

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des Sciences de la Terre

*Institut national de la recherche
agronomique – Rabat*



المعهد الوطني للبحث الزراعي
Institut National de la Recherche Agronomique

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement



Etude de l'effet du fumier de bovin sur les propriétés physico-chimiques, la fertilité et dans la réduction de la salinité des sols sableux irrigués avec des eaux salines

Par :

Hajar BENMAZHAR

Sous la direction du :

Dr. A. ZOUAHRI (INRA-Rabat)
Pr. B. IGMOLLAN (FST-Marrakech)

Soutenu le 21 septembre 2012 devant la commission d'examen composée de :

Pr. B. IGMOLLAN	FST-Marrakech
Pr. A. RHOJJATI	FST-Marrakech
Pr. L. DAOUDI	FST-Marrakech
Dr. A. ZOUAHRI	INRA-Rabat

2011/2012

Dédicace

« La science doit s'accommoder à la nature. La nature ne peut s'accommoder à la science. »

(Ferdinand Brunot, extrait de la pensée et la langue)

Comme symbole d'une profonde reconnaissance et d'une gratitude égale, je dédie ce modeste travail :

*À ma mère **Aïcha EL HAOURANI** qui, par son don de soi et d'amour éternel, m'a donné la force d'exister, la volonté d'avancer et la joie de vivre.*

*À mon père **Lahcen BENMAZHAR** qui, par son exemple constant de courage et de persévérance, m'a appris le sens et la valeur du travail.*

*À mon frère **Oussama**. À mes Chères tantes **Rabïaa** et **Khadija** et à mes oncles **Khalid**, **Abdessadek**, **Driss** et **Hicham** pour leur soutien et encouragements continus.*

À toute ma famille, mes amis, et à tous ceux et celles qui ont façonné la trame de mon quotidien.

Remerciement

La rédaction du présent mémoire me donne le privilège et l'opportunité de remercier très sincèrement les personnes qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

*Mes premières pensées et ma reconnaissance la plus profonde se tournent vers le responsable du centre régional de la recherche agronomique de Rabat, **Mr. Mohamed ABDERABIHI** qui m'a bien accueilli au sein de son centre, en m'accordant un stage au département du milieu physique. Je le remercie aussi pour sa gentillesse et son soutien.*

*Mes profonds remerciements vont à Mon encadrant de stage, **Mr. Abdelmjid ZOUAHRI**, Coordinateur de l'unité de recherche sur l'environnement et la conservation des ressources naturelles. Il a conduit ce stage d'une haute compétence et grande disponibilité. J'ai particulièrement été impressionné par ses qualités scientifiques et humaines ainsi que par sa patience et la rigueur avec lesquelles il a mené à bien ce travail.*

*Mes remerciement s'étendent également à mon encadrant, **Mr. Brahim IGMOULLAN**, professeur à la faculté de sciences et techniques de Marrakech. Sa gentillesse, sa disponibilité incessante, son aide et ses conseils précieux et avisés m'ont été d'une grande utilité.*

*Je tiens à témoigner ma reconnaissance, et ma gratitude à **Mr. Ahmed DOUAIK** et **MR. M'hamed EL KHADIR**, des ingénieurs en chef au CRRA. Leur gentillesse et leur rigueur scientifique m'ont été d'une aide précieuse.*

*Je tiens aussi à remercier **Mr. Ali RHOUJJATI** et **Mr. Lahcen DAOUDI**. L'honneur que vous me faites de bien vouloir juger ce travail est l'occasion de vous témoigner de mon profond respect et de ma reconnaissance.*

Mes remerciements sont également adressés aux techniciens des laboratoires du milieu physique ainsi qu'aux personnels du CRRA pour leur gentillesse et leur disponibilité à rendre le service.

Je voudrais aussi remercier les professeurs du département des sciences de la terre de la FSTG qui m'ont permis de contempler des univers intellectuels à la fois variés et passionnants. Soyez assurés de ma profonde reconnaissance.

Résumé

Notre travail a pour but d'étudier l'effet de la matière organique dans la réduction de la salinité des sols irrigués avec des eaux salines. Cette étude a été réalisée dans la région de Skhirat caractérisée par une activité maraichère intense exploitant des eaux d'irrigation salines. Pour cette fin, nous avons opté pour un bloc aléatoire complet à 3 répétitions, renfermant 12 parcelles élémentaires. Chaque bloc de l'essai reçoit quatre doses différentes du fumier de bovins 0 ; 20 ; 40 et 60 t/ha.

L'étude a montré un effet hautement significatif de la matière organique dans la réduction de la salinité des sols. Cet effet touche aussi la majorité des propriétés physico-chimiques du sol à savoir le pH, l'humidité équivalente, la capacité d'échange cationique, les cations échangeables (calcium, magnésium, sodium et potassium) ainsi que la fertilité du sol et son rendement. Les meilleurs résultats sont obtenus avec la plus grande dose de matière organique, soit 60 t/ha (D3).

Ainsi nous avons noté une diminution de la conductivité électrique du sol de 0,77 à 0,16 dS/m ainsi qu'une augmentation de l'humidité équivalente de 3,58 à 16,89 %. La capacité d'échange cationique a augmenté de 8,60 à 15,92 meq/100g de sol et le sodium échangeable a diminué notablement en passant de 7,44 à 1,38 %.

Par ailleurs nous avons noté une amélioration de la fertilité du sol et du rendement de la pomme de terre enregistrant 35 t/ha pour D0 et 63 t/ha pour D3.

Mots clés: Matière organique, salinité, sol sableux, eaux salines, propriétés physico-chimiques, fertilité, rendement, Skhirat.

Abstract

Our work aims on studying the effect of organic matter in reducing the salinity of soils irrigated with saline water. This study has been done in the Skhirat's area characterized by intense truck farming activities which are irrigated with saline water. For this purpose, we picked a randomized complete block with 3 replications, containing 12 basic plots. Each block receives four different doses of a farmyard cattle manure 0; 20; 40 and 60 t / ha.

