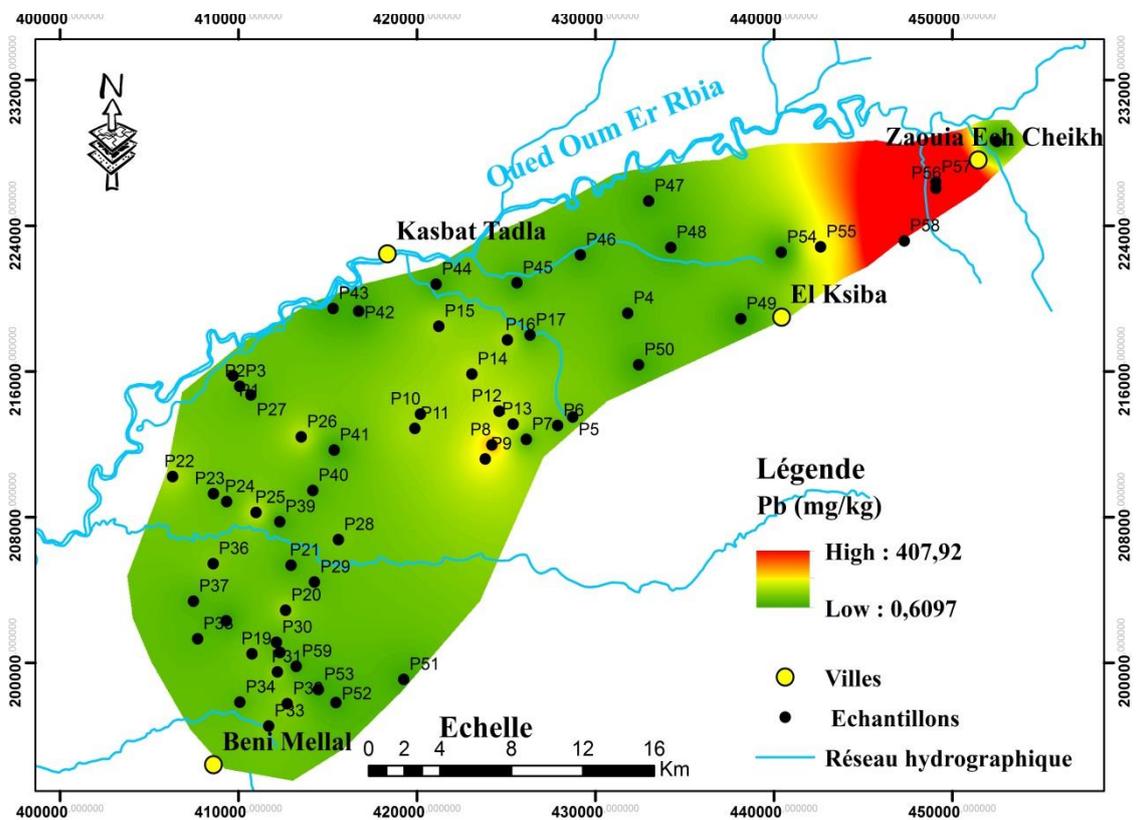


Figure IV. 5: Carte de répartition spatiale du Plomb dans les sols agricoles de notre zone d'étude

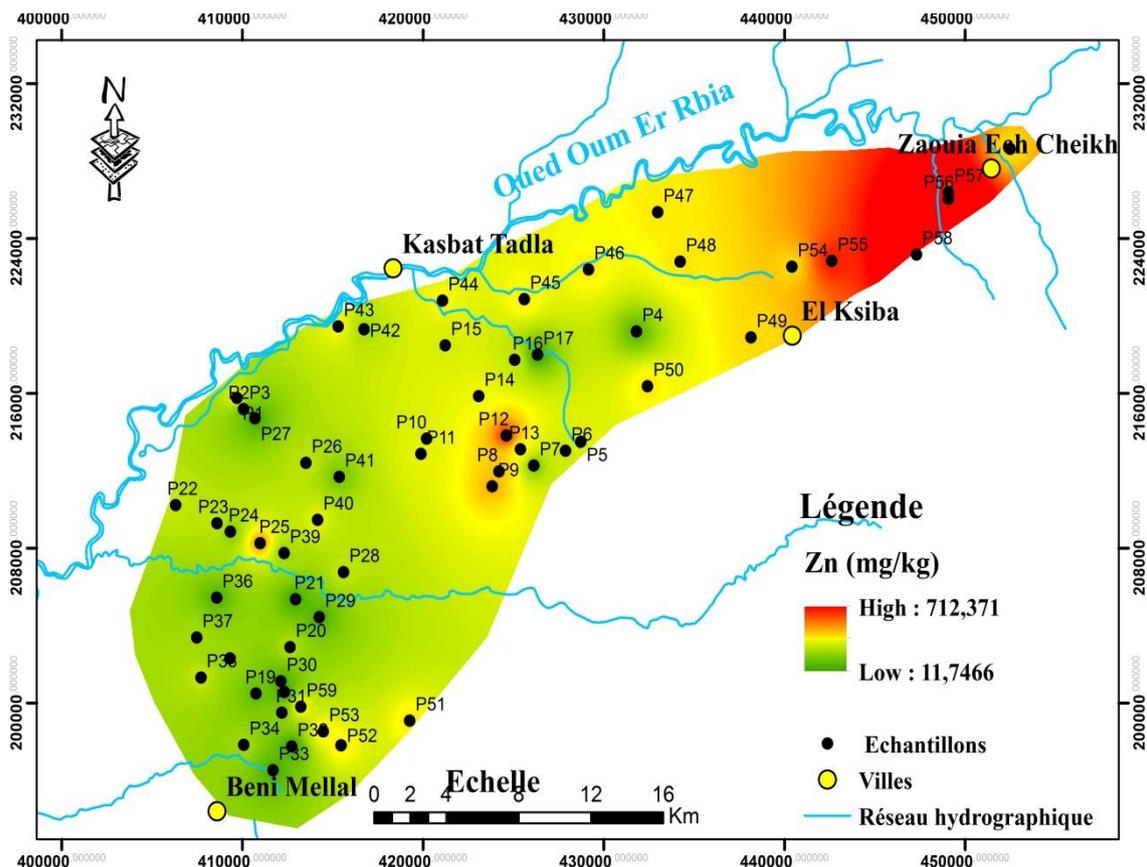


Figure IV. 6: Carte de répartition spatiale du Zinc dans les sols agricoles de notre zone d'étude

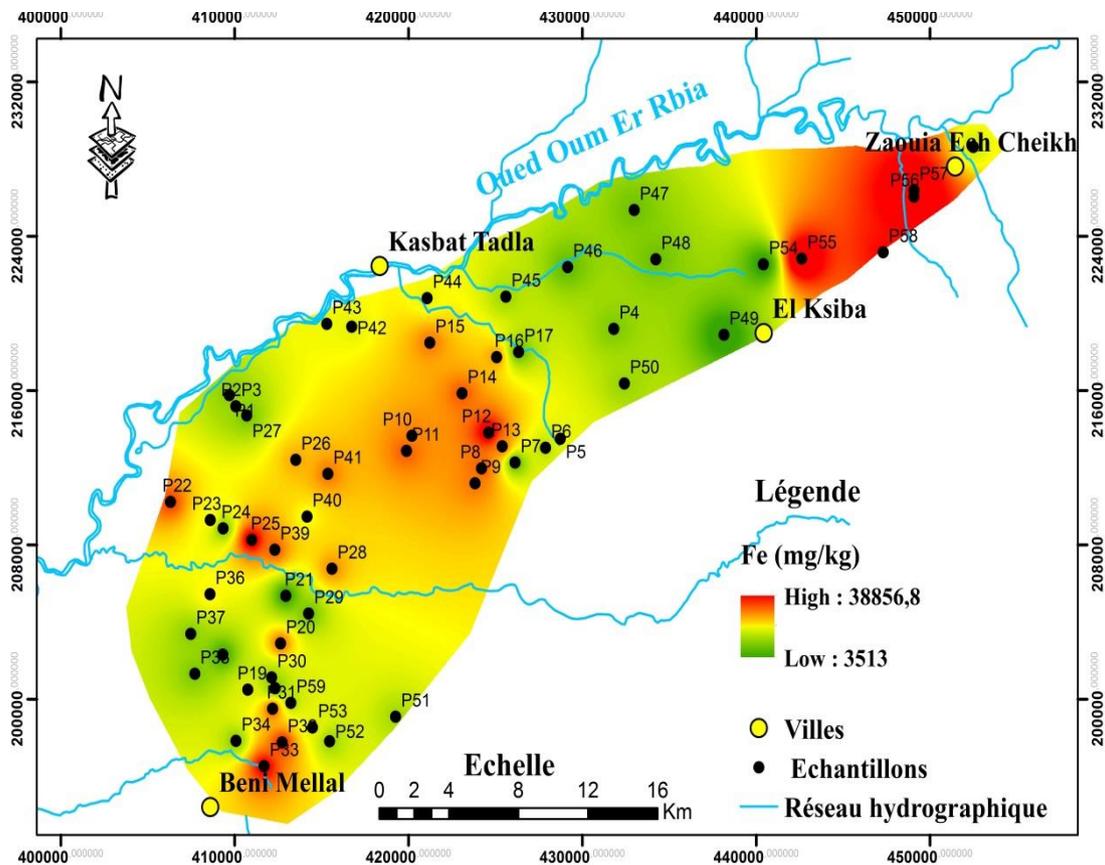


Figure IV. 7: Carte de répartition spatiale du Fer dans les sols agricoles de notre zone d'étude

Tableau IV. 3: Description statistique des concentrations de métaux lourds (mg / kg) dans les échantillons de sol (n = 60) et comparaison de la norme existante

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe
Min	0.08	0.48	3.68	0.60	11.67	3512.00
Max	4.53	161.20	311.30	408.20	712.80	38860.00
Moyenne	0.92	32.72	138.10	31.72	162.11	19249.27
Déviation standard	0.64	32.94	118.32	60.82	119.12	9190.44
Recommandations canadiennes pour la qualité des sols^e	1.4	64	63	70	200	–
Sol de la terre^f	0.11	–	26	29	60	32000
Croûte terrestre^f	0.6		50	14	75	41000
WHO	0.3	–	4	20	50	472000
FAO	0.01	–	0.2	5	2.0	–
Valeurs de fond^a	0.85	25.21	31.40	32.54	43.76	12141.44

^a (Oumenskou et al. 2018)

^eCanadian soil quality guidelines for the Protection of Environment and Human Health, 2007

^f (Mohammadi et al. 2018)

WHO:World Health Organization

FAO:Food and Agriculture Organization (United Nations)

IV.6.3. Analyses statistiques

La matrice de corrélation de Pearson de divers paramètres de sol a été appliquée à 60 échantillons de sol après normalisation des données par le test de Kaiser pour déterminer les corrélations entre les paramètres (tableau 4). La teneur en sable des échantillons de sol étudiés a montré une corrélation négative avec la teneur en argile et en limon. Une corrélation positive a également été observée entre le SOM et l'argile. Le limon a montré une corrélation

négative avec le sable et positive avec le SOM. Comme le montre le tableau 4, les métaux Cu, Zn, Pb sont positivement corrélés, suggérant qu'ils ont des sources communes, mais Cd et Cr sont négativement corrélés. De plus, la variation observée des corrélations métalliques devrait également être associée à la roche mère et à d'autres facteurs tels que les processus d'altération, les phénomènes d'adsorption et la nature de l'environnement de dépôt (Çevik et al. 2008).

Tableau IV. 4: Analyse de corrélation de Pearson des propriétés des sols agricoles du nord-est de la plaine de Tadla (N = 60)

	Argile	Limon	Sable	pH H2O	MO	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Argile	1,00									
Limon	0,16	1,00								
Sable	-0,78	-0,44	1,00							
pH H2O	-0,22	0,08	0,16	1,00						
MO	0,34	0,27	-0,36	-0,31	1,00					
Cd	-0,11	0,00	0,10	0,06	-0,05	1,00				
Cr	0,10	0,20	-0,10	0,03	0,10	-0,53	1,00			
Cu	-0,12	0,03	0,00	0,00	0,16	0,63	-0,49	1,00		
Pb	0,14	0,22	-0,16	0,24	-0,03	-0,53	0,83	-0,40	1,00	
Zn	0,20	0,07	-0,19	0,06	0,10	0,24	0,12	0,51	0,15	1,00

p>0.5

L'ACP a été utilisé sur les résultats analytiques d'échantillons de sol (sable, limon, argile, pH, SOM, Cd, Cr, Cu, Pb et Zn) pour identifier les sources de pollution de ces éléments dans la zone d'étude (Figure IV.8). Les principaux composants (PC) extraits avec des scores élevés > 0,75 (indiqués en gras) et des valeurs de charge modérées entre 0,5 et 0,75 (en gras et italiques) ont été considérés comme statistiquement significatifs et ont donc été pris pour interprétation par l'ACP. La méthode de rotation varimax a été utilisée pour extraire trois composantes principales (PC), qui expliquent 66,87% de la variance globale des paramètres

analysés (tableau 5). La première composante (PC1) explique 27,3% de la variance globale qui indique une forte charge positive sur (Pb, Cr) et une corrélation négative avec (Cd, Cu).

De nombreuses études dans le sol ont confirmé que la présence de Cr est contrôlée par les matériaux d'origine, tandis que le Cd et le Pb sont souvent associés à des activités anthropiques (Franco-Uria et al. 2009). PC2 représente 23,19% de la variance globale qui montre une corrélation positive avec (argile, SOM) et une forte corrélation négative avec le sable. Enfin, PC3 est responsable de 16,37% de la variance globale et des scores positifs sur (Cu, Zn), qui pourraient être dus à des sources anthropiques. Toutes ces analyses indiquent que les distributions de Cd, Pb, Cu et Zn dans les sols extraits en PC1 et PC3 sont possiblement contrôlées par les activités anthropiques.