The study showed a highly significant effect of organic matter in reducing the soil salinity as well as in ameliorating the majority of its physico-chemical properties (pH, moisture equivalent, cation exchange capacity, exchangeable cations), its fertility and crop yield. The best results are obtained with the highest dose of organic matter which is 60 t / ha (D3).

Based on our experimental results, we noted a decrease in the electrical conductivity which goes from 0.77 to 0.16 dS / m. An increase in the soil moisture equivalent from 3.58 to 16.89%. The cation exchange capacity increased from 8.60 to 15.92 meq /100g as the exchangeable sodium decreased significantly going from 7.44 to 1.38%.

Furthermore, we noticed an improvement in the soil fertility and its potato yield which scored about 63 t/ha for D3 and only 35 t/ha for D0 .

Key words: Organic matter, salinity, sandy soil, saline water, physic-chemical properties, fertility, yield, Skhirat.

Liste des abréviations

C : Carbone

CE : Conductivité Electrique

CEC : Capacité d'échange cationique

CT : Centre technique d'agriculture

D : Dose

ESP : Pourcentage de Sodium Echangeable

FAO : *Food and Agriculture Organization*

M.O : Matière Organique

M.O.F : Matière organique fraiche

MS : Matière sèche

OMS : Organisation mondiale de la santé

SAR : Coefficient d'Absorption de Sodium

SEEE : Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement

TDS : Total des sels dissous

Sommaire

<i>Dédicace</i>	<i>I</i>
<i>Remerciement</i>	<i>II</i>
<i>Résumé</i>	<i>III</i>
<i>Abstract</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>V</i>
Sommaire	1
Introduction générale	5

Chapitre I : Présentation de la zone

I.1. Cadre géographique	8
I.2. Climat	9
I.2.1. Température.....	9
I.2.2. Evaporation	9
I.2.3. Pluviométrie	9
I.3. Cadre géologique et hydrogéologique	10
I.3.1. Géologie.....	11
I.3.2. Hydrogéologie.....	11
I.4. Pédologie	12
I.5. Maraîchage.....	13

Chapitre II : Etude bibliographique

II.1. Salinité des eaux d'irrigation.....	15
II.2. Salinité des sols.....	17
II.2.1. Facteurs naturels d'accumulation des sels	18
II.2.2. Facteurs anthropiques	20
II.3. Effet de la salinité sur le sol et le végétal	22
II.3.1. Effet de la salinité sur le sol	22
II.3.2. Effet de la salinité sur le végétal	22
II.4. Solutions pour lutter contre la salinisation des eaux d'irrigation et des sols	23
II.4.1. Dessalement des eaux saumâtres	23
II.4.2. Solutions pour lutter contre la salinisation des sols	24
a) Riziculture irriguée	25

b) Drainage profond	25
c) Lutte contre les remontées capillaires	25
d) Lutte contre la concentration des sels	25
e) Eviter les apports d'eau excessifs	26
f) Réduire l'évaporation	26
g) Utilisation de variétés tolérantes à la salinité	26
h) Traitements chimiques	27
i) Ajout de la matière organique avec ou sans le gypse	28
II.5. Généralités sur la matière organique (M.O)	28
II.5.1. Origines de la matière organique	29
II.5.2. Principaux constituants de la matière organique	30
II.5.3. Evolution de la matière organique	30
a) Minéralisation primaire (M1)	31
b) Humification (H)	31
c) Minéralisation secondaire (M 2)	31
II.5.4. Actions de la matière organique sur les propriétés du sol	31
II.5.5. Actions de la matière organique sur les propriétés physiques du sol	32
II.5.6. Actions de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol	32
II.5.7. Actions de la M.O sur les propriétés biologiques du sol	33

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Protocole expérimentale	35
III.1.1. Dispositif expérimental	35
III.1.2. Irrigation de la parcelle.....	36
III.2. Méthodes de prélèvement	36
III.2.1. Prélèvement d'eau	36
III.2.2. Prélèvement du sol	37
III.2.3. Prélèvement du fumier de bovin (M.O)	38
III.3. Analyses au laboratoire	38
III.3.1. Analyse de l'eau	39
a) Conductivité électrique	39
b) pH de l'eau	39
c) Bilan Ionique	40
III.3.2. Analyse du sol	40
a) Préparation d'échantillons	41
b) Granulométrie	41

c) pH du Sol	42
d) Conductivité Electrique	42
e) Azote	43
f) Phosphore	43
g) Bases échangeables	43
h) Capacité d'échange cationique	43
i) Matière Organique	44
j) Humidité équivalente	44
k) Pourcentage du sodium échangeable	44
III.3.3. Analyse du fumier	45
a) Détermination des cendres	45
b) Dosage des éléments	45
III.3.4. Analyse des données	45
a) Analyse de la variance	46
b) Test de Dunnett	46
c) Test de corrélation	46

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Caractérisation de l'eau d'irrigation, sol et fumier utilisés	48
IV.1.1. Eau d'irrigation	48
IV.1.2. Sol.....	48
IV.1.3. Fumier de bovin	50
IV.2. Résultats et interprétations d'analyses du sol durant l'expérimentation	51
IV.2.1. Effet de la M.O sur la salinité du sol	51
a) Matière organique (M.O)	53
b) Conductivité électrique (CE).....	56
c) Relation entre la M.O et la salinité du sol	58
IV.2.2. Effet de la M.O sur les propriétés physico-chimiques du sol.....	60
a) Humidité équivalente	63
b) pH	65
c) Capacité d'échange cationique	67
d) Pourcentage de sodium échangeable	69
e) Sodium	70
f) Potassium	72
g) Calcium	74
h) Magnésium	76
i) Relation entre la M.O et les paramètres physico-chimiques du sol.....	77
IV.2.3. Effet de la M.O sur la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre	79
a) Potassium (K ₂ O)	80
b) Phosphore (P).....	82
c) Rendement de la pomme de terre	85
d) Relation entre la M.O, la fertilité, le rendement et la salinité du sol.....	85

Conclusion et recommandations	88
Références Bibliographiques	91
Liste des tableaux	95
Liste des figures	97
Liste des photos	98
Annexes	99

Introduction générale

Le Maroc est un pays essentiellement aride et désertique. En effet 93% du territoire national se situe dans les étages bioclimatiques semi-aride, aride et désertique tandis que seul 7 % de sa superficie totale, soit 71 millions d'ha, présente un climat subhumide à humide. (*Debbarh et Badraoui, 2002*).

À l'instar des zones à déficit hydrique chronique, l'irrigation au Maroc et en vue d'assurer sa survivance, doit braver la ténacité du climat, en tirant constamment profit des richesses hydrauliques naturelles. Des ressources superficielles et souterraines dont la qualité, autrefois bonne, se trouve actuellement menacée par diverses sources de pollution ; ponctuelle comme diffuse. Les eaux de surface sont menacées par les phénomènes d'envasement et d'eutrophisation. L'agriculture intensive en zones irriguées est pour sa part responsable de la pollution diffuse et de la détérioration de certains paramètres de qualité des sols. Cette intensification s'est accompagnée d'une surexploitation irréfléchie des eaux souterraines, d'un emploi exorbitant d'intrants agro-chimiques et d'une mauvaise maîtrise de l'irrigation et du drainage. En conséquence les problèmes de pollution nitrique, de salinisation et de sodification des sols ne cessent de prendre de l'ampleur, notamment dans la zone de Skhirat qui est l'une des zones maraîchères les plus importantes dans la Région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaer.

Dans cette zone, la surexploitation de la nappe accouplée au faible taux de précipitations, se trouvent à l'origine de l'intrusion marine. Un phénomène souvent quasi-irréversible qui a pour conséquence l'augmentation de la salinité des eaux. Dans le but d'atténuer son impact sur les périmètres encore non salés de la région, on peut soit emprunter la voie du dessalement dont le coût s'avère très onéreux, soit traiter le sol par voie chimique et/ou organique afin de ralentir voire éliminer sa salinisation.

C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail qui consiste à étudier l'effet de l'ajout de la matière organique, à un sol irrigué par des eaux salines, dans la réduction de sa salinité.

Pour ce faire, un suivi des paramètres physico-chimiques des sols a été réalisé sur une parcelle -cultivée en pommes de terre-, située dans la zone de Skhirat. Le périmètre d'étude a été choisi en fonction de l'objectif de notre sujet, visant la présence de terrain agricole irrigué avec les eaux salines de la nappe de Skhirat.

Le premier chapitre de ce travail présentera la zone d'étude.

Dans le deuxième chapitre nous introduirons quelques généralités sur la salinité des eaux et des sols, son effet sur ce dernier et sur le végétal ainsi que quelques solutions pour lutter contre ce problème.

Dans le troisième chapitre nous signalerons brièvement les différentes techniques expérimentales que nous avons été amenés à mettre en œuvre.

Le quatrième chapitre de cette étude abordera le cœur de notre problématique, soit l'étude de l'effet de la matière organique dans la réduction de la salinité d'un sol de la région de Skhirat, irrigué avec des eaux salines.

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Cadre géographique

La zone de Skhirat, qui fait partie de la meseta côtière, est limitée par l'oued Ykem au Nord-Est et l'oued Cherrat au Sud. Elle est située à 25 Km de Rabat (Fig. 1) est caractérisée par de fortes activités maraîchères, basées sur l'irrigation à partir des eaux souterraines. La zone d'étude est située à 8,4km au Nord-Est de la ville de Skhirat.



Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

I.2. Climat

La zone d'étude, qui fait partie de la région de Rabat-Zemmour-Zaïers, est entourée de cinq stations pluviométriques. La station Rabat-Salé-Aéroport demeure la plus représentative du climat de la région, en raison des longues durées d'observations effectuées aussi bien pour la pluviométrie que pour la température.

I.2.1. Température

La zone littorale de Rabat se caractérise par une température moyenne annuelle de l'ordre de 17,5°C à 17,6°C. Ainsi, l'influence tempérante de la masse océanique se traduit par des températures minimales mensuelles extrêmes de l'ordre de 10°C à 12°C seulement pendant la période fraîche hivernale et de 20°C à 24°C au cours des périodes sèches et chaudes estivales avec des maxima extrêmes ne dépassant que très rarement 32°C. Les températures moyennes mensuelles sont régulièrement croissantes en été et décroissent régulièrement en hiver.

I.2.2. Evaporation

Suite aux fortes chaleurs estivales et à l'accroissement des températures, les évaporations mesurées sont assez fortes dans toute la région. Ceci se traduit par un déficit hydrique des bas plateaux à plus de 350 mm par an au minimum, soit plus que les valeurs calculées des précipitations moyennes annuelles. Ce déficit n'est que très faiblement compensé par l'humidité relative de l'air sur une bande large de 2 à 3 kilomètres seulement, tout au long du littoral atlantique.

I.2.3. Pluviométrie

Les précipitations moyennes annuelles de la région sont supérieures à 580 mm. Les précipitations maximales moyennes annuelles enregistrées au cours de ces trois dernières décennies atteignent plus de 800 mm sur les zones littorales et continentales élevées. Les précipitations moyennes minimales y atteignent, certaines années, moins de 250 mm.

Pendant la période d'essai, la pluviométrie a été très variable avec une valeur minimale de 6mm en mois de Mars et une valeur maximale de 73,5 mm en mois d'avril, soit le mois le plus pluvieux de toute la période d'essai (Fig. 2).