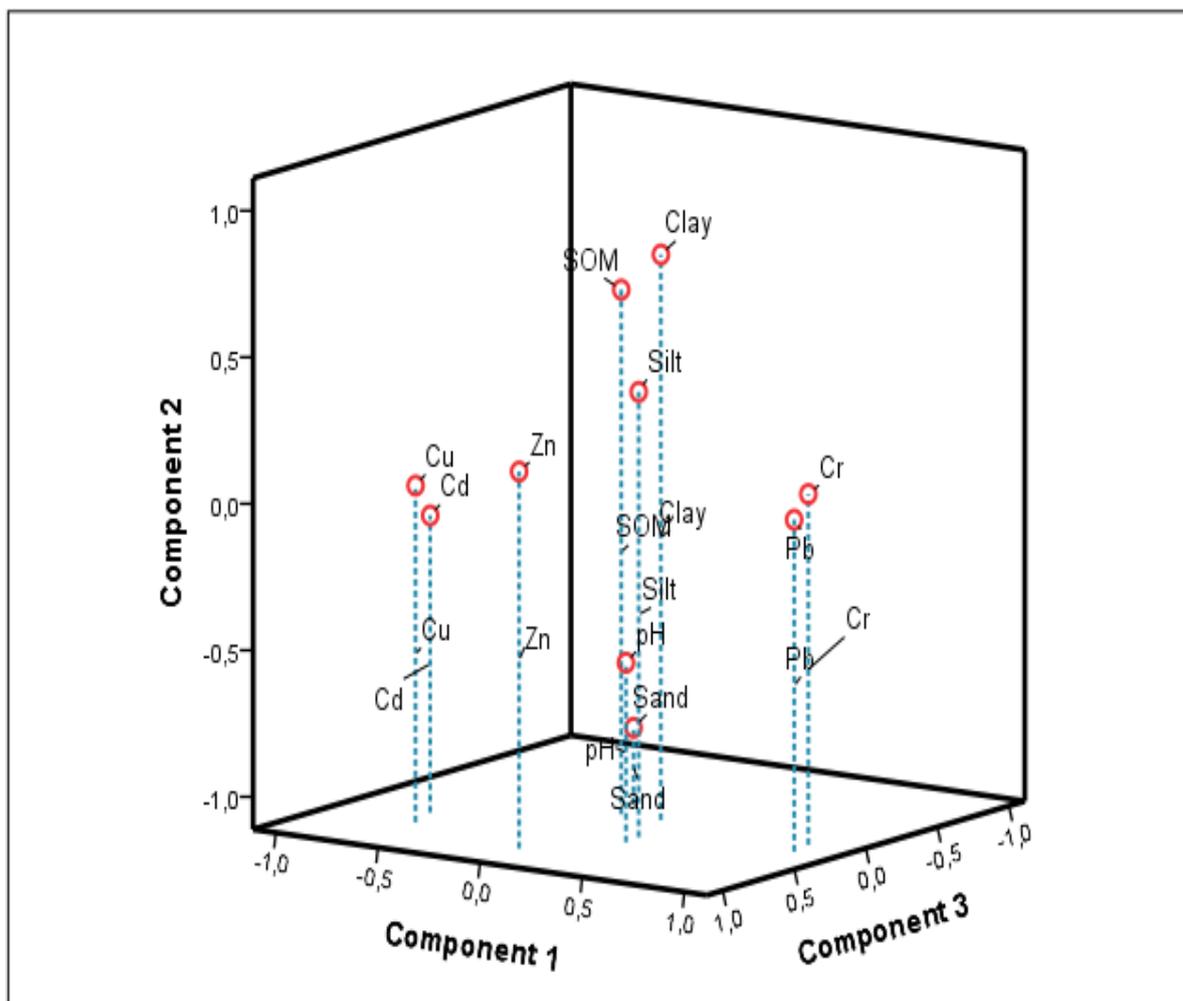


Figure IV. 6: ACP des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds dans les échantillons de sol de la région nord-est de la plaine de Tadla

Tableau IV. 5: Matrice de composants après rotation Varimax avec normalisation de Kaiser

Variables	PC1	PC2	PC3
Cr mg/kg	0,884	0,086	0,079
Pb mg/kg	0,915	0,021	0,221
Cd mg/kg	-0,718	-0,098	0,435
Cu mg/kg	-0,657	0,038	0,625
Sable %	-0,139	-0,850	-0,161
Argile %	0,124	0,819	0,025
SOM %	-0,071	0,679	0,023
pH	0,257	-0,498	0,457
Limon %	0,242	0,409	0,348
Zn mg/kg	-0,024	0,176	0,804
% de variance	27 ,309	23,190	16,378
% Cumulé de variance	27,309	50,499	66,877

PC : Composante principal

IV.6.4. Évaluation de la contamination par les métaux dans les sols de surface

Les valeurs Igeo pour chaque élément des échantillons de sol sont répertoriées dans le tableau IV.6 et figure IV.9. Les valeurs moyennes Igeo étaient respectivement de -0,79, -1,06, 0,62, -1,97 et 0,90 pour Cd, Cr, Cu, Pb et Zn. Les valeurs moyennes Igeo de Cd, Cr, Pb sont inférieures à 0 ($I_{geo} < 0$), ce qui indique que les sols analysés ne sont pas contaminés par ces éléments. Dans le même temps, les échantillons de sol ont montré des valeurs d'Igeo positives ($0 \leq I_{geo} < 1$) pour le Cu et le Zn, suggérant qu'elles sont non contaminées à modérément contaminées (Tableau IV.1).

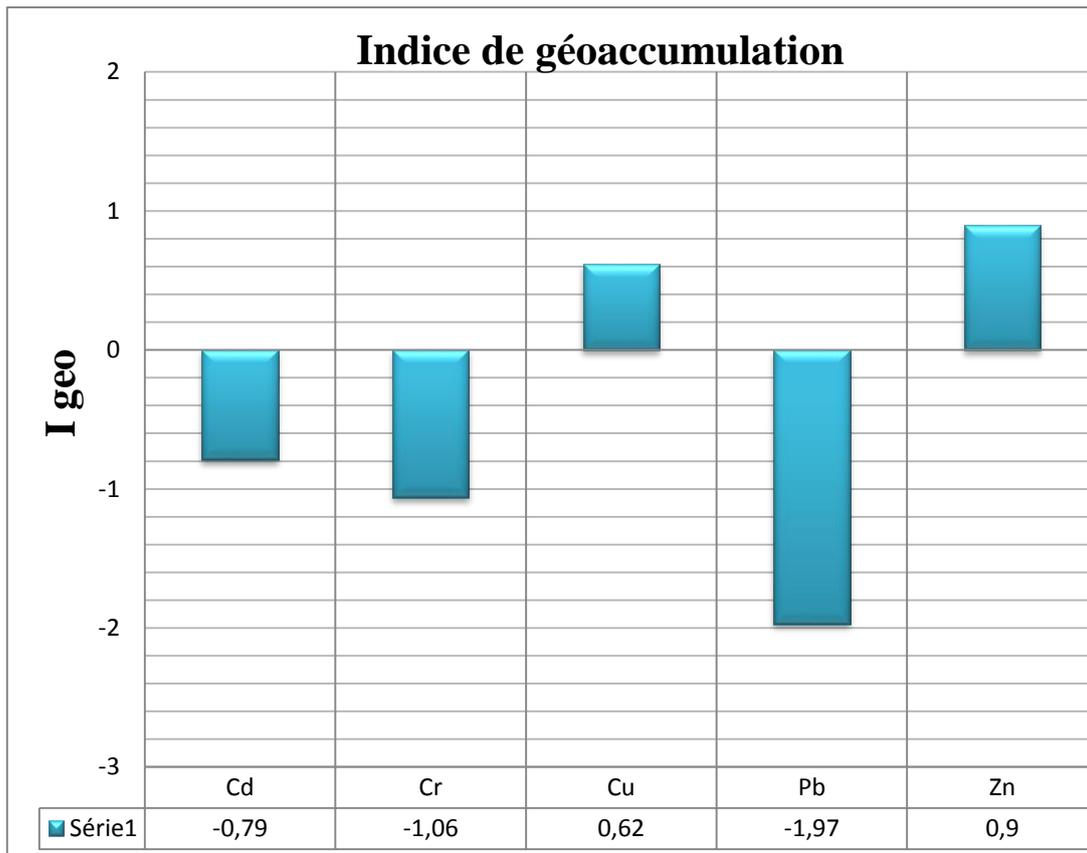


Figure IV. 7: Variation de l'indice de géo-accumulation pour les métaux lourds dans la zone d'étude

Les valeurs moyennes du facteur EF de Cd, Cr, Cu, Pb et Zn sont respectivement de l'ordre de 0,98, 0,75, 4,14, 0,48 et 2,79 (Tableau IV.6 et Figure IV.10). Cd, Cr et Pb ayant des valeurs EF < 2 semblent connaître un enrichissement minimal dans les sols étudiés. Les valeurs moyennes de EF des éléments Cu et Zn variant entre 2 et 5, indiquent une pollution modérée en ces éléments des échantillons de sol. Ces résultats suggèrent que les métaux Cd, Cr et Pb proviennent des matériaux parentaux du sol, bien que les éléments Cu et Zn puissent être fournis en partie par une contribution anthropique ce qui est confirmé par les résultats de corrélations des paramètres et les résultats de l'ACP. Les échantillons de sol avec EF > 1,5 indiquaient une forte influence humaine (Rashed 2010; Zhang et al., 2002). En conséquence, les résultats de EF ont confirmé que les sols étudiés sont moyennement pollués par Cu et Zn et faiblement pollués par Cd, Cr et Pb.

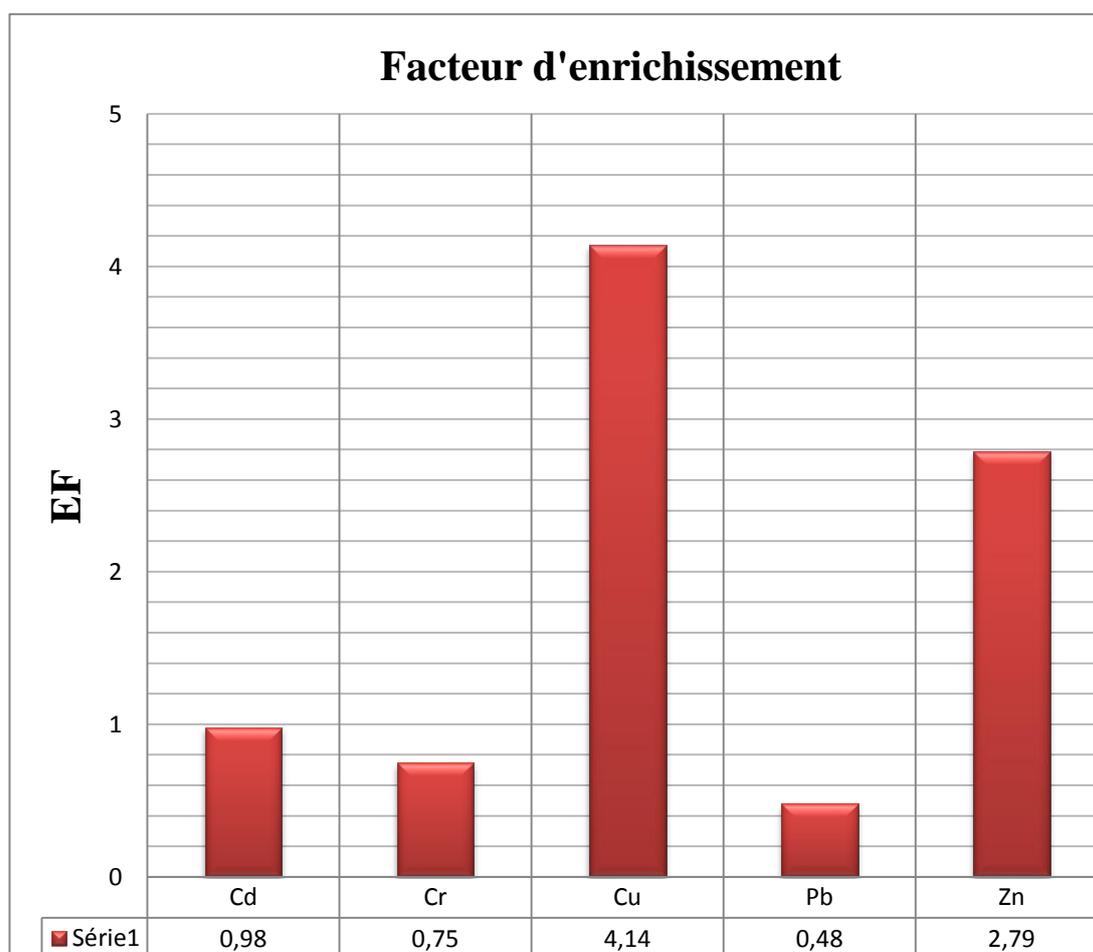


Figure IV. 8: Variation de facteur d'enrichissement pour les métaux lourds dans la zone d'étude

Les valeurs du CF calculées pour les métaux analysés dans l'ensemble des échantillons sont présentées dans le tableau IV.6 et figure IV.11. Les valeurs moyennes de CF pour les éléments Cd, Cr, Cu, Pb et Zn sont, respectivement, de l'ordre de 1,08, 1,30, 4,40, 0,97 et 3,70. Les éléments Cd, Cr montrent des valeurs moyennes de $CF > 1$, indiquant ainsi une contamination modérée des sols étudiés. Le Pb présente des valeurs $CF < 1$, ce qui indiquerait une faible contamination des sols étudiés. Cependant, les valeurs moyennes de CF pour Cu et Zn varient entre 3 et 6, suggérant une contamination élevée due probablement à l'utilisation excessive des des fertilisants chimiques.

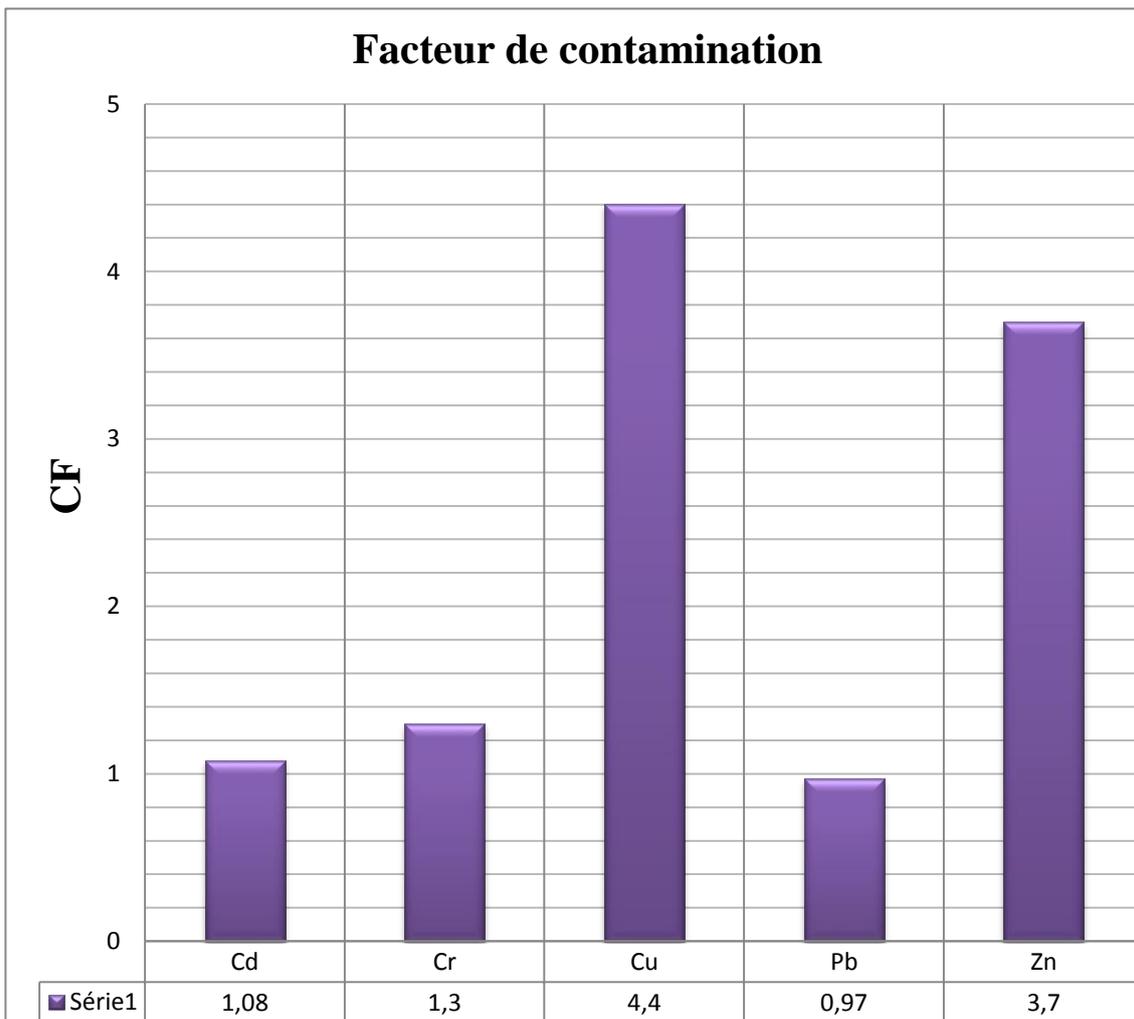


Figure IV. 9: Variation de facteur de contamination pour les métaux lourds dans la zone d'étude

Le degré de contamination par les cinq métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Pb et Zn) dans la zone d'étude est évaluée par la calcul de l'indice PLI (Tableau IV.6). Les valeurs de PLI calculées oscillent entre 0,25 et 3,76 avec 36,66% des échantillons de sol ont un PLI < 1, arguant leur non-contamination métallique, et 63,33% des échantillons présentent un PLI > 1 attestant leur contamination par les métaux lourds (Figure IV.12).