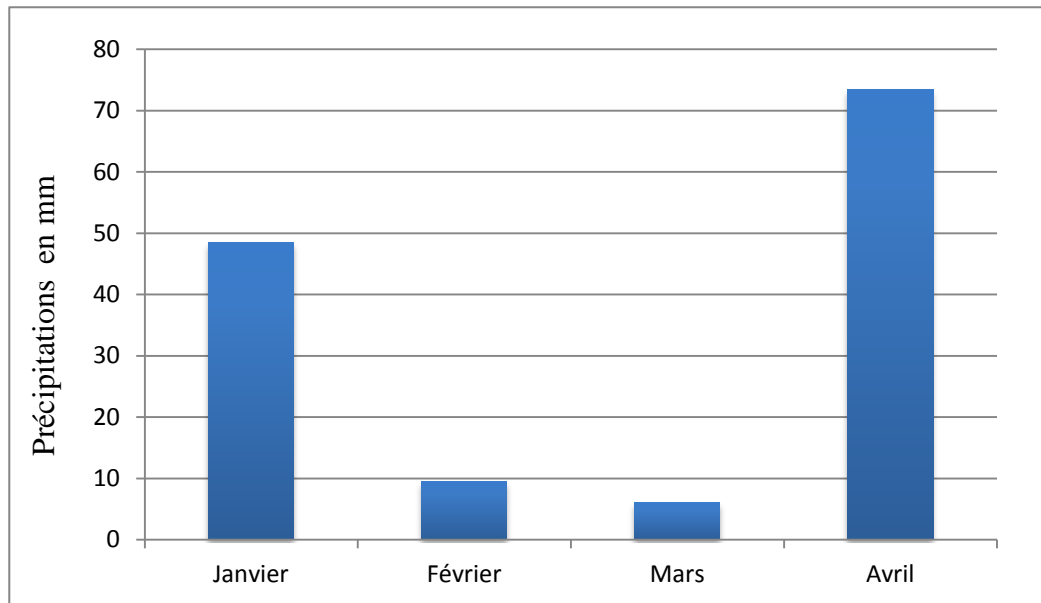


Figure 2 : Pluviométrie observée dans la région de Skhirat durant la période allant du mois de janvier 2012 au mois d'avril 2012 (*CT de Skhirat*)

I.3. Cadre géologique et hydrogéologique

L'essentiel des données, reportées dans ce paragraphe du cadre géologique et hydrogéologique de la région d'étude, ont été dégagées des travaux menés dans la région de la Meseta côtière, sub-tabulaire qui comprend toute la zone littorale, sur une profondeur d'environ 50 km. (*Ressources en Eau du Maroc, Hydrogéologie du Maroc, 1975*). La zone de Skhirat fait partie de la Meseta côtière qui se présente sous un ensemble de bas plateaux inclinés vers le littoral.

I.3.1. Géologie

La lithostratigraphie de la région de Skhirat s'individualise par deux principales formations (*Ressources en Eau du Maroc, Hydrogéologie du Maroc, 1975*):

-Formations primaires : surtout schisteuse, gréseuse et quartzitiques, mais également parfois calcaires, granitiques et basaltiques.

-Formations Mio-Plioquaternaire : se sont des formations récentes d'âge Miocène et plioquaternaire plus ou moins abondantes selon les endroits, ces formations sont subhorizontales transgressives sur le Primaire pénéplanisé, c'est une couverture néogène qui joue un rôle primordial dans l'hydrologie de la Meseta primaire. Le miocène est présenté par des marnes bleues, des mollasses et du calcaire, ce sont des dépôts qui se déposent sur les grès et les schistes du dévonien et du carbonifère. Le plio-quaternaire est constitué des dépôts de sables, de poudingues, du gravier et du calcaire détritique marins qui viennent se déposer sur les marnes du Miocène.

I.3.2. Hydrogéologie

La Meseta primaire, qui s'étend depuis l'Océan jusqu'aux chaînes du Moyen Atlas est constituée de deux parties l'une au relief accidenté appelé le massif du Maroc Central et l'autre appelé la Meseta côtière subtabulaire dont notre secteur d'étude fait partie. La caractérisation hydrogéologique des différents terrains de la Meseta primaire, se distingue comme suit :

-Terrains primaires : D'une façon générale, les terrains paléozoïques sont imperméables ou seulement très peu perméables. Seuls les calcaires pourraient à la rigueur fournir des niveaux véritablement aquifères mais ils sont assez rares et leur alimentation est très limitée. Les schistes forment ainsi la majeure partie de la Meseta, le reste étant constitué de grès et surtout de quartzites.

-Les terrains néogènes et quaternaires : On parle généralement des calcaires miocènes et des grès calcaires du plioquaternaire. La Meseta côtière, surbaissée, a été le siège de transgressions miocènes et pliocènes plus ou moins étendues, en couverture sur le substratum primaire. Ces transgressions jouent, alors, un rôle très important au point de vue hydrogéologique, du fait de leur perméabilité et de leur porosité, en général, excellentes.

I.4. Pédologie

Les principales unités pédologiques ont été déterminées par Ghanem (1974). Les sols qui caractérisent la région sont présentés suivant le système français de classification comme suit :

-Sols minéraux bruts et sols peu évolués : Ces sols très peu différenciés ont une texture très sableuse et calcaire. Les sols peu évolués d'érosion sont largement répandus sur les hauts plateaux des Zaers, notamment au Sud-Ouest de la région et sur les versants des vallées, des gorges, des horsts et des interfluves des bas plateaux. Les sols peu évolués d'apport alluvial (dhess) occupent de faibles superficies dans la région et s'observent en vastes étendues à hauteur des cours moyens des oueds Grou, Bouregreg à l'Est et des oueds Maleh, Dir, Zamrine à l'Ouest ; quand ces rivières traversent les terrains tendres triasiques ou encore à leur embouchure.

-Vertisols : Ils sont représentés en trois ensembles selon leurs roches mères. Les vertisols sur basalte doléritique et argile rouge triasique, répartis sur les versants des vallées larges : dépression de Rommani-Maaziz, vallées des oueds Maleh, Zamrine et Dir et de leurs confluent. Les vertisols sur molasses calcaires miocènes, répartis sur les plateaux de Rommani-Merchouch. Les vertisols sur calcaire dur (pliocène) : répartis sur les plateaux des Oulad Ziane, El Gara (Est) et sur quelques placages calcaires disséminés sur les hautes surfaces villafranchiennes.

-Sols brunifiés : Sols sous forêt des hauts plateaux Zaers et sols répartis sur les versants de vallée recouverts de mattorals ou d'ermes denses. Ils occupent d'assez vastes étendues en unités complexes avec les sols fersiallitiques, notamment, sur les hauts plateaux des Zaers.

-Sols fersiallitiques : Suivant le matériau parental, on distingue : Les sols sur calcaire dur miocène et pliocène, répartis en bordure des plateaux calcaires miocènes de Rommani-Merchouch, au Sud du plateau calcaire pliocène de Benslimane ou encore sur les calcaires gréseux plio-quadernaires (Moghrébien) du plateau des Oulad-Ziane et d'El Gara. Les sols sur grès calcaire dunaire qui se présentent en trois grands ensembles : sols répartis sur les formations de Témara et des Sehouls. Sols de l'arrière pays de Mohammédia. Sols formés sur les cordons dunaires grésocalcaires, répartis sur les plateaux de Benslimane et de Bouznika.

-Sols hydromorphes : C'est une classe de sols dont l'évolution est dominée par la présence d'eau saturant la totalité des pores de la plus grande partie du profil pendant une période de l'année. En effet, dans la formation de Mohammedia, ils se présentent sur les sillons et plates-formes inter dunaires tandis que dans la formation de Temara, ils sont répartis à l'Est de la forêt de Temara et aussi sur les Sehouls au Nord-Est de la région. On les rencontre aussi dans la formation des cordons dunaires entre les oueds Ykem et Nfifikh (plateau de Benslimane, Bouznika) et ils présentent des caractères analogues à ceux de la formation de Mohammedia.

I.5. Maraîchage

L'activité agricole dans la région de Skhirat contribue dans la production nationale. Le maraichage avec 2% est caractérisé par la production de haricot vert, la pomme de terre, la tomate plein champ, le piment, le concombre, la courgette, la carotte et le chou (Fig. 3). Dans notre expérimentation, le sol était cultivé par la pomme de terre qui est une culture très exigeante à la fois en phosphore et en potasse.

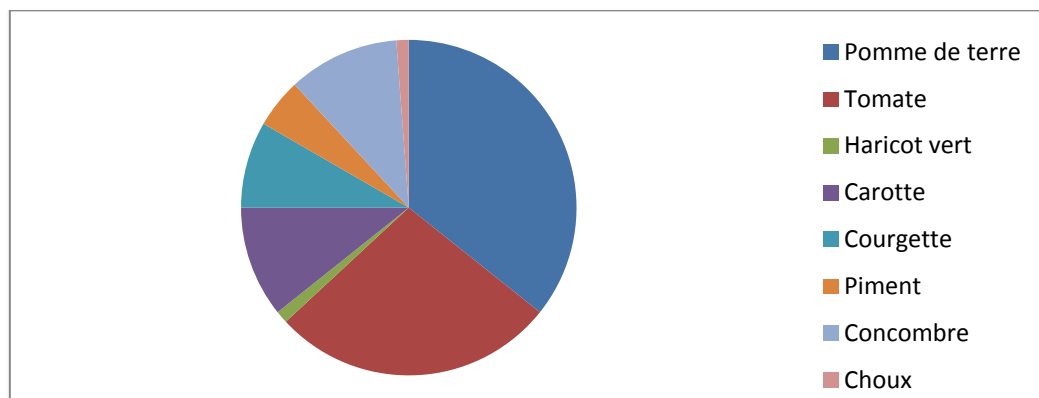


Figure 3 : l'implantation dans la région de Skhirat en 2011-2012 (*CT de Skhirat*)

Chapitre II : Etude bibliographique

II.1. Salinité des eaux d'irrigation

La salinité est un des processus de dégradation des sols les plus largement répandus sur la Terre. Au Maroc, la salinisation touche près de 350 000 ha sur 1 000 000 ha des terres irriguées soit 35 % (*Badraoui et al., 1998*). Cette salinisation est considérée comme une cause majeure de désertification et constitue donc une forme grave de dégradation des sols. Ce problème de la salinisation au Maroc s'accroît avec l'augmentation des températures et de la réduction des précipitations, caractéristiques du climat aride et semi aride. La salinité peut constituer une gêne majeure au développement de la production agricole, et même, mener à la stérilité des sols. Elle peut être définie comme étant « la concentration de sels minéraux dissous présents dans les eaux et sols par unité de volume ou sur la base du poids (*Tanji, 1990*). Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines. Les nappes d'eau souterraines les plus fortement minéralisées sont la nappe de l'Chaouia côtière, Kert, Gareb, Bouareg, Beni Amir, et Tafilalet (Fig. 4) (*SEEE, 2000-2001*).

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs:

- La tolérance de la culture aux sels.
- Les caractéristiques du sol.
- Les conditions climatiques.
- Les procédures de gestion des sols et des eaux.

Cependant, l'irrigation irrationnelle conduite avec les eaux salées détériore et stérilise les terres en provoquant leur salinisation. La salinité peut se mesurer de deux façons, soit par les matières dissoutes totales (TDS) exprimé en mg/l ou, plus couramment, par la conductivité électrique. La conductivité électrique est exprimée en millisiemens/centimètre (mS/cm) (*Richard, 1954*). On peut classer les eaux d'irrigation en fonction de la salinité totale en cinq classes, on se basant sur le climat, la croissance des cultures, l'aménagement de l'irrigation, les propriétés du sol, etc (Tab. 1).