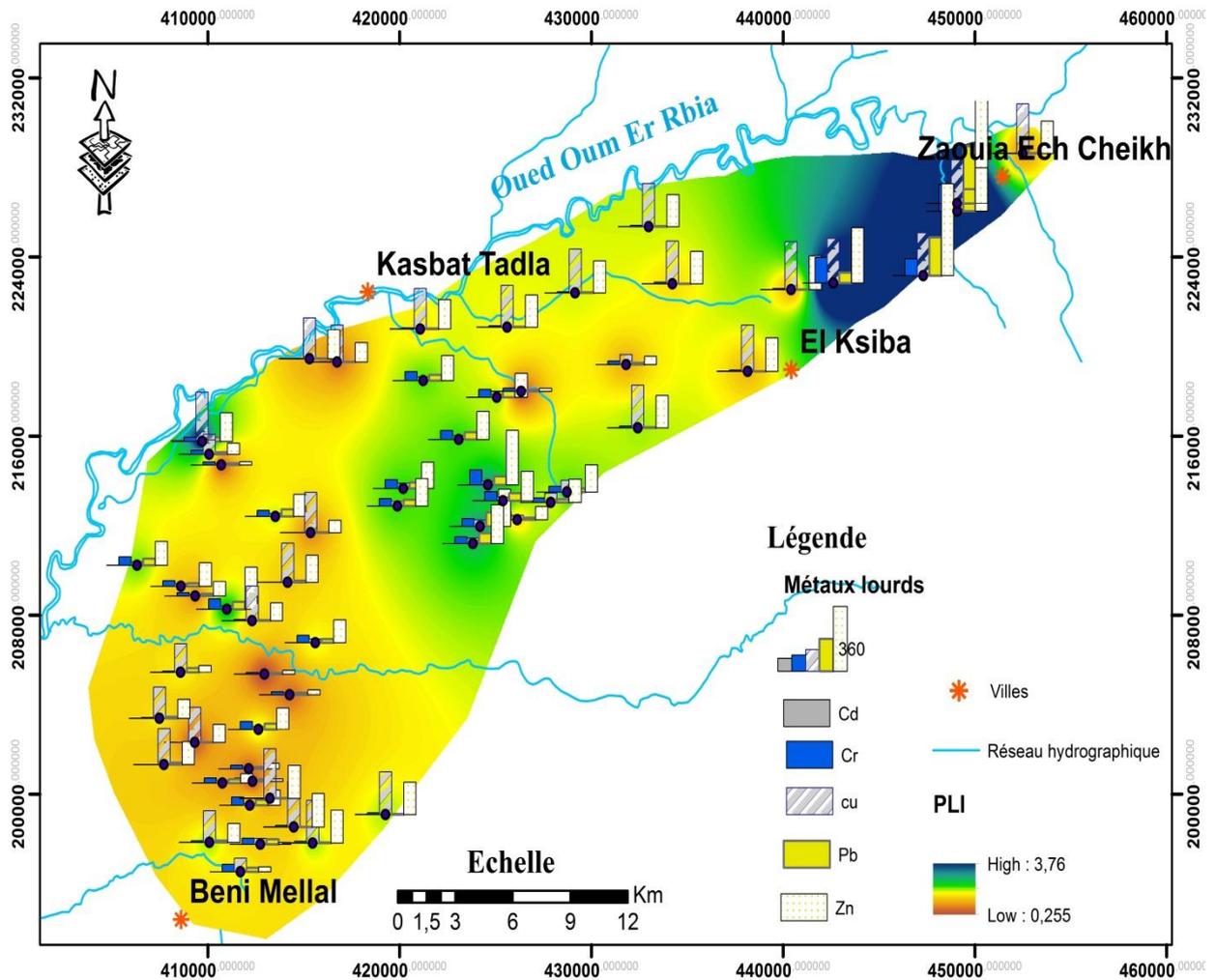


Figure IV. 10: Répartition de PLI et les teneurs en métaux lourds

IV.6.5. Évaluation des risques écologiques de la contamination métallique

L'indice RI a été utilisé pour montrer la sensibilité de nombreuses communautés biologiques aux métaux toxiques (Islam et al., 2015; Maanan et al. 2015). Dans la présente étude, les valeurs E_i et RI calculées sont présentés dans le tableau IV.5. Les valeurs moyennes E_i obtenues sont de l'ordre de 32,52, 2,60, 21,99, 4,87, et 3,70 pour les éléments Cd, Cr, Cu, Pb et Zn, respectivement. Les valeurs moyennes de E_i sont classées comme suit: Cd > Cu > Pb > Zn > Cr. Ces valeurs de E_i < 40 indiqueraient que tous les échantillons présentent un faible risque écologique. Les valeurs de RI sont calculées en additionnant le risque écologique (E_i) pour chaque échantillon de sol. Les valeurs de RI tirées de l'échantillonnage de sol allaient de 8,76 à 219,04 avec une valeur moyenne de 65,68 (Tableau IV.6), indiquant une faible intensité du risque écologique potentiel (Figure IV.13). Par comparaison à d'autres sols

agricoles de la région (Barakat et al. 2019c), les valeurs de RI de la présente étude ont été trouvées plus faibles. Le sol agricole périurbain de la ville de Béni-Mellal au Maroc présente un risque écologique considérable avec des valeurs de RI comprises entre 184,49 et 292,46 (Barakat et al. 2019c). La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation semble augmenter les risques écologiques. D'après Barakat et al. (2017, 2019a), l'urbanisation rapide et l'intensification de l'agriculture ont affecté de manière significative les terres fertiles et exercé des effets environnementaux.

La plaine de Tadla a connu un développement industriel rapide et une intensification de l'agriculture, qui présentaient des risques environnementaux élevés. De plus, Oumenskou et al. (2018) ont rapporté que les activités agricoles ont encore accru l'apport de pollution par les métaux dans les sols agricoles. Ces sols contaminés contenant des métaux et des éléments nutritifs ont entraîné la pollution des eaux de surface (Barakat et al., 2016) et des eaux souterraines (Barakat et al., 2018, 2019d).

Tableau IV. 6: Résultats de Igeo, EF, CF, Ei, PLI et RI pour les métaux lourds dans les échantillons de sols

	Metal	Min	Max	Moyenne	DS
Igeo	Cd	-4	1,83	-0,79	1,05
	Cr	-6,3	2,09	-1,06	1,84
	Cu	-3,68	2,72	0,62	1,92
	Pb	-6,34	3,06	-1,97	2,11
	Zn	-2,49	3,44	0,9	1,22
EF	Cd	0,03	5,82	0,98	1,13
	Cr	0,03	2,47	0,75	0,49
	Cu	0,14	32	4,14	5,72
	Pb	0,01	4,06	0,48	0,62
	Zn	0,1	16,6	2,79	2,65
CF	Cd	0,09	5,32	1,08	0,75
	Cr	0,02	6,39	1,3	1,31
	Cu	0,12	9,91	4,4	3,77
	Pb	0,02	12,55	0,97	1,87
	Zn	0,27	16,29	3,7	2,72
Ei	Cd	2,81	159,7	32,52	22,59
	Cr	0,04	12,79	2,6	2,61
	Cu	0,59	49,57	21,99	18,84

	Metal	Min	Max	Moyenne	DS
	Pb	0,09	62,73	4,87	9,35
	Zn	0,27	16,29	3,7	2,72
PLI		0,25	3,76	1,25	0,72
RI		8,76	219,04	65,68	37,28

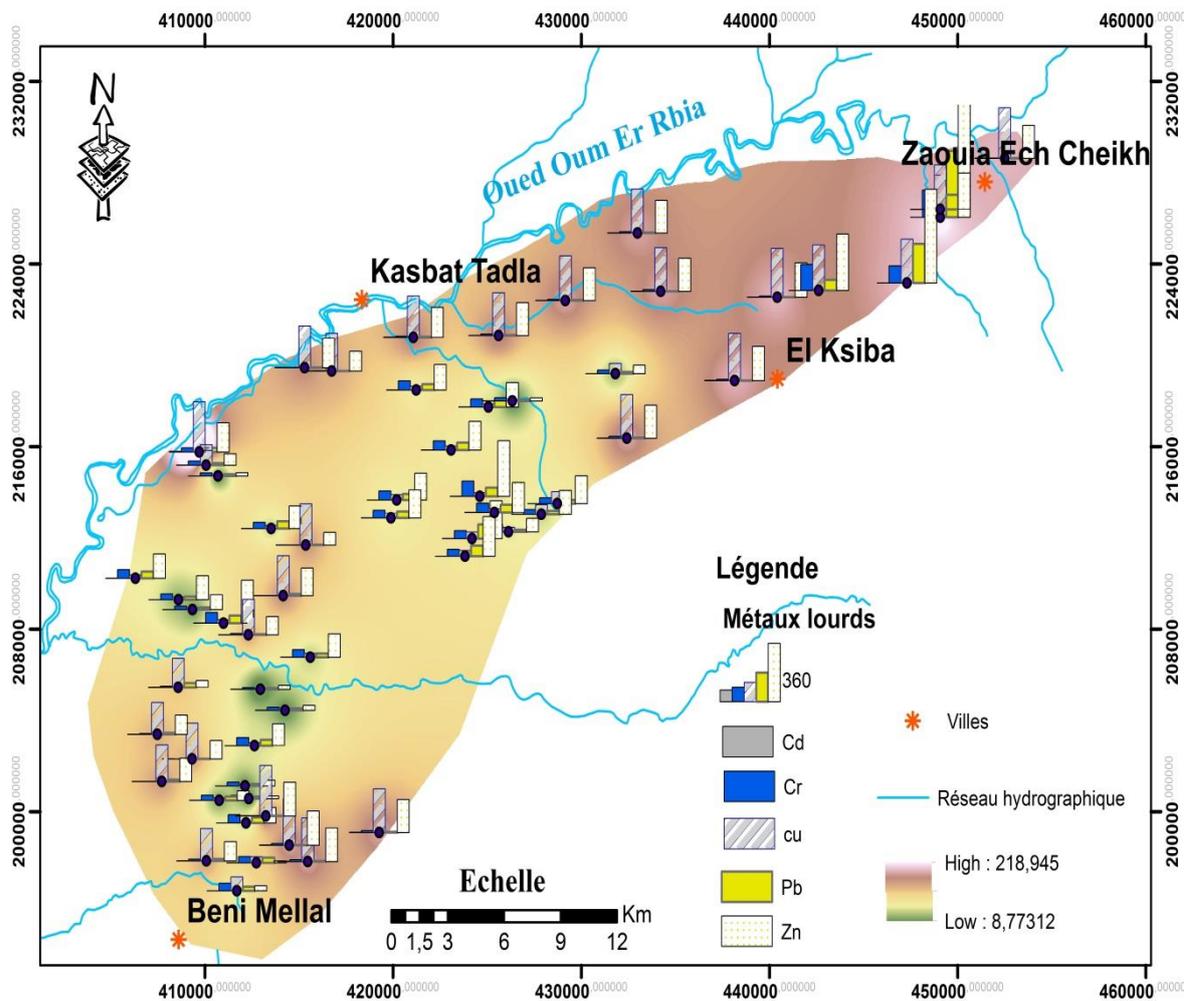


Figure IV. 11: Répartition du risque écologique et le contenu en métaux lourds

IV.7. Conclusion

La contamination des sols agricoles par des éléments lourds est devenue un grave problème environnemental et une menace potentielle pour la production agricole dans le monde entier. La présente étude visait à évaluer les variations spatiales, la contamination potentielle et le risque écologique de cinq métaux lourds dans les sols agricoles du nord-est de la plaine de Tadla en utilisant diverses méthodes d'indexation environnementale (Igeo, EF, CF, PLI et RI). Les concentrations de Cd, Cr, Cu, Pb et Zn étaient supérieures aux recommandations nationales canadiennes et aux normes de l'WHO et de la FAO.

Les indices de pollution de l'évaluation ont indiqué que notre zone d'étude est moyennement à fortement polluée dans le cas de (Zn, Cu) et partiellement influencée par des activités anthropiques. Les valeurs RI ont montré que les métaux lourds présentent un faible risque écologique. Cependant, l'écotoxicité potentielle du Cu et du Zn peut être liée aux engrais appliqués à l'agriculture.

Enfin, cette étude a suggéré que l'utilisation de l'indexation géochimique pourrait constituer une approche plus pertinente pour évaluer le niveau de contamination par les métaux lourds dans différentes régions. Il a également fourni des informations plus importantes pour le développement de la gestion environnementale des sols et la prévention de la pollution par les métaux dans la plaine de Tadla.

Conclusion générale

ET

Perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le maintien de la qualité des sols a été considéré comme un élément clé de la durabilité de l'agriculture et un objectif de la plupart des agriculteurs, des environnementalistes et des décideurs gouvernementaux. De cette manière, la qualité des sols est devenue un outil d'évaluation de la durabilité des systèmes de gestion des sols. Dans ce travail, nous sommes limités à l'étude des relations entre la structuration physique du milieu et la structuration des propriétés physico-chimiques du sol. Au-delà des recherches relatives aux indicateurs, nous développons un axe de recherche comparatif entre chaque propriété des sols, focalisé sur l'identification et l'évaluation de qualité des sols dégradés par différentes activités anthropiques et localisées dans différents contextes. Les résultats ont démontré l'utilité de la méthode multicritères AHP en tant qu'approche d'évaluation de la qualité des sols et de l'aptitude des sols à l'agriculture intensive.

L'approche AHP a été appliquée pour estimer les poids de l'indicateur et des sous-indicateurs en tenant compte de leurs influences dans la sélection des terres appropriées pour l'agriculture intensive. Les résultats indiquent que 16,83% ont une excellente aptitude, 61,08% une bonne, 20,97% une moyenne, et 1,12% de la zone d'étude est peu adaptée à une agriculture intensive durable. La synergie entre les méthodes multicritères, SIG et les analyses physico-chimiques est une technique puissante pour établir une des cartes de qualité des sols des grands territoires et avec une distribution spatiale très fine, la chose qui n'était pas possible en utilisant les méthodes traditionnelles de suivi des sols.

En outre, l'évaluation de la fertilité des sols de la région par les méthodes statistiques, nécessite la création d'une base de données constituée essentiellement par les caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol représentatifs. Ces paramètres physico-chimiques a permis de déterminer un ensemble de variables pédologiques utilisées comme indicateurs du niveau de fertilité des sols. L'analyse des variables sélectionnées a montré que les valeurs obtenues des sols échantillonnés sont supérieures aux seuils suggérés en agronomie sauf le phosphore, on peut conclure que la fertilité des sols dans la zone d'étude est de bonne qualité.

En plus, la contamination des sols agricoles par des éléments lourds est devenue un grave problème environnemental et une menace potentielle pour la production agricole dans le monde entier. La présente étude visait à évaluer les variations spatiales, la contamination potentielle et le risque écologique de cinq métaux lourds dans les sols agricoles du nord-est de la plaine de Tadla en utilisant diverses méthodes d'indexation environnementale. En effet, les

indices de pollution de l'évaluation ont indiqué que notre zone d'étude est moyennement à fortement polluée dans le cas de (Zn, Cu) et partiellement influencée par des activités anthropiques, et les valeurs RI ont montré que les métaux lourds présentent un faible risque écologique. Cette étude a suggéré que l'utilisation de l'indexation géochimique pourrait constituer une approche plus pertinente pour évaluer le niveau de contamination par les métaux lourds dans différentes régions. Il a également fourni des informations plus importantes pour le développement de la gestion environnementale des sols et la prévention de la pollution par les métaux dans la plaine de Tadla.

En perspectives :

- ❖ En analysant certaines propriétés physiques et microbiologiques dans une expérience de terrain réaliste avec système d'irrigation ou agriculture biologique, il est possible de montrer de nouvelles perspectives aux producteurs et d'accorder une plus grande attention à certains faits importants sur le sol qui avaient été négligés auparavant. À cette fin, davantage de formations pédagogiques sur les conséquences des pratiques agricoles sur l'environnement devraient être organisées.
- ❖ L'accent doit être mis sur la qualité des matériaux utilisés dans les pratiques agricoles et en contact direct avec le sol. Peu importe que l'on utilise de l'eau d'irrigation ou des engrais organiques; nous devons être attentifs à certains paramètres chimiques ou microbiologiques en fonction de la politique de pollution de l'environnement ou de la sécurité de la santé humaine. Pour cette raison, une surveillance de l'eau d'irrigation et des analyses préliminaires des engrais organiques sont nécessaires, mais les paramètres de base du sol, qui sont les principaux facteurs militants de l'activité microbienne du sol (pH, MOS...), devraient être améliorés, en particulier dans l'agriculture biologique.
- ❖ Pour une meilleure estimation du sol, nous devons améliorer les équipements et élargir les groupes scientifiques en fonction des travaux dans ce domaine. Il serait utile de réaliser au moins une grande expérience sans facteurs perturbateurs (comme une pente), où l'effet de l'irrigation/de l'agriculture biologique peut être étudié pendant une période plus longue.
- ❖ Selon la santé des sols, certaines relations entre eau polluée ou engrais organique infecté,
- ❖ sols et rendement (fruits) seront les bienvenues pour comprendre et déterminer le transport de certains agents pathogènes.

Selon la perspective précédente, un travail énorme et intéressant dans le futur nous attend.

Références

Bibliographiques

Références

- ABHOER – Agencedu Bassin Hydraulique Oum Er Rbia, (2016). Abu-Qudais M. & Abu-Qdais H.A. 2000. Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization; *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 983 – 991.
- Agence du bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia (PDAIRE-OER) (2008). Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau (PDAIRE) de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia. Maroc.
- Aghzar, N., Berdai, H., Bellouti, A., & Soudi, B. (2002). Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 15(2), 459-492.
- Acosta, J.A, Gabarron, M, Faz, A, Martínez-Martínez, S, Zornoza, R, Arocena, J.M, (2015). Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas. *Chemosphere* 134, 28-337.
- Aderonke, D.O and Gbadegesin G.A (2013). Spatial variability in soil properties of a continuously cultivated land; *Afr.J. Agric. Res.* 8475–483.
- AFNOR (1996) *Qualité des sols. Recueil de normes Françaises AFNOR Paris France* p 533.
- AFNOR, N. (1996). X31-130, 1993. Détermination de la capacité d'échange cationique et des cations extractibles. *Qualité des sols*, 103-106.
- AFNOR. (2003). Norme Française NF X31-107. Qualité du sol- Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol- Méthode à la pipette.
- Agbenin, J.O, Tiessen, H. (1995) - Soil properties and their variations on two contiguous hill slopes in Northeast Brazil. - *Catena*, 24, 147-161.
- Aghzar, N., Berdai, H., Bellouti, A., & Soudi, B. (2002). Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 15(2), 459-492.
- Albiach, R, Canet, R, Pomares, F. and Ingelmo, F. (2000) - Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. - *Bioresource Technology*, 75, 43-48.
- Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F. (2001) - Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendment to a horticultural soil. - *Bioresource Technology*, 76, 125-129.
- Alghamdi BA, El Mannoubi I, and Zabin SA. (2018). Heavy metals contamination in sediments of Wadi Al-Aqiq water reservoir dam at Al-Baha region, KSA: Their identification and assessment. *Hum Ecol Risk Assess* 1–26.

- Ali, H and Khan, E. (2018). Assessment of potentially toxic heavy metals and health risk in water, sediments, and different fish species of River Kabul, Pakistan. *Hum Ecol Risk Assess* 24(8): 1–18.
- Amil, N, Latif, M.T, Khan, M.F, Mohamad, M, (2016). Seasonal variability of PM_{2.5} composition and sources in the Klang Valley urban-industrial environment. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 5357–5381.
- Anderson, T-H-(2003) Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1-3), 285-293.
- Anderson, T-H- (1998). The influence of acid irrigation and liming on the soil microbial biomass in a Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) stand - *Plant and Soil*, 199, 117-122.
- Andrews, S.S. and Carroll, C.R. (2002) - Designing a soil quality assessment for sustainable agro ecosystem management. - *Ecological Applications*, 2002, 11(6), 1573-1585.
- Andrews, S.S, Karlen, D.L. &Cambardella, C.A, (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1945-1962.
- Andrews, S.S, Karlen, D.L, Mitchell, J.P. (2002) - A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production system in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90, 25-45.
- Aparicio.V and Costa. J.L.(2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas; *Soil Tillage Res.* 96 155–165.
- Appiah M.R., K. Ofori-Frimpong, A.A. Afrifa, M. K.Abekoe and D. Snoeck. (2006). Improvement of soil fertility management in cocoa plantations in Ghana. FSP Regional Cacao scientific and technical final report. CRIG(Cocoa Research Institute of Ghana),Ghana, 22 p.
- Aref, S, and M.M.Wander.(1997). Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments. In *Advances in Agronomy*, Vol. 62. Academic Press, San Diego, pp. 153–197, chap. 3.
- Armenise, E, Redmile-Gordon, M. A, Stellacci, A. M, Ciccamese, A, & Rubino,P. (2013). Developing a soilquality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130, 91-98.
- Atalay.I (2006). The effects of mountainous areas on biodiversity: A case study from the northern Anatolian Mountains and the Taurus Mountains; *Grazer. Schr. Geogr. Raum.* 4117–26
- Atlas, M.R. and Bartha, R. (1997). - *Microbial ecology: fundamentals and application*. Menlo Park, California, Benjamin/Cummings Science Publishing, 1989, 694 pp.
- Avnimelech, Y. (1986). Organic residues in modern agriculture. In Y. Chen and Y. Avnimelech (Eds.), *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 1–10.

- Ayers, S., Faktor, M. M., Marr, D., & Stevenson, J. L. (1972). Growth of single crystals of meta-nitroaniline and the evaluation of its electro-optic properties. *Journal of Materials Science*, 7(1), 31-33.
- Badraoui Mohamed (2006): *Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc*.
- Badraoui, M, Merzouk, A, Bonn F, Gwyn Q.H.J. et Hinse, M. (1989). Apport de la télédétection à la cartographie des sols dans les zones arides et semi-arides. Rapport final de projet. IAV Hassan-II / Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 132 pages.
- Badraoui, M. (2003) <http://www.fsagx.ac.be/mf/Agriecoconseil/EFCA/badraoui.pdf>.
- Badraoui, M., Agbani, M., Soudi, B. (2000) Évolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. In Soudi et al. (2000) Éditeurs. Intensification agricole et qualité des sols et des eaux. Actes du séminaire organisé à Rabat (Maroc), 2 et 3 novembre, 11 pages (<http://www.vulgarisation.net/intensificationagricole/03-badraoui.pdf>).
- Badalucco. L, Grego, S, Dellorco, S. and Nannipieri, P. (1992) - Effect of liming on some chemical, biochemical, and microbiological properties of acid soils under spruce (*Picea abies* L.). - *Biology and Fertility of Soils*, 14, 76-83.
- Baize, D. (2000). Calcaire total et calcaire actif. Chapitre 10 du guide des analyses en pédologie, 2^e édition. Collection Techniques et pratiques. Presses de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France, pages 87-95.
- Belachew, T, & Abera, Y. (2010). Assessment of soil fertility status with depth in wheat growing highlands of Southeast Ethiopia. *World Journal of Agricultural Sciences*, 6(5), 525-531.
- Barakat A, Ennaji W, El Jazouli A, Amediaz R and Touhami F. (2017a). Multivariate analysis and GIS-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-Moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco); *Model. Earth Syst. Environ.* 3(1)1–8.
- Barakat A, Hilali A, El Baghdadi M and Touhami F. (2017b). Landfill site selection with GIS-based multi-criteria evaluation technique. A case study in Beni Mellal-Khouribga Region, Morocco; *Environ. Earth Sci.* 76413, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6757-8>.
- Barakat A, Ouargaf Z and Touhami F. (2016a). Identification of potential areas hosting aggregate resources using GIS method: A case study of Tadla-Azilal Region, Morocco; *Environ. Earth Sci.* 75 774, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5613-6>.
- Barakat, A, Ennaji, W, El jazouli, A, Amediaz, R, & Touhami, F. (2017a). Multivariate analysis and Gis-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco). *Modeling earth systems and environment*, 3(1), 3.
- Barakat, A., Ennaji, W., Krimissa, S. & Bouzaid, M., (2019c). Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of Beni-mellal city (morocco). *International journal of environmental health research*, 1-16.

- Barakat, A, Meddah, R, Afdali, M. & Touhami, F, (2018). Physicochemical and microbial assessment of spring water quality for drinking supply in piedmont of Béni-mellal atlas (Morocco). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 104, 39-46.
- Barakat, A, Mouhtarim, G, Saji, R. & Touhami, F, (2019d). Health risk assessment of nitrates in the groundwater of Beni Amir irrigated perimeter, Tadla plain, Morocco. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1613631>.
- Barakat, A, Ouargaf, Z, Khellouk, R, Jazouli, A.E.& Touhami, F, (2019a). Land use/land cover change and environmental impact assessment in Béni-mellal district (Morocco) using remote sensing and GIS. *Earth Systems and Environment*, 1-13 Available from: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00088-y>.
- Bartoli, F, Burtin, G, Royer, J.J, Gury, M, Gomendy, V, Philippy, R, Leviandier, Th, Gafrej, R (1995).- Spatial variability of topsoil characteristics within one silty soil type. Effects on clay migration. - *Geoderma*, 68, 279-300.
- Bastida. F, Zsolnay. A, Hernandez. T and Garcia. C (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective;*Geoderma* 147 159–171.
- Baut-Menard. R, Chesselet.R (1979). Variable influence of flux on trace metal chemistry of ocean suspended matter. *Earth Planet Sci Lett* 42:398–411.
- Beudet, G, Maurer, G. et Ruellan, A. (1967). Le quaternaire marocain : observations et hypothèses nouvelles. *Revue de Géographie Physique* (2), Vol. IX, No. 4, pp. 269 – 310.
- Bellouti, A, Cherkaoui, F, Benhida, M, Debbarh, A, Soudib, B. et Badraoui, M. (2002). Mise en place d'un système de suivi et de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des sols dans le périmètre irrigué du Tadla, au Maroc. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai.
- Belkacem, S. and NYS, C. (1995) - Consequences of liming and gypsum topdressing on nitrogen and carbon dynamics in acid forest soils with different humus forms. - *Plant and Soil*, 173, 79-88.
- Benazzouz, M. S. (2011). Étude comparative entre la géostatistique et les méthodes déterministes pour la cartographie des types de sols (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- Bennett TD, Goodwin AL, Dove MT, et al (2010). Structure and properties of an amorphous metal-organic framework. *Phys Rev Lett* 104(11):115503.
- Bhardwaj, A.K, Goldstein, D, Azenkot, A, Levy, G.J. (2007) - Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil. - *Geoderma*, 140, 199-206.
- Billaux, P. et Bryssine, G. (1970). Les sols du Maroc : chapitre III. Cahier de l'ORSTOM, numéro de la collection de références, No. 13703, pp. 59-101.

- Bilgeham., G. (1998)- Structure characteristics of soil in Harran Plain before irrigation. M. Şefik Yeşilsoy Int. S Menemen, Izmir, 208-214.
- Blum WEH, (2000). Soil quality indicators based on soil functions. III International Congress ESSC, Valencia, Spain, March.
- Borselli, L, Torri, D, Øygarden, L, DE Alba, S, Martínez-Casasnovas, J.A, Bazzoffi, P, Jakab, G. (2006). Land leveling. - In: BOARDMAN, J., POESEN, J. (Eds.), - Soil erosion in Europe. - John Wiley and Sons, Inc.
- Bouché, M.B. (1975). Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. Biodégradation et humification, rapport du colloque international.
- Bouma, J. (1997). The land use system approach to planning sustainable land management at several scales. - ITC Journal, 3/4, 237-242.
- Bowen, HJM (1979). Environmental chemistry of the elements. Academic Press, London.
- Bremer. E and Ellert. K (2004). Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta; AESA.
- Bucher, E. (2002). Soil quality characterization and remediation in relation to soil management. - PhD thesis, Department of Crop and Soil Sciences, Pennsylvania State University, USA.
- Bulluck, L.R, Brosius, M, Evanylo, G.K., Ristaino, J.B. (2002). Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. - Applied Soil Ecology, 19, 147-160.
- Burns, R.G, Nannipieri, P, Benedetti, A, Hopkins, D.W. (2006). Defining soil quality. - In: Bloem, J, Hopkins, D.W, Benedetti, A. (Eds.). Microbiological Methods for Assessing Soil Quality. - CAB International, Wallingford, 15-22.
- Carey, P.L, Benge, J.R, Haynes, R.J. (2009). Comparison of soil quality and nutrient budget between organic and conventional kiwifruit orchards.-Agriculture, Ecosystems & environment, 132: 7-15.
- Carter, M.R, Gregorich, E.G, Anderson, D.W, Doran, J.W, Janzen, H.H, Pierce, F.J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. - In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.). - Soil Quality for Crop Product. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, Netherlands, 1-19.
- Cassman, K.G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. 11, 5952–5959.
- CCME. (2007). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Summary Tables. Canada Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Cengiz. T and Akbulak. C,(2009). Application of analytical hierarchy process and geographic information systems in land-use suitability evaluation: A case study of Dumrek village (Canakkale, Turkey);Int. J. Sust. Dev. World 16 286–294.