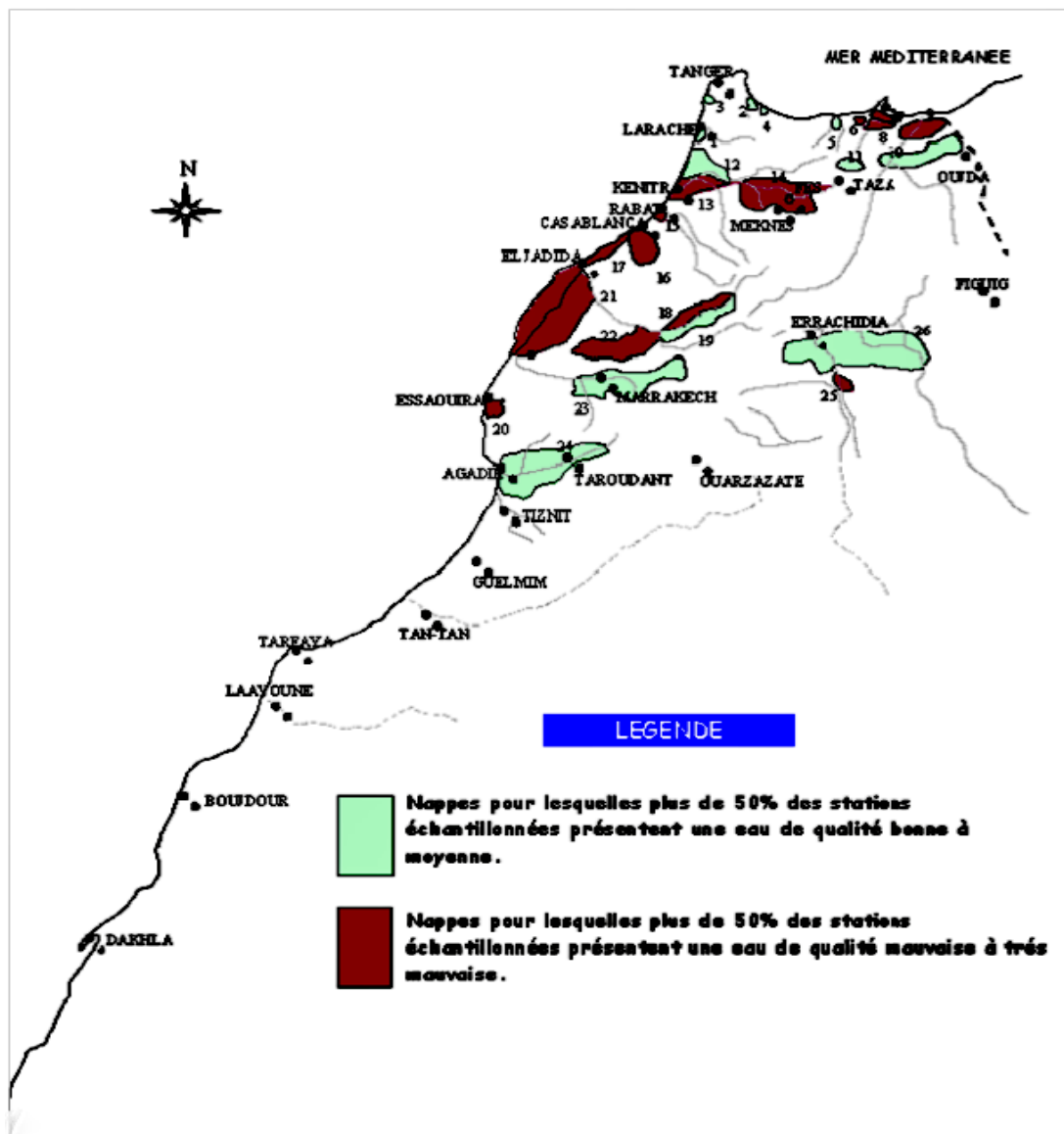


Figure 4 : Carte de classification des principales nappes phréatiques selon la qualité globale de leurs eaux (SEEE, 2000-2001)

Tableau 1: classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels, selon différentes sources.

Classe de salinité	USSL (1954) (CE dS/m)	Thorn and Peterson (1954) (CE dS/m)	Carter (1969) (CE dS/m)	Ayers and Westcot (1976) (CE dS/m)
C1	0.1 - 0.25	> 0.25	<0.4	<0.75
C2	0.25 – 0.75	0.25 – 0.75	0.4 – 1.2	0.75 – 1
C3	0.75 – 2.25	0.75 – 2.25	1.2 – 2.25	1.5 – 3
C4	> 2.25	2.5 – 4	2.25 - 4	>3
C5		4 - 6		

C1 : Satisfaisante pour toutes les cultures excepté les cultures très sensibles.

C2 : Généralement satisfaisante bien que quelques cultures sensibles seront affectées.

C3 : Satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats.

C4 : Normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées.

C5 : Non recommandée, eau à salinité excessive.

II.2. Salinité des sols

D'une façon plus générale, il y a salinité chaque fois que la présence des sels vient modifier la vie végétale ou les caractéristiques des sols. La salinisation est l'accumulation de sels hydrosolubles dans le sol. Ces sels sont le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le carbonate (CO_3^{2-}), l'hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et le sodium (Na^+). Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau. Quand l'eau s'évapore, les sels se déposent. En premier lieu, La source principale des sels dans le sol est les minéraux naturels de la croûte terrestre (*Bryssine, 1961*). En effet, la salinisation implique une accumulation de sel par les processus d'altération chimique, qui implique hydrolyse, hydratation, solution, oxydation et carbonatation, les sels sont libérés progressivement avant de subir une solubilisation. En second lieu, la salinisation est provoquée par des interventions humaines, telles que des pratiques d'irrigation inappropriées, par exemple avec de l'eau d'irrigation riche en sel et par un drainage insuffisant. Selon Lahlou et al., (2002), on différencie entre la salinisation primaire et la salinité secondaire :

-La salinisation primaire est liée à une présence naturelle relativement élevée de sels (à proximité des mers ou des océans, présence de dépôts de sels...).

-La salinisation secondaire est étroitement liée à l'irrigation. C'est la forme de dégradation la plus rapide dans les périmètres irrigués, c'est un processus de dégradation de la qualité des sols et des eaux qui s'auto-entretient lorsque les eaux de drainage ou de la nappe phréatique sont recyclées.

Concernant la classification des sols, à l'instar de celle des eaux d'irrigation, elle aussi est identifiée selon cinq classes (*Ayers et Westcot, 1976*) (Tab. 2).

Tableau 2: Classification des sols basée sur la concentration en sels (*Ayers et Westcot, 1976*)

Salinité (meq/100g)	Pâte saturée ms/cm	Qualité du sol	Classe
0 – 3	0-2	Non salin	C 1
3 – 6	2-4	Non salin	C 2
6 – 12	4-8	Salin	C 3
12 – 30	8-20	Très salin	C 4
>30	>20	Extrêmement salin	C 5

Les facteurs qui conduisent à une accumulation excessive de sels dans le sol peuvent être naturels ou anthropogènes.

II.2.1. Facteurs naturels d'accumulation des sels

-Invasion marine : Le phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par conséquent, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols à cause de la salinisation des eaux d'irrigation (*Morsli, 2007*). En effet, la remobilisation d'eau marine piégée lors d'intrusions marines est un phénomène qui contribue largement à la salinisation des nappes.

-Événement géologique : Les phénomènes géologiques peuvent augmenter la concentration en sel dans les nappes souterraines et par conséquent dans les sols. En effet, la

structure géologique du Maroc se caractérise par l'existence de trois grandes chaînes, axes tectoniques et orographiques majeurs, grossièrement parallèles qui traversent tout le pays. Cette structure est le facteur structural principal de l'établissement de l'endoréisme superficiel que l'aridité a contribué à maintenir (*Margat, 1961*).

-Infiltration : L'infiltration des eaux souterraines dans des zones se trouvant en-dessous du niveau de la mer, à savoir des micro-dépressions avec peu de drainage ou sans drainage provoquent une salinisation des ressources en eaux et en sols.

-Inondation : Les eaux d'inondation provenant des zones qui comportent des substrats géologiques libérant de grandes quantités de sels peuvent causer la salinisation des eaux et des sols.

-Climat : Les conditions d'aridité du climat et leurs conséquences hydrologiques sont les facteurs fondamentaux de la formation des eaux salines (*Margat, 1961*). En effet, plusieurs études ont montré que les climats arides, semi-arides et chauds sont ceux qui conviennent le mieux à la fois à la mobilisation et à l'accumulation des évaporites dans le sol. En effet, les zones arides et semi-arides sont caractérisées en particulier par :

- Un climat contrasté.
- Des températures très élevées.
- La rareté et la faiblesse des pluies.
- Des niveaux d'évapotranspiration très élevés.

Tous ces éléments réunis avec la nature du terrain indiquent l'inhibition de lixiviation des sels et l'accumulation de ces derniers en surface des sols (*Gaucher et Burdin, 1954*). On peut donc dire que sous un climat aride ou semi-aride, les sels peuvent circuler en "circuit fermé" grâce au jeu alterné du lavage des couches ou des horizons superficiels (mobilisation) et de la remontée capillaire (remobilisation et accumulation), donc le problème de la salinité est dynamique.

-Vent : L'action du vent dans les zones côtières, peut souffler des quantités modérées de sels vers les terres et susciter leur éventuelle salinisation.

II.2.2. Facteurs anthropiques

-Irrigation : Malgré les efforts consentis dans l'irrigation, son développement a toujours été accompagné de plusieurs changements et/ou dégradations des milieux physique et biologique. Des changements qui peuvent menacer le développement agricole durable, notamment la pollution de l'eau et la diminution de sa qualité, ainsi que sa pénurie (baisse des nappes souterraines, notamment). Il s'agit notamment du développement du pompage privé dans les nappes, entraînant souvent une surexploitation des ressources en eau souterraines. Les zones littorales au Maroc sont particulièrement fragiles face à l'agriculture intensive, car une surexploitation de la nappe peut par la suite engendrer une intrusion marine. La zone de la Chaouia côtière en est un exemple concret. Cette zone est connue par un microclimat propice aux cultures à forte valeur ajoutée (primeurs, agrumes, floriculture..). C'est ainsi que pendant plusieurs décennies, la zone a connu une activité agricole irriguée florissante, grâce à la mobilisation privée des eaux souterraines. La raréfaction progressive des ressources en eau et la dégradation de sa qualité par l'augmentation de la salinité et l'intrusion marine, suite à la surexploitation de la nappe phréatique et la persistance des déficits pluviométriques, a engendré une baisse notable de la productivité, la régression des superficies irriguées et l'abandon des terres agricoles dans cette zone (*Ouahou, 2010*).

Dans le périmètre du Tadla la salinité est un vieux problème qui persiste jusqu'à présent. Cette forme de dégradation des sols suite à la mise en valeur agricole sous irrigation est dynamique. Elle est causée par l'irrigation avec des eaux d'irrigation chargées en sels qui proviennent de l'oued Oum Er Bia et du recyclage des eaux souterraines et/ou de drainage.

La situation actuelle est caractérisée par une concentration des sols et des eaux salées dans le périmètre des Béni Amir et dans l'aval hydraulique des Béni Moussa. Environ 20 000 ha et 12 000 ha sont respectivement touchés par la salinité et la sodicité (*Debbarh et Badraoui, 2002*).

La zone de Berrechid est caractérisée, à son tour, par la présence des eaux souterraines saumâtres destinées principalement à l'irrigation engendrant la dégradation de la qualité des sols irrigués. Le degré de cette dégradation du sol varie d'une commune à l'autre selon les conditions climatiques et d'un secteur à un autre selon les propriétés physiques du sol.

L'évaluation de la qualité des sols irrigués par les eaux souterraines saumâtres de la nappe de Berrechid a montré :

-La présence de signes révélateurs de salinisation par des eaux d'irrigation qui proviennent directement de la nappe de Berrechid.

-Une contamination des sols par la salinité.

-Une forte relation entre la salinité des eaux souterraines et du sol avec la profondeur de l'eau/Sol (*Nezzaghi, 2010*).

-Élévation de la nappe phréatique : En effet, l'utilisation excessive d'eaux pour l'irrigation couplée à la mauvaise gestion du drainage cause la salinisation et la sodification des sols suite à la remontée de la nappe phréatique à des niveaux très proches de la surface du sol (*Badraoui et al., 2005*).