- Cetin, B, Ozer, H, Kuscu, H. (2004). Economics of drip irrigation for apple (*Malus domestica*) orchards in Turkey. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 32 (4), 349-354.
- Chang, C.W, Wu, C.R, Lin, C.T. and Chen, H.C. (2007). An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 52, 296-307.
- Chassin P, Baize D, Cambier P, Stecherman T, (1996). Les éléments traces métalliques et la qualité des sols. Impacts à moyen et à long terme. *Etude et Gestion des sols* 3:297-306.
- Chaussod, R. (1996). La qualité biologique des sols : évaluation et implications.- *Etude et Gestion des Sols*, 3, 261-278.
- Cherbuy B. (1991). Les sols salés et leur réhabilitation cas de la Comarca. Editeur CEMAGREF.
- Choubert, G., & Faure-Muret, A. (1956). *Lexique stratigraphique du Maroc: par Georges Choubert, avec la collaboration de Anne Faure-Muret. Introduction géologique, les grands traits de la géologie du Maroc, par Georges Choubert et Jean Marçais..Éditions du Service géologique du Maroc.*
- Chuan, M. C., Shu, G. Y., & Liu, J. C. (1996). Solubility of heavy metals in a contaminated soil: Effects of redox potential and pH. *Water, Air, and Soil Pollution*, 90(3), 543–556. <https://doi.org/10.1007/BF00282668>.
- Cole, H. (1978). *Metallic effluents of industrial origin in the marine environment: Association Européenne Océanique, EUR 5331, Published by Graham & Trotman Ltd. for the Commission of the European Communities, Luxembourg (1977). 216 pp, tables and figures. Price:£ 15. Pergamon*
- Courtney, R.G, Mullen, G.J. (2008). Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. - *Bioresource Technology*, 99, 2913-2918.
- Çullu, M. A. (2002). Estimation of the Effect of Soil Salinity on Crop Yield Using Remote Sensing and Geographic Information System. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27, 23-28.
- Dabin, B. (1970). Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Coton Fibres Trop*, 25(2), 213-234.
- Davidson, D.A. (2000). Soil quality assessment: recent advances and controversies. - *Progress in Environmental Science*, 2(4), 342-350.
- DE Haan, F.A.M, Lexmond, Th.M, Van Riemsdijk, W.H. (1990). Proc. Workshop. Indicators and indices for environmental impact assessment and risk analysis. - ISPRA, A.G. Colombo, G. Premazzi (Eds.). EUR 13060-EN. EC, Luxembourg, 161-174.
- Debbarh, A, & Badraoui, M. (2001). Irrigation et environnement au Maroc: situation actuelle et perspectives. In atelier du PCSI (programme commun systèmes irrigués) sur une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation (pp. 14-p). Cirad-ird-cemagref.

- DE Boer, W, Hundscheid, M.P.J, Schotman, J.M.T, Troelstra, S.R. Laanbroek, H.J. (1993) – In situ net N transformations in pine, fir, and oak stands of different ages on acid sandy soil, 3 years after liming. *Biology and Fertility of Soils*, 15, 120-126.
- Derome, J, Kukkola, M, Mälkönen, E. (1986). Forest living on Mineral Soils. Results of Finnish experiments. National Swedish Environmental Protection Board Report 3084:10107.
- Doran JW, Liebig M, Santana.D, (1998). Soil health and global sustainability. 16th World Congress of Soil Science, symposium 26, Montpellier, France, August.
- Doran JW, Parkin TB, (1994). Defining and assessing soil quality. In: Defining soil quality for a sustainable environment. (eds Doran JW et al.), pp.3-22. SSSA Spec. Publ. 35, Madison, WI.
- Doran, J.W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice.- *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88, 119-127.
- Doran, J.W, Safely, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (Eds.). *Biological indicators of Soil Health*. - CAB International, New York, 1-28.
- Doran, J.W, Sarrantonio, M, Lieberg, M.A. (1996). Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy*, 56, 1-54.
- Doran, J.W. and Parkin, T.B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. - In: Doran, J.W, Jones, A.J. (Eds.). *Methods for Assessing Soil quality*. Soil Science Society of America, Special publication 49, Madison, WI, 25-37.
- Doran, J.W, Zeiss, M.R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality.- *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11.
- Douay, F, Pelfrêne, A, Planque, J, Fourrier, H, Richard, A, Roussel, H, Girondelot, B, (2013). Assessment of potential health risk for inhabitants living near a former lead smelter. Part 1: metal concentrations in soils, agricultural crops, and homegrown vegetables. *Environ. Monit. Assess.* 185, 3665–3680.
- Driouech, Fatima. Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes. Diss. 2010.
- Ducluzeau, P-H., et al. "Approche multifactorielle et typologique du concept de fragilité chez les patients hypertendus non contrôlés. Enquête Eclat." *Annales de cardiologie et d'angiologie*. Vol. 58. No. 2. Elsevier Masson, 2009.
- El Antaki, A., & El Boustani, M. (1991). [Sheet drainage and management in the irrigated perimeter of Tadla [Morocco]. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Veterinaires*.
- Ennaji, W, Barakat, A, El Baghdadi, M, Oumenskou, H, Aadraoui, M., Karroum, L. A, & Hilali, A. (2018). GIS-based multi-criteria land suitability analysis for sustainable agriculture in the northeast area of Tadla plain (Morocco). *Journal of Earth System Science*, 127(6), 79.

- Endelman, F.J, Keeney, D.R, Gilmour, T.J, SafaGna, P.G. (1974). Nitrate and chloride movement in the plainfield loamy sand under extensive irrigation. - *Journal of Environmental Quality*, 3, 95-298.
- Erkossa, T, Itanna, F, Stahr, K. (2007). Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. - *Australian Journal of Soil Research*, 45, 129-137.
- Eswaran H, Lal, R, Reich. PF. (2001). Land degradation: an overview. In: Bridges EM,et al., eds. Responses to land degradation. New Delhi: Oxford Press,
- Eswaran H, Reich P.A. (2002).Preliminary assessment of the human impact on land systems of the world. Transactions of the 17th WCSS Bangkok, CDrom paper 2128.
- Étienne, H, et GUESSAB, D, (1975). Ressources du Maroc, t. 2 : Plaines et bassins du Maroc atlantique. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, n° 231, p. 299-365.
- FAO: Guidelines for soil secription.4th ed.Edited by Jahn, Blume, Asio, Spaargaren, Schad. Rome, (2006) :ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/guidel_soil_descr.pdf.
- Fauci, M.F. and Dick, R.P. (1994). Microbial biomass as an indicator of soil quality: effects of long-term management and recent soil amendments. In: Doran, J.W; Coleman, D.C; Bezdicek, D.F. and STEWART, B.A, (Eds). Defining soil quality for a sustainable environment. Minneapolis, Soil Science Society of America Special Publication, 35, 17, 229-234.
- Filep, T, Zacháry,D, &Balog, K. (2016). Assessment of soil quality of arable soils in hungary using drift spectroscopy and chemometrics. *Vibrational spectroscopy*, 84, 16-23.
- Fließbach, A, Oberholzer, H.R, Gunst, L, Mäder, P. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming.-*Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 273-284.
- François R. (2008). Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité, Edition DUNOD, Paris, 1152 pages.
- Freckman, D. W. and. Virginia, R. A. (1997). Low-diversity Antarctic soil nematode communities: Distribution and response to disturbance. - *Ecology*, 78,363-369.
- García-Ruiz, J.M, Lasanta, T, Ruiz-Flaño, P, Ortigosa, L, White, S, González, C, Marti, C. (1996). Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, 11, 267-277.
- Gąsiorek, M, Kowalska, J, Mazurek, R, & Pająk, M. (2017).Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland). *Chemosphere*, 179,148–158.
- Gee, G., & Or, D. (2002). Method of soil analysis Particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part 4 physical methods*, 5, 255–293. <https://doi.org/10.2136/sssabookse5.4.c12>

- Genot, V, Colinet, G, Brahy, V, & Bock, L. (2009). L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4-sol 1 de " L'Etat de l'Environnement wallon 2006-2007").
- Glanz, J.T. (1995). *Saving our Soil: Solutions for Sustaining Earth's Vital Resource*. Johnson Books, Boulder, CO.
- Gobat JM, Aragno M, Matthey W, (1998). *Le sol vivant*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Golchin, A, Clarke, P, Oades, J.M, Skjemstad, J.O. (1995). The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Australian Journal of Soil Research*, 33, 975-993.
- Gómez, E, Ferreras, L, Toresani, S, (2006). Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresource Technology*, 97, 1484-1489.
- Gregorich, E.G, Carter, M.R, Angers, D.A, Monreal, C.M. and Ellert, B.H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. - *Canadian Journal of Soil Science*, 74, 367-385.
- Gros, R. (2002). *Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origines anthropiques: réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique* (Doctoral dissertation, Université de Savoie).
- Gu, Y.G, Gao, Y.P, Lin, Q, (2016). Contamination, bio accessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou. *Appl. Geochem* 67, 52-58.
- Håkanson, L, (1980). Ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach. *Water Res.* 14, 975–1001.
- Hamblin, A. (1991). *Environmental indicators for sustainable agriculture*. Report of a national workshop, Publ. LWRRDC and GRDC, 96.
- Hammani, A. Kuper, M. (2007). Caractérisation des pompages des eaux souterraines dans le Tadla, Maroc. *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie, 4-7 juin 2007. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom.
- Hammani A, Kuper M, Debbarh A, Bouarfa S, Badraoui M, Belloouti A, (2004). Evolution de l'exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla, revue H.T.E., n° 130, p.39-43.
- Haynes RJ, Swift RS, (1990). Stability of soil aggregates in relation to organic constituent and soil water content. *Journal of Soil Science* 41:73-83.

- Helmisaari, H.-S, Hallbäck, L. (1990). Fine-root biomass and necromass in limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands, - *Forest Ecology and Management*, 9, 99-110.
- Hermawan, B, Cameron, K.C. (1993). Structural changes in a silt loam under long-term conventional or minimum tillage. - *Soil Tillage Research*, 26, 139-150.
- Herrick J.E, Brown J.R, Tugel A.J, Shaver P.L and Havstad K.M (2002). Application of soil quality to monitoring and management; *Agron. J.* 94 (1) 3–11.
- Hillel, D. (1991). *Out of the Earth: Civilization and the Life of the Soil*. University of California Press, Berkeley, CA, 321 p.
- Hornick, S.B. (1992). Factors affecting the nutritional quality of crops. *Am. J. Alter. Agric.*, 7, 63-68.
- Howard, P.J.A. (1993). Soil protection and soil quality assessment in the EC. *Science of the Total Environment*, 129, 219-239.
- Hsissou, Y., Chauve, P., & Mania, J. (1996). The aquifer of Turonian limestones (Tadla Basin, Morocco). Local and remote groundwater recharge from the Atlas. *Journal of Hydrology*, 3(183), 433-443.
- Hsu, C, Chiang, H, Lin, S, Chen, M., Lin, T, Chen, Y, (2016). Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM 2.5 in the western coastal area of central Taiwan. *Sci. Total Environ.* 541, 1139–1150.
- Huber, S, Syed, B, Freudenschuss, A, Ernsten, V, Loveland, P. (2001). Proposal for a European soil monitoring and assessment framework.-Technical report no.61, Europe Environmental Agency, Copenhagen, Denmark.
- Hunt, H.W. and Wall, D.H. (2002). Modelling the effects of loss of soil biodiversity on ecosystem function. - *Global Change Biology*, 8, 33-50.
- Impellitteri, C. A., Lu, Y., Saxe, J. K., Allen, H. E., & Peijnenburg, W. J. G. M. (2002). Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils. *Environment International*, 28(5),401–410. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00065-X).
- Islam S, Ahmed K, Masunaga S. (2015). Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh. *Sci Total Environ.* 512:94–102.
- ISO, H. (2005). 10390: 2005. Soil quality–Determination of pH.
- ISO, N. (2001). 11261(1995). Soil quality, Measurement of total organic nitrogen, Kjeldahl modified method, AFNOR.
- Jamagne, M (1967). *Bases et techniques d'une cartographie des sols*. - INRA éditions.

- Janeau, J.L, Bricquet, J.P, Planchon, O, Valentin, C. (2003). Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science*, 54, 543-554
- Jiménez, J, Filser, J, Barot, S, Berg, M, Briones, M. J., Butt, K, & Frey, B. (2018, April). ES1406 COST Action: Soil fauna: Key to Soil Organic Matter Dynamics and Fertility. How far have we got. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, p. 18437).
- Johnston, A.E. (1991). Fertility and soil organic matter. In W.S. Wilson (Ed.), *Advances in Soil Organic Matter Research: The Impact on Agriculture and the Environment*, The Royal Society of Chemistry, Melksham, Wiltshire, pp. 297–314.
- Jordanova, V. K, Delzanno, G. L, Henderson, M. G, Godinez, H. C, Jeffery, C. A, Lawrence, E. C, & Brito, T. V. (2018). Specification of the near-Earth space environment with SHIELDS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 177, 148-159.
- Kabata-Pendias, A, (2011). *Trace Elements of Soils and Plants*, fourth ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 28-534.
- Kabata-Pendias, A, Pendias, H, (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, New York
- Karlen D, Eash NS, Unger PW. (1992). Soil and crop management effects on soil quality indicators. *American Journal of Alternative Agriculture* 7:48-55.
- Karlen, D.L, Parkin, T.P, Eash, N.S. (1996). Use of soil quality indicators to evaluate conservation reserve program sites in Iowa. -In: Doran, J.W, Jones, A.J. (Eds.). -*Methods for assessing soil quality*. - SSSA, Madison, 345-355.
- Karlen, D.C, Mausbach, M.J, Doran, J.W, Clire, R.G, Harris, R.F, Schuman, G.E, (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of American Journal* 61, 4-10.
- Kazemi, H, sadeghi, S, & akinci, H. (2016). Developing a land evaluation model for faba bean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (a case study: gonbad-kavous region, iran). *Ecological indicators*, 63, 37-47.
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1984). Soil cohesion as affected by time and water content.- *Soil Science Society of America Journal*, 84, 1001-1006.
- Khormi H.M, and Kumar. L.(2013). Using geographic information system and remote sensing to study common mosquito-borne diseases in Saudi Arabia: A review; *J. Food Agric. Environ.* 11(2)14–17.
- Koko, L. K, Yoro, R. G, N'Goran, K, & Assa, A. (2008). Evaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 20(1), 81-95.
- Kucharik, C. J, Brye, K. R, Norman, J. M, Foley, J. A, Gower, S. T, & Bundy, L. G. (2001). Measurements and modeling of carbon and nitrogen cycling in agroecosystems of southern wisconsin: potential for soc sequestration during the next 50 years. *Ecosystems*, 4(3), 237-258.

- Lacharme, M. (2001). Fascicule 6: La fertilisation minérale du riz. Ministère du Développement Rural et de l'Environnement: Direction de la Recherche Formation Vulgarisation, Coopération française, 19p.
- Lal, R. (1999). Soil quality and food security: the global perspective. - In: LAL, R. (Eds.). - Soil Quality and Soil Erosion. - CRC Press, Boca Raton, FL, 3-16.
- Lal, R. (1989). Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol. *Agroforestry systems*, 8(2), 97-111.
- Langmaack, M. (1999). Earthworm communities in arable land influenced by tillage, compaction and soil.-*Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz*, 8, 11-21.
- LANO, (2008). Analyses des terres. <http://www.lano.asso.fr/web/analyses.html>[Consulté en 2011].
- Larson, W.E. and Pierce, F.J. (1994). The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. *Defining Soil Quality for a Suitable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication No.35. Soil Science Society of America, Madison, USA, WI, 37-51.
- Laskar. A (2003). Integrating GIS and multicriteria decision making techniques for land resource planning;ITC Netherlands.
- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil ecology*. Springer Science & Business Media. Gobat, J.-M., Aragno, M. & Matthey, W., 2003. *Le Sol Vivant*. PPUR, Suisse. 571 p. Lavelle, P., Spain, A.V., *Soil ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Morel R (1989) *Les sols cultivés*. Lavoisier, Paris.
- Legros, J.P. (2007). *Les grands sols du monde*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 574 pages.
- Liebhart, W.C, R.W. Andrews, M.N. Culik, R.R. Harwood, R.R, Janke, J.K. Radke, and S.L. Rieger-Schwartz (1989). Crop production during conversion from conventional to low-input methods. *Agron. J.* 81,150–159.
- Litynski, T, Jurkowska, H, & Gorlach, E. (1976). *Chemical and agricultural analysis*.
- Loukili, M, Bock, L, Engels, P. et Mathieu, L. (1999) *Approche géomorphopédologique et système d'information géographique pour la gestion des terres au Maroc*. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 7, No. 1, pp. 37-52.
- Loveland, P.J. and Thompson, T.R.E. (2001). Identification and development of a set of national indicators for soil quality. - R&D Technical report P5-053/2/TR National Soil Resources Institute, Cranfield University, Silsoe, UK.
- Lü, J, Jiao, W. B, Qiu, H. Y, Chen, B, Huang, X. X, & Kang, B. (2018). Origin and spatial distribution of heavy metals and carcinogenic risk assessment in mining areas at You'xi County southeast China. *Geoderma*, 310, 99-106.

- Lupwayi, N.Z, Arshad, M.A, Rice, W.A, Clayton, G.W. (2001). Bacterial diversity in water- stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management.-*Applied Soil Ecology*, 16, 251-261.
- Maanan M, Saddik M, Maanan M,et al. (2015). Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecol Indicators* 48:616–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>.
- Mandzhieva, S., Minkina, T., Pinskiy, D., Bauer, T., & Sushkova, S.(2014). The role of soil's particle-size fractions in the adsorption of heavy metals. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3(3), 197
- Marchand, C, Allenbach, M, Lallier-Verges, E, (2011). Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia). *Geoderma* 160, 444-456.
- Martin MH, Coughtrey .PJ, (1982). Biological monitoring of heavy metal pollution – land and air. Maxwell Macmillan Canada Inc., Applied Science Publishers, London, New York.
- Marinari, S, Masciandaro, G, Ceccanti, B, Grego, S. (2000). Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. - *Bioresource Technology*, 72, 9-17.
- Marschner, B, Wilczynski, A. (1991). The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. - *Plant and Soil*, 137, 229-236.
- Massoni, C, Missan, G, Beaudetm, G, Combesh, E. et Ionesco, P. (1970). La plaine de Tadla: chapitre II. Publications de l'ORSTOM, Cahier de la recherche agronomoqie, No. 24,pp. 163-194.
- Máté, F. and Tóth, G. (1996). Soil bonitation as a constituent of land evaluation (Talajbonitáció mint a földértékelés egyik tényezője) - *Agrárökonómiai Tudományos Napok.GATE Mezőgazdasági Főiskolai Kar. Gyöngyös*,
- Mausbach MS, Tugel A (1997). Soil quality: A multitude of approaches. Kearney Foundation Symposium. California Soil Quality: from critical research to sustainable management. Berkeley, California, March 25.
- Mazoyer M, Roudart L, (1997). Histoire des agricultures du monde : du néolithique à la crise contemporaine. Edition du seuil, Paris, 533p.
- Mazurek, R, Kowalska, J, Gałsiorek, M, Zadrozny, P, Jozefowska, A, Zaleski, T,Kejpa, W, Tymczuk, M, Orłowska, K, (2017). Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere* 168, 839-850.
- Mermoud A. (2001). Cours de physique du sol : Maitrise de la salinité du sol. Version provisoire : 14 p. Ecole Fédérale de Lausanne.

- Mérelle, F, & Groupe d'études méthodologiques pour l'analyse des sols (France), (1998). L'analyse de terre aujourd'hui. GEMAS.
- Michał Gasiorek, Joanna Kowalska, Ryszard Mazurek, Marek Pajak, (2017). Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland). *Chemosphere* 179-148-158.
- Miller, R, Donahue, R. (1995). *Soils in Our Environment - 7th edition*. Prentice Hall (Eds), 649 p.
- Mmolawa, K.B, Likuku, A.S, Gaboutloeloe, G.K, (2011). Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 3,186-196.
- Mohammadi A, Hajizadeh Y, Taghipour H, Mosleh Arani A, Mokhtari M, Fallahzadeh H.(2018). Assessment of metals in agricultural soil of surrounding areas of Urmia Lake, northwest Iran: a preliminary ecological risk assessment and source identification. *Hum Ecol Risk Assess.* 24(8):2070–2087
- Mokarram, M., &Hojati, M. (2017). Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi-criteria soil fertility evaluation by GIS (case study: southeast iran). *Computers and electronics in agriculture*, 132, 1-13.
- Muhammad, S, Shah, M.T, Khan, S, (2011). Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan. *MicroChem. J.* 98, 334–343.
- Müller. GU. (1979). Schwermetalle in den sediments des Rheins: Veränderungenseit 1971. *UmschWiss Tech* 79:778–783.
- Müller. GU (1981). Die Schwermetallbelastung der sedimenten des Neckars und seiner Nebenfüsse: eineBestandsaufnahme. *Chem Ztg* 105:157–164.
- Munyanziza, E, Kehri, H.K, BAGYARAJ, D.J. (1997). Agricultural intensification, soil biodiversity and agro-system function in the tropics: the role of mycorrhiza in crops and trees. - *Applied Soil Ecology*, 6, 77-85.
- Neale, S.P, Shah, Z, Adams, W.A. (1997). Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidic organic soils following liming. - *Soil Biology & Biochemistry*, 29, 1463- 1474.
- Nelson, K.L, Lynch, D.H, Boiteau, G. (2009). Assessment of changes in soil health throughout organic potato rotation sequences, -*Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131, 220-228.
- NF ISO 10693. (1995). Détermination de la teneur en carbonate–méthode volumétrique. *Qualité des sols AFNOR*, 177-186.
- Nguyen, T. T, verdoodt, A, Van y, T, Delbecque, N, Tran, T. C, &VanRanst, E. (2015). Design of a gis and multi-criteria based land evaluation procedure for sustainable land-use planning at the regional level. *Agriculture, ecosystems & environment*, 200, 1-11.

- Nie, Feiping, Jianjun Yuan, and Heng Huang. "Optimal mean robust principal component analysis." International conference on machine learning. 2014.
- Nissen, T.M., and M.M. Wander (2003). Management and soil-quality effects on fertilizer-use efficiency and leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1524–1532.
- Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG, (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory Note. Global Assessment of Soil Degradation. Wageningen : International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) ; United Nations Environment Program (UNEP).
- Oumenskou, H, El Baghdadi, M, Barakat, A, Aquit, M, Ennaji, W, Karroum, L. A, & Aadraoui, M. (2018). Assessment of the heavy metal contamination using GIS-based approach and pollution indices in agricultural soils from Beni Amir irrigated perimeter, Tadla plain, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(22), 692.
- Pardo, A, Amato, M, Chiaranda, F.Q. (2000). Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chick-pea (*Cicer arietinum*). Plant growth and water distribution.- *European Journal of Agronomy*, 13, 39-45.
- Persson, T, Rudebeck, A, Wiren, A. (1995). Pools and fluxes of carbon and nitrogen in 40-year-old forest liming experiments in Southern Sweden. - *Water, Air, and Soil Pollution*, 85, 901-906.
- Persson, T. (1988). Effects of liming on soil fauna in forests. A literature review. - National Swedish Environment Protection Board, 3418, 92.
- Pieri, C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara.
- Pielke, R.A., (2005). Land use and climate change. *Science* 310, 1625–1626.
- Poudel, D.D., W.R. Horwath, J.P. Mitchell, and S.R. Temple (2001). Impacts of cropping systems on soil nitrogen storage and loss. *Agric. Syst.* 68, 253–268.
- Queensland Department of Environment and Heritage Protection. "Soil pH". www.qld.gov.au. Retrieved 15 May (2017).
- Rampazzo, N, Blum, W.E.H, Wimmer, B. (1998). Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. - *Bodenkultur*, 49, 69-84.
- Raphaël. GROS, (2002). Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origine anthropique : réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique, 253 pages.
- Rashed. MN, (2010). Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *J Hazard Mater* 178:739–746.

- Raspe, S, Haug, I. (1998). Wurzelverteilung und Mykorrhizadynamik in Abhängigkeit vom Nährelementangebot im Boden.-In: Raspe, S., Feger, K.H., Zoöttl, H.W. (Eds.). - Ökosystemforschung im Schwarzwald. - Ecomed-Verlagsgesellschaft, Landsberg, 223-237.
- Ribeiro, L, (1976). Introducao ao estudo da mineralogia dos solos de Ibitiara, BA, in Ana is do decimo quinto congresso Sociedade Brasileiro de Ciencia do solo. ociedade Brasileira de Ciencia do Solo, Campinas, SP, Brazil, pp: 423-427.
- Robert M, Juste.C (1997). Stocks et flux d'éléments traces dans les sols du territoire. Actes des journées techniques des 5 et 6 juin 1997, ADEME, Paris, "épandage de boues résiduaires : aspects sanitaires et environnementaux".
- Robert M. (1996). Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, 241p.
- Rodenkirchen, H. (1998). Evidence for a nutritional disorder of *Oxalis acetosella* L. on acid forest soils. I. Control situation and effects of dolomitic liming and acid irrigation. - *Plant and Soil*, 199, 141-152.
- Romig, D.E, Garlynd, M.J, Harris, R.F, Mcsweeney, K. (1995). How farmers assess soil health and quality (Special Issue on Soil Quality). *Journal of Soil and Water Conservation*, 50, 229-236.
- Ruellan, A. (2003). Évaluation du système de recherche scientifique et technique au Maroc : Sols et Environnement. MESFCRS, SERS.
- S. Sherwood and N. (2000). Uphoff, Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture, *Applied Soil Ecology*, 15, 85-97.
- Saaty T.L, and Vargas L.G,(2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process; Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium, Heidelberg, Berlin, pp.15–37.
- Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T.L. (1994). *Fundamentals of decision making*. Pittsburgh: RWS publications.
- Saaty, T.L. (1997). That is not the analytic hierarchy process: what the AHP is and what it is not. *Journal of multi-criteria decision analysis*, 6(6), 324-335.
- Saddique U, Muhammad S, Tariq M, Zhang H, Arif M, Jadoon IAK, Khattak NU, (2018). Potentially toxic elements in soil of the Khyber Pakhtunkhwa province and Tribal areas, Pakistan: evaluation for human and ecological risk assessment. *Environ Geochem Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0091-2>.
- Saidi D, Le Bissonnais Y, Duval O, Daoud Y, Tessier D, (2008). Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols* 15(4):241–253.

- Sanchez, P. A. (2002). Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 295(5562), 2019-2020.
- Sasal, C, Andriulo, A, Ullé, J, Abrego, F, Bueno, M. (2000). Efecto de diferentes enmiendas sobre algunas propiedades edáficas, en sistemas de producción hortícola del centro norte de la región pampeana. - *Ciencia del Suelo*, 18, 95-104.
- Scherr SJ. (1999). Soil degradation. A threat to developing-country food security by 2020. Food, agriculture, and the environment discussion paper 27. Washington (DC): International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Schiefer, J, Lair, G. J, & Blum, W. E. (2015). Indicators for the definition of land quality as a basis for the sustainable intensification of agricultural production. *International soil and water conservation research*, 3(1), 42-49.
- Schlöter, M, Munch, J.C, Tittarelli, F. (2006). Managing soil quality- In: Bloem, J, Hopkins, D.W., Benedetti, A. (Eds.). *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*- CAB International, Wallingford, 50-62.
- Servant J. (1975). Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. Exemple des sols salés du sud et de sud-ouest de la France. Thèse doc. Es sciences Naturelles, ENSA Montpellier, France.
- Seybold, C.A, Dick, R.P, Pierce, F.J. (2001). USDA soil quality test kit: approaches for comparative assessments. - *Soil Survey Horizons*, 42, 43-52.
- Shepherd, K. D, & Soule, M. J. (1998). Soil fertility management in west Kenya: dynamic simulation of productivity, profitability and sustainability at different resource endowment levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 71(1-3), 131-145.
- Singh A, Sharma RK, Agrawal M, et al. (2010). Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food Chem Toxicol* 48:611-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.11.041>.
- Słowik, T., Jackowska, I., Piekarski, W., (2008). The problems of environmental pollution by the transport infrastructure on the example of the Roztocze National Park. *Acta Agrophysica* 5, 23-36.
- Smaling, E. M. A., Stoorvogel, J. J., & Windmeijer, P. N. (1993). Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. *Fertilizer research*, 35(3), 237-250.
- Smolander, A, Mälkönen, F. (1994). Microbial biomass C and N in limed soil of Norway spruce stands. - *Soil Biology & Biochemistry*, 26, 503-509.
- Sojka, R.E. and Upchurch, D.R. (1999). Reservations regarding the soil quality concept. - *Soil Science of America Journal*, 63, 1039-1054.
- Solgi, E, (2016). Contamination of two heavy metals in topsoils of the urban parks Asadabad, Iran 2013. *Arch. Hyg. Sci.* 5, 92-101.

- Stengel, P. et Gelin, S. (1998). *Sol : interface fragile*. Publié par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris (France), ISBN 2-7380-0786-4, 210 pages.
- Stewart, B.A. (1992). *Advances in Soil Science - 20*, 1 Spring-Verlag New York, NY.
- Stoorvogel, J. J, & Smaling, E. M. A. (1990). *Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000. Vol. 2: nutrient balances per crop and per land use systems (No. 28)*. ISRIC.
- Sutherland. RA, (2000). *Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii*. *Environ Geol* 39:611–627.
- Taghipour H, Mosaferi M, Armanfar F, et al. (2013). *Heavy metals pollution in the soils of suburban areas in big cities: A case study*. *Int J Environ Sci Technol* 10:243–50. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0143-6>.
- Taibi, Aude Nuscia, El Khalki, Yahia, et El Hannani, Mustapha, (2015). *Atlas régional Région du Tadla Azilal Maroc*. Université d'Angers.
- Tang J, He J, Liu T, et al. (2017). *Extraction and environmental risk assessment of heavy metal in the municipal dewatered sludge using rhamnolipid treatment*. *Human Ecol Risk Assess* 23:1522–1538.
- Tanji, k. (2004). *Salinity in the soil environment*. In *salinity: environment-plants-molecules*;lauchli, a., luttge., u., eds.; kluwer academicpublisher: dordrecht, the netherlands; pp. 21–51.
- Tedeschi, A, Dellaquilla, R. (2005). *Effects of irrigation with saline waters al different concentration, on soil physical and chemical characteristics*. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 308-322.
- Tejada, M, González, J.L, García-Martínez, A.M, Parrado, J. (2008). *Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: effects on soil properties*. -*Bioresource Technology*, 99, 4949-4957.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L. (2003). *Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland conditions*. *European Journal of Agronomy*, 19, 357-368.
- Tian K, Huang B, Xing Z, Hu W. (2017). *Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China*. *Ecol Indic*. 72:510–520.
- Tomlinson, D.C, Wilson, J.G, Harris, C.R, Jeffery, D.W, (1980). *Problems in the Assessment of Heavy Metals Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index*, 33. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuch*, pp. 566–575.
- Tóth, G, Stolbovoy, V. and Montanarella L, (2007). *Soil Quality and Sustainability Evaluation - An integrated approach to support soil-related policies of the European Union*. - EUR 22721 EN. 40 p. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg ISBN, 987-92-79-05250-7.

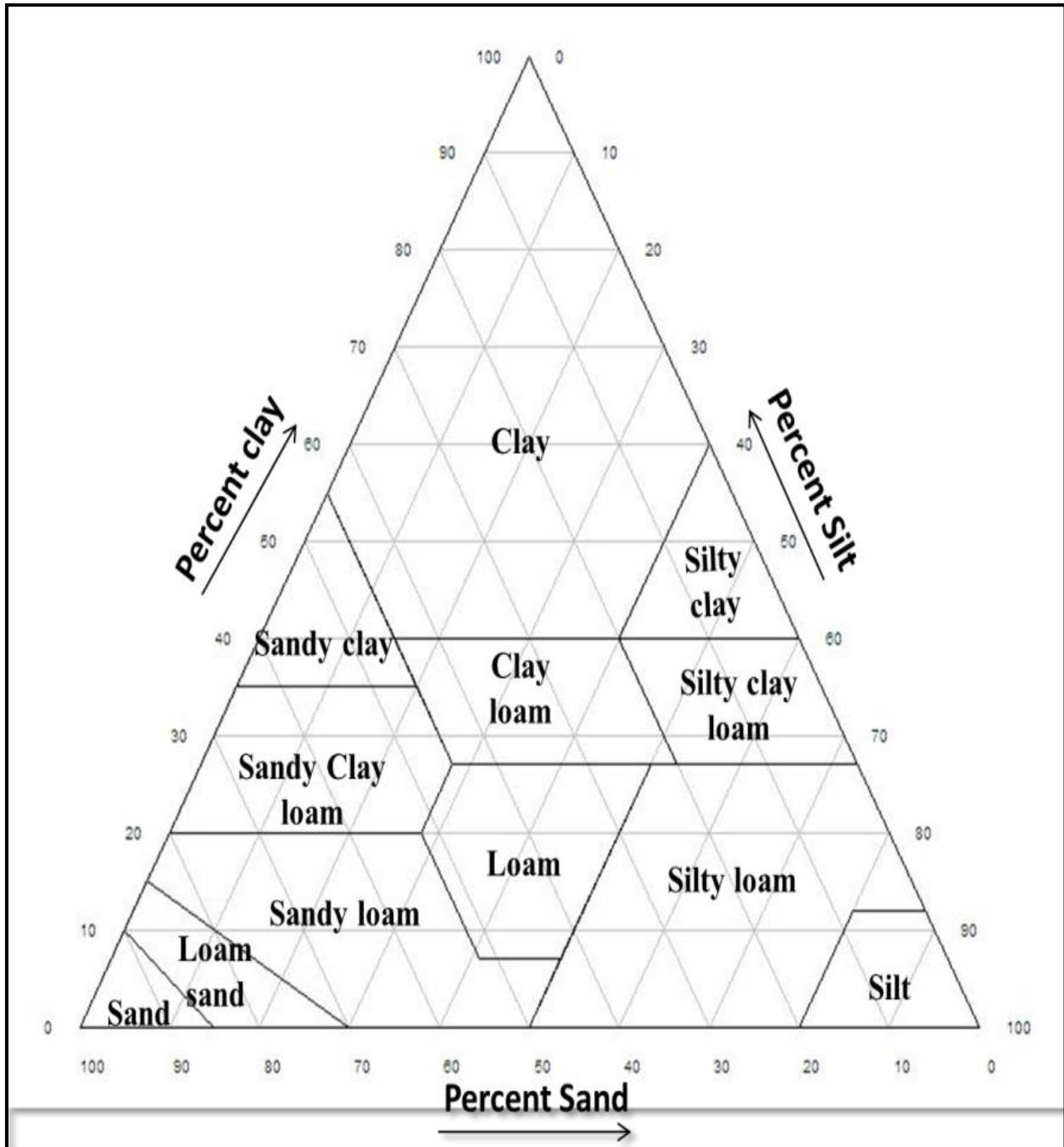
- TÓTH, G. E. (2008). Soil Quality in the European Union. - In: Tóth, G., Montanarella, L. and Rusco, E. (Eds.), JRC Scientific and Technical Reports. - Threats to Soil Quality in Europe - , 11-19.
- Tramblay-Bœuf. V, (1995). Influences des contraintes mécaniques sur l'exudation racinaire du maïs. Thèse doctorat 3ème cycle, INPL, Nancy, 138 pages.
- Treonis, A. M, Austin, E.E, Buyer, J.S, Maul, J.E, Spicer, L, Zasada, I.A. (2010). Effects of organic amendment and tillage on soil microorganisms and microfauna. -Applied Soil Ecology, 46, 103-110.
- USEPA (1996). Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Test methods for evaluating solid waste. USEPA, Washington,DC.
- Verset, Y., CHARTRY, G., & NATAF, M. (1988). Carte géologique du Maroc au 1/100 000 feuille Qasbat-Tadla. Notes et mémoires du Service géologique.
- Vijaya, CB, Kiran, K, and Nagendrappa. G. (2010). Assessment of Heavy Metals in Water Samples of Certain Locations Situated Around Tumkur, Karnataka, India. CODEN ECJHAO EJournal of Chemistry. 7(2), 349-352.
- Wang, Y, Chen, Y.C, Li, Z.P, (2012).Contamination pattern of heavy metals in Chinese urban soil. Environ. Chem. 31, 763–770.
- Weber, J., Dradrach, A., Karczewska, A., & Kocowicz, A. (2018).The distribution of sequentially extracted Cu, Pb, and Zn fractions in Podzol profiles under dwarf pine of different stages of degradation in subalpine zone of Karkonosze Mts (Central Europe).Journal of Soil Sediments, 18(6), 2387–2398
- Wei B.G, Yang L.S (2010). A reviews of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. Microchem J 94(2):99–107.
- Winfried E.H.Blum, Peter Schad, Stephen Nortcliff (2018): Essentials of soil science. Soil formation, function, use and classification (world references base, WRB), ISBN 978-3-443-01090-4.
- Yakovchenko, V.I., Sikora, L.J., Kaufman, D.D. (1996). A biologically based indicator soil quality. - Biology and Fertility of Soils, 21, 245-251.
- Yin, Y., Impellitteri, C. A., You, S.-J., & Allen, H. E. (2002). The importance of organic matter distribution and extract soil: Solution ratio on the desorption of heavy metals from soils. Science of the Total Environment, 287(1), 107–119. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01000-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01000-2).
- Zadrozny, P, Nicia, P, Kowalska, J, Bejger, R, (2015). Assessment of heavy metalspollution in the Błę,dowskie swamp soils. Acta Agrophysica 2, 234-242.

- Zalidis, G, Stamatiadis, S, Takavakoglou, V, Eskridge, K, Misopolinos, N. (2002). Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88, 137-146.
- Zawadzka, M., Łukowski, M.I. (2010). The content of Zn, Cu, Cr in podzolic soils of Roztocze National Park at the line of metallurgical and sulphur and the highway. *Acta Agrophysica* 16 (2), 459-470.
- Zhang J, Liu CL, (2002). Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar Coastal Shelf Sci* 54:1051–1070.
- Zitouni, M. and Ibouh, H. (2016). Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la Plaine du Tadla entre 1984 et 2015.

Annexes

Annexe 1

Triangle de texture proposé par l'USDA (IUSS Working Group WRB, 2006)



Annexe 2

Photos de terrain pendant l'échantillonnage des sols



Annexe 3

Quelques images des matériels utilisés au laboratoire



Annexe 4

Données des types d'agricultures et températures pour les échantillons des sols de la zone d'étude

Echantillon	Température	TYPE D'AGRICULTURE	ZONE
P1	38,4	ORGE	OULAD SAID L'OUED
P2	18,5	ORGE	OULAD SAID L'OUED
P3	18,7	ORGE	OULAD SAID L'OUED
P4	18,9	LUZERNE	OULAD SAID L'OUED
P5	19,9	ORGE	AIT YAKOUB
P6	21,8	BLE	AIT YAKOUB
P7	22,6	BLE	AIT YAKOUB
P8	27,9	BLE	IGHRAM ALAM
P9	30,7	BLE	IGHRAM ALAM
P10	30,9	BLE	IGHRAM ALAM
P11	29,2	LUZERNE	AIT OUALI
P12	31,2	BETRAVE	AIT OUALI
P13	31,5	BETRAVE	AIT OUALI
P14	31,4	POMME DE TERRE	AIT OUALI
P15	30,6	POMME DE TERRE	AIT OUALI
P16	35,1	BLE	AIT MZALT
P17	35,3	ORGE	AIT MZALT
P18	34,3	ORGE	AIT ALI
P19	34,1	ORGE	AIT ALI
P20	29,8	ORGE	MISSIWA
P21	33,4	ORGE	MISSIWA
P22	35,1	ORGE	MISSIWA
P23	40,3	LUZERNE	AIT ASSAM
P24	34,7	ORGE+HARICOT	AIT SMAHA
P25	35,9	ORGE	MJATE
P26	41,4	ORGE	AIT HAMZA
P27	46,1	ORGE	AIT HAMZA
P28	36,5	ORGE	AIT MOULAL
P29	37,1	POIS	AIT MKHALT
P30	33,8	POIS	AIT MKHALT
P31	24,1	POIS	AIT MKHALT
P32	18,8	ANEMONE ROUGE	OULAD I3ICH
P33	19	RIEN	OULAD I3ICH
P34	20,3	CAMOMILLE	OULAD I3ICH
P35	22,7	ORGE	OULAD I3ICH
P36	20,1	BLE	OULAD I3ICH
P37	25,6	BETRAVE	OULAD YOUSSEF

P38	25,8	RIEN	OULAD YOUSSEF
P39	25,8	ORGE	OULAD YOUSSEF
P40	27,2	LUZERNE	OULAD YOUSSEF
P41	28,3	BLE	OULAD YOUSSEF
P42	32	BLE	OULAD SAID L'OUED
P43	30,3	CAMOMILLE	OULAD SAID L'OUED
P44	33,6	CAMOMILLE	OULAD SAID L'OUED
P45	33,1	CAMOMILLE JAUNE	OULAD SAID L'OUED
P46	33	BLE	OULAD SAID L'OUED
P47	33,3	BETTRAVE	OULAD AMAR
P48	35,7	LUZERNE	OULAD AMAR
P49	32,7	RIEN	OULAD I3ICH
P50	35,9	RIEN	OULAD I3ICH
P51	34,3	SESAME	OULAD I3ICH
P52	33,1	LUZERNE	BOST
P53	35,9	ORGE	AGHZAR
P54	32,8	OLIVE	SIDI RAHOU
P55	34,3	OLIVE	HARBOULIYA
P56	35,7	BLE	HARBOULIYA
P57	47,5	SANS	BENI MELLAL
P58	22,4	BETTRAVE	BZAZA
P59	20,8	LOBYA	BZAZA
P60	20,9	ORANGE	BZAZA
P61	22,8	ORGE	BZAZA
P62	21,5	FASA	BZAZA
P63	22,6	ORGE	BZAZA
P64	20,8	ORGE	BZAZA
P65	22,6	BARSIM	BZAZA
P66	22,2	ORGE	BZAZA
P67	23,3	ORGE	BZAZA
P68	23,2	ORGE	BZAZA
P69	24,8	ORGE	BZAZA
P70	26,8	SANS	BZAZA
P71	26,2	SANS	LKAMOUN
P72	29,8	ORGE	LKAMOUN
P73	32,7	BETTRAVE	LKAMOUN
P74	31	ORGE	LKAMOUN
P75	29	ORGE	LKAMOUN
P76	31,7	ORGE	LKAMOUN
P77	30,4	ORGE	AIT RWADI
P78	30,9	ORGE	AIT RWADI
P79	31,4	ORGE	ELKSSIBA
P80	32,5	ORGE	ELKSSIBA
P81	32,1	ORGE	ELKSSIBA

P82	31,8	ORGE	FARYATA
P83	33,7	OLIVE	ADOUZ
P84	36,3	OLIVE	ADOUZ
P85	35,2	ORGE	MAJAT/MGHILA
P86	26,2	ORGE	ZAWIT CHIKH
P87	24,6	ORGE	ZAWIT CHIKH
P88	22,5	ORGE	ZAWIT CHIKH
P89	23,9	BLE	ZAWIT CHIKH
P90	23,9	FLEUR JAUNE	ZAWIT CHIKH
P91	24	BLE	ZAWIT CHIKH
P92	26,1	FASA	ZAWIT CHIKH
P93	31,2	FASA	TARDA
P94	26,7	BOUR	TARDA
P95	31,4	FASA	AIROPORT
P96	32,5	LOBYA BLANC	AIROPORT
P97	31,4	LOBYA BLANC	AIROPORT

Annexe 5

Données granulométrique pour les échantillons des sols dans la partie Nord-Est de la Plaine de Tadla

ECH	Argile	Limon fins	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Texture
P1	30	21,5	16,5	20,7	11,8	Limono argileux
P2	42,3	19,5	12,2	15,4	11,2	argileux
P3	25,3	18,5	11,5	35,6	8,6	Limoneux
P4	16,2	8,5	3	54,4	18,4	limoneux sableux
P5	47,5	12	17,2	19,1	3,2	argileux
P6	44	14,5	19,8	18,4	3,3	argileux
P7	49,5	18,2	8	20	4	argileux
P8	54,2	14	7,5	18,5	5,2	argileux
P9	51,5	9,5	8,8	23,8	5,7	argileux
P10	37,3	7	7,2	33,6	14,3	argileux
P11	37,7	11,5	7,3	27,8	16,6	Limono argileux
P12	50,3	12,7	6,8	23,7	7	argileux
P13	63,5	11	5,5	15	4,1	argilo argileux
P14	36,3	16	8,8	26,1	13,2	Limono argileux
P15	41,3	14,3	12,8	22,6	9,8	argileux
P16	54,5	19,2	5,3	17,1	3,9	argileux
P17	53,2	18,8	4,2	19,9	4,5	argileux
P18	53,2	17,3	5	18,1	5,6	argileux
P19	40,5	23,5	10,5	21,2	4,3	argileux
P20	48,7	22,8	10	13,9	5	argileux
P21	31,3	22,7	7,5	25,5	12,2	Limono argileux
P22	41	20,3	10,2	19	10,3	argileux
P23	36,2	19,5	9,8	26,3	8,9	Limono argileux
P24	34	21,3	11,2	22,7	11,1	Limono argileux
P25	41,3	17,5	11,3	21,9	8,1	argileux
P26	43	16	11	24,3	6,5	argileux
P27	42,5	20	9,5	21,1	5,9	argileux
P28	39,7	16,2	6	32,2	5,3	Limono argileux
P29	51	5,7	8	28,5	7,6	argileux
P30	43,5	9	7,2	29,2	11,5	argileux
P31	30	16,5	5,5	41,6	7,2	limono argilo sableux
P32	32,7	17,8	6	32,2	10,5	limono argileux
P33	30,2	23,3	9	28,5	9,8	limono argileux
P34	41,5	19,2	7,8	24,7	7,7	argileux
P35	41,3	10,5	8,3	3,9	8,6	argileux
P36	31	28,7	8	23	9,3	limono argileux
P37	37,5	14	7,8	34,3	6,9	limono argileux
P38	38	16,5	8,5	23,5	13,6	limono argileux
P39	18,3	5,2	3,3	52,8	20,9	limono sableux
P40	45,2	13	8,5	23,9	10	argileux
P41	41,8	13,5	9,5	26,8	8,4	argileux
P42	32,3	12,3	5	30	19,8	limono argilo sableux

P43	35	12,7	6	27,8	19,3	argilo argileux
P44	61	15	8,5	11,1	4,2	argilo argileux
P45	35,5	13,8	4,2	32,4	14,3	argileux sableux
P46	35	24,2	5,5	25,8	8,5	limono argileux
P47	54,5	12	8,8	17,3	8,2	argileux
P48	42,2	9,5	8,2	30,4	9,3	argileux
P49	38,5	19,5	10,5	23,7	7,9	limono argileux
P50	47,5	24	12,5	11	5	argileux
P51	38,2	19,3	8	30,1	4,9	limono argileux
P52	46	13	9,5	24,8	6,3	argileux
P53	32,5	14,5	11,8	29,6	11,6	limono argileux
P54	42,8	17,2	9,3	24,8	6,1	argileux
P55	46,5	18,7	10	20	4,8	argileux
P56	36	25,5	9,5	14,4	15,2	limono argileux
P57	33,5	23	8,7	17,3	18	limono argileux
P58	58,8	15,3	12,2	9,7	3,4	argileux
P59	40	13,5	7,7	30,9	7,6	
P60	51,8	18	7	19,6	3,3	argileux

Annexe 6

Valeurs de fond géochimique utilisé dans cette étude

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Fe
DYK20	0,695	20,858	31,288	46,584	41,717	16462,791
DYK60	1,08	28,086	38,888	30,246	52,931	19898,948
DYK100	0,753	21,095	28,629	45,203	50,477	15543,07
DYK140	1,118	44,51	46,97	87,23	50,325	26531,41
DYK180	1,209	9,669	15,712	15,712	67,681	6091,299
SHELL20	0,804	33,75	38,571	57,054	61,875	19091,234
SHELL60	0,93	30,694	32,554	27,904	51,157	18449,863
SHELL100	0,925	31,466	51,826	43,497	55,528	12920,435
SHELL120	0,944	19,818	25,48	33,973	34,917	11310,299
SHELL140	1,081	3,244	7,57	25,954	17,303	13606,415
SHELL180	0,789	27,629	26,839	44,995	44,206	13369,137
Cal-DYK	0,289	1,156	2,889	1,661	1,733	347,396
Cong-FST	1,158	7,48	12,111	9,529	17,9	1778,39
Trav-TAMG	0,426	5,224	4,051	2,559	15,672	609,827
PUIT	0,566	93,515	107,576	15,948	92,949	6111,051
moyenne	0,85113333	25,2129333	31,3969333	32,5366	43,7580667	12141,4377

Annexe 7

Tableau de calcul des poids pour les indicateurs de qualité utilisés

Pairwise comparisons	Colonne1	Colonne2	Colonne3	Colonne4	Colonne5	Colonne6	Colonne7	Colonne8	Colonne9	Colonne10	Colonne11	Colonne12
Item Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item Description	pende	CO	CEC	Ph	texture	salinité						
pende	1,00	0,2000	0,2000	0,2000	0,3330	0,3330						
CO	5,0000	1,00	1,0000	1,0000	0,3330	0,3330						
CEC	5,0000	1,0000	1,00	1,0000	0,3330	0,3330						
Ph	5,0000	1,0000	1,0000	1,00	0,3330	0,3330						
texture	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,00	1,0000						
salinité	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,0000	1,00						
Sum	22,00	9,20	9,20	9,20	3,33	3,33						

Annexe 8

Données des paramètres physico-chimiques utilisés après normalisation par le test de Kaiser

Échantil-lons	Argile	Limon	Sable	pH	SOM	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
1	4,954196	5,285402	5,066089	3,247928	1,49057	2,467279	4,739848	8,274728	4,753284	7,496654
2	5,436295	5,031219	4,786596	3,263034	1,903038	1,070389	4,475085	6,990955	3,800123	6,044831
3	4,716991	4,954196	5,498251	3,232661	1,790772	0,773996	4,77926	6,533408	3,854993	6,160477
4	4,104337	3,643856	6,205549	3,185867	1,695994	0,545968	4,578939	6,006522	3,554589	5,755956
5	5,599913	4,916477	4,542258	3,201634	1,95977	0,704872	5,226123	6,229011	4,587965	7,427103
6	5,491853	5,141596	4,50462	3,217231	1,910733	0,575312	4,88655	5,897482	4,427606	7,199672
7	5,658211	4,765535	4,643856	3,185867	2,035624	0,83996	5,579241	4,826294	3,760221	6,397803
8	5,786596	4,491853	4,626439	3,217231	1,790772	0,831877	5,654493	5,378858	6,480427	7,875289
9	5,714246	4,270529	4,930737	3,217231	1,895303	0,739848	5,466953	5,189825	6,050502	7,93546
10	5,259272	3,925999	5,611763	3,247928	1,914565	0,739848	5,827819	5,121015	5,277985	7,37243
11	5,274262	4,307429	5,50462	3,217231	2,017922	0,765535	5,586465	4,986411	5,35931	7,450386
12	5,680887	4,357552	4,986411	3,185867	1,682573	0,918386	6,569704	4,499527	5,772941	8,421223
13	6,011227	4,129283	4,329124	3,201634	1,952334	0,765535	5,875043	4,642702	5,62293	7,543805
14	5,221104	4,689299	5,332708	3,247928	1,157044	0,782409	5,827819	4,635174	5,554896	7,472488
15	5,402586	4,812498	5,061776	3,217231	2,263034	0,831877	5,846243	4,635754	5,223809	7,304694
16	5,794416	4,672425	4,459432	3,217231	1,952334	0,713696	5,671859	4,321207	5,402245	7,245077
17	5,760221	4,584963	4,666757	3,185867	2,124328	0,321928	4,383359	3,469886	3,364572	4,308157
18	5,760221	4,542258	4,626439	3,185867	1,604071	0,321928	4,427606	3,430285	3,743084	4,048759
19	5,375039	5,129283	4,72792	3,169925	1,664483	0,475085	5,039138	3,926948	4,615887	5,896272
20	5,635174	5,078951	4,314697	3,232661	1,650765	0,704872	5,679199	4,275007	5,234578	7,086402
21	5,013462	4,963474	5,274262	3,217231	1,794936	0,214125	3,533563	2,223423	2,948601	4,638653
22	5,392317	4,97728	4,921246	3,201634	2,185867	0,765535	5,755689	4,466627	5,402586	7,23362
23	5,217231	4,921246	5,177918	3,247928	1,922198	0,516015	5,195348	4,099295	4,316146	7,220136
24	5,129283	5,066089	5,121015	3,217231	1,794936	0,454176	4,463361	3,629939	3,957915	6,538228

25	5,402586	4,8972 4	4,9541 96	3,2479 28	1,9523 34	0,9030 38	6,0671 65	4,4937 75	5,5861 64	8,0531 11
26	5,459432	4,8073 55	4,9909 55	3,2479 28	1,9259 99	0,6415 46	5,3056 06	4,3610 66	5,5291 96	7,1282 52
27	5,442943	4,9307 37	4,8073 55	3,2172 31	2,2868 81	0,3561 44	4,3805 91	3,3233 7	3,5655 97	4,4389 58
28	5,346957	4,5360 53	5,2667 87	3,2479 28	1,8359 24	0,6870 61	5,5698 56	4,6582 11	4,5879 65	7,1779 18
29	5,70044	3,8777 44	5,2133 47	3,1699 25	1,8196 68	0,3561 44	4,3052 41	3,6507 65	3,8021 93	5,0031 52
30	5,475733	4,1043 37	5,3819 75	3,2172 31	2,1921 94	0,4005 38	4,6046 64	3,5582 68	3,6769 44	5,1667 15
31	4,954196	4,5235 62	5,6380 74	3,2326 61	1,3895 67	0,7048 72	5,7015 49	3,5248 16	5,1272 21	6,5973 82
32	5,074677	4,6322 68	5,4495 61	3,2172 31	2,2539 89	1,3103 4	5,3298 41	5,2779 85	5,0548 48	3,6633 45
33	4,963474	5,0574 5	5,2964 57	3,2172 31	1,8797 06	0,6780 72	5,5756 15	6,4457 6	4,7650 04	5,0174 77
34	5,409391	4,8073 55	5,0574 5	3,2479 28	1,7739 96	1,1505 6	3,5397 79	7,6431 35	3,6926 5	6,9068 91
35	5,402586	4,3074 29	3,7548 88	3,2016 34	2,1795 11	1,1699 25	0,5655 97	7,7898 6	0,6780 72	6,8417 22
36	5	5,2364 93	5,0574 5	3,2326 61	2,0321 01	1,0071 96	3,1193 56	7,4910 51	4,8001 23	5,4422 8
37	5,266787	4,5109 62	5,3991 71	3,2326 61	1,7092 91	1,1110 31	2,6182 39	7,6337 22	3,3798 98	6,9176 7
38	5,285402	4,7004 4	5,2517 19	3,2479 28	1,5849 63	1,1570 44	1,4276 06	7,8259 13	3,7004 4	7,1848 75
39	4,270529	3,2479 28	6,2230 36	3,2479 28	1,1375 04	1,0976 11	3,2125 69	7,7747 87	2,4329 59	6,8137 81
40	5,529821	4,4918 53	5,1251 55	3,2016 34	1,8032 27	1,1699 25	1,2016 34	7,9454 44	3,5509 01	7,4144 74
41	5,419539	4,5849 63	5,1779 18	3,2172 31	1,7782 09	1,1440 46	1,4750 85	7,9909 55	1,7484 61	6,3137 9
42	5,05745	4,1937 72	5,6667 57	3,2630 34	1,4059 92	1,0635 03	1,8757 8	7,8654 24	0,7136 96	6,9448 58
43	5,169925	4,3001 24	5,5879 65	3,2172 31	1,9671 69	1,2016 34	1,6735 56	8,0067 47	1,7180 88	7,5196 36
44	5,954196	4,6147 1	4,0268	3,2326 61	1,6040 71	1,2326 61	2,9486 01	7,9926 55	2,3045 11	7,5360 53
45	5,189825	4,2479 28	5,5759 17	3,1858 67	1,6825 73	1,2448 87	3,3059 71	8,0465 78	2,1009 78	7,6646 25
46	5,169925	4,9401 67	5,1415 96	3,2172 31	2,2172 31	1,2630 34	3,1110 31	8,1064 32	2,3673 71	7,6617 78
47	5,794416	4,4462 56	4,7279 2	3,2172 31	2,6111 72	1,2630 34	3,3476 66	8,0885 23	2,2448 87	7,6639 14
48	5,432959	4,2249 66	5,3469 57	3,1699 25	2,2809 56	1,2750 07	3,5692 48	8,0736 06	1,2809 56	7,6858
49	5,303781	4,9541 96	5,0268	3,1043 37	2,0496 31	1,2809 56	3,2234 23	8,1878 47	0,7570 23	7,7238 32
50	5,599913	5,2288 19	4,0874 63	3,2172 31	2,4195 39	1,2868 81	3,6982 18	8,0752 12	2,3190 4	7,6752 51
51	5,292782	4,8227 3	5,1699 25	3,2172 31	2,5084 29	1,2809 56	3,5728 9	8,0730 7	2,2630 34	7,6745 45
52	5,554589	4,5545 89	5,0045 01	3,1538 05	2,1210 15	1,2927 82	3,6859 4	8,0709 26	2,2898 34	7,6990 52
53	5,066089	4,7708 29	5,3991 71	3,2172 31	2,0806 58	1,2809 56	3,5310 69	8,1644 04	0,7739 96	7,7210 99
54	5,452859	4,7813	4,9954	3,1699	2,1763	1,2809	3,0652	8,2393	0,8073	7,7353

		6	85	25	23	56	28	6	55	87
55	5,569856	4,8923 91	4,6892 99	3,2172 31	2,2660 37	0,5160 15	7,3416 3	8,1375 04	6,0533 29	8,4441 87
56	5,209453	5,1699 25	4,9354 6	3,2326 61	1,9671 69	0,1110 31	6,8899 6	8,0295 63	8,6766 62	9,4793 76
57	5,108524	5,0312 19	5,1818 98	3,2172 31	2,2927 82	0,4541 76	6,8960 3	8,1006 62	6,5033 49	7,8112 14
58	5,902074	4,8328 9	3,8176 23	3,2016 34	2,3757 35	0,1110 31	6,7441 61	8,0826 81	7,9188 63	9,1741 77
59	5,357552	4,4724 88	5,3037 81	3,2479 28	1,7865 96	1,2750 07	1,6415 46	8,2867 89	1,7398 48	7,7066 69
60	5,722466	4,7004 4	4,5545 89	3,2172 31	1,8953 03	1,2690 33	1,3617 68	8,2844 77	1,5008 02	7,6731 32