-Eaux usées : La réutilisation des eaux usées pour l'irrigation devient de plus en plus une pratique courante notamment dans les pays semi-arides et arides tels que l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. Cependant, cette réutilisation soulève différents problèmes d'ordre agronomique, environnemental et sanitaire. Les eaux usées épurées sont riches en éléments majeurs azote, phosphore, et potassium. A titre indicatif, l'application d'une lame d'eau usée épurée de 100 mm apporte sous forme minérale (traitement par lagunage à Ouarzazate) 15.5 kg N/ha, 11.2 kg P/ha et 27.4 kg K/ha (*OMS, 2011*).

-Surexploitation des nappes : L'inadéquation croissante entre la demande d'eau et la ressource disponible, est l'un des défis importants auxquels sont confrontés la plupart des pays, spécialement ceux qui connaissent une augmentation rapide de population (tous les pays en développement) ainsi que des limitations climatiques permanentes (les pays des zones arides).

La surexploitation des ressources en eau tient à trois facteurs principaux :

-Insuffisance des connaissances sur les conditions de renouvellement de la ressource.

-Projection sous-estimée des besoins, par exemple la création de grands périmètres irrigués induit d'autres besoins, pas toujours ou suffisamment pris en compte (afflux de population, pertes sur réseaux et au champ, modification dans les rotations culturales, création d'infrastructures sociales et d'activités artisanales et/ou industrielles).

-Gaspillage et mauvaise gestion: mauvaise conception, réalisation et entretien des réseaux d'irrigation.

La surexploitation des nappes souterraines pour l'irrigation dans les zones côtières peut occasionner une intrusion marine (biseau salé) comme constatée dans certaines régions littorales. Lorsque l'utilisation est supérieure au taux de réapprovisionnement et que le niveau de la nappe phréatique diminue, les conséquences pour l'environnement peuvent être graves: il peut en résulter une salinisation due à la pénétration de l'eau de mer dans les nappes souterraines et une dégradation de la biodiversité par suite de la modification du débit des cours d'eau. Le problème de l'intrusion marine dans les aquifères côtiers est beaucoup plus critique dans les pays du moyen orient et du bassin méditerranéen tels que l'Egypte, la Tunisie, la Syrie, le Koweït, le Qatar, l'Arabie Saoudite et les Emirats Arabes Unis (*FAO, 1994*).

II.3. Effet de la salinité sur le sol et le végétal

II.3.1. Effet de la salinité sur le sol

La salinisation constitue un sérieux problème environnemental, entraînant la diminution de la production agricole et rendant les terres impropres à la culture. C'est un processus de dégradation des sols les plus largement répandus sur la Terre, à travers la destruction de la structure du sol qui accentue l'érosion. La salinisation induit des effets de désertification, tels qu'une perte de fertilité du sol, une destruction de sa structure, un tassement du sol, ce qui provoque l'imperméabilité des couches profondes du sol, ainsi la formation d'une croûte de sol. L'addition des sels au profil du sol peut entraîner l'altération de la composition du complexe d'échange : augmentation de la proportion de sodium échangeable sur le complexe adsorbant car les sels de sodium sont les plus solubles dans la nature. Les sols affectés par la salinité existent souvent sous les climats arides et semi-arides mais on peut aussi les trouver dans les régions où le climat et la mobilité des sels entraînent la salinité des eaux et des sols sur de courtes périodes de temps (*Tanji, 1997*).

II.3.2. Effet de la salinité sur le végétal

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

- ❖ Effet soif : la salinité diminue la disponibilité de l'eau pour la plante en

augmentant la pression osmotique de la solution du sol, s'opposant ainsi à l'absorption de l'eau (stress hydrique).

- ❖ Effet faim : dans un sol salin, ont lieu des perturbations du régime nutritionnel de la plante (*Rhoades, 1990*) et ce, suite à une réduction de la solubilité de certains ions qui contrôlent les concentrations des éléments nutritifs du sol (stress nutritif).
- ❖ Toxicité : l'excès en une espèce chimique donnée (sodium, chlorures etc..) se manifeste par une absorption déséquilibrée des ions qui pourraient conduire à l'intoxication de la plante.

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

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

La diminution de la croissance et de la productivité des plantes en conditions de contrainte saline a été reliée à deux origines possibles (*Munns et al., 1995*) :

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

II.4. Solutions pour lutter contre la salinisation des eaux d'irrigation et des sols

II.4.1. Dessalement des eaux saumâtres

La disponibilité des ressources en eau de qualité médiocre telles que les eaux souterraines salines, les eaux de drainage et les eaux usées traitées, représente désormais un enjeu important, notamment pour l'agriculture irriguée dans les zones arides et semi-arides

des pays disposant de peu de ressources en eau. Le dessalement de l'eau est une technologie bien établie pour l'approvisionnement en eau et constitue la principale source d'eau potable notamment dans les pays du Golfe où les coûts de l'énergie nécessaire à ce procédé sont faibles (*Al-Wazzan et al, 2003 ; Mohsen et Al-Jayyousi, 1999 ; Schiffler, 2004*). Les eaux saumâtres et l'eau de mer dessalées sont également employées dans certains pays pour l'irrigation des cultures à fort rapport économique (*El-Kady et El-Shibini, 2001 ; Lee et al., 2003*).

Les techniques de dessalement les plus courantes sont la distillation thermique (pour le traitement de grands volumes d'eau) et la technologie des membranes, notamment l'électrodialyse et l'osmose inverse (*Ahmad et Schmid, 2002*). La capacité de traitement par la technologie des membranes peut être adaptée en fonction de l'usage prévu (les grandes installations ont une capacité supérieure à 5000 m³/jour, celle des installations moyennes se situe entre 500 et 5 000 m³/jour, tandis que les petites installations ont une capacité maximale de 500 m³/jour).

Les coûts des différentes technologies dépendent de la teneur en sels de l'eau de mer ou des eaux saumâtres ainsi que de la source d'énergie utilisée. En effet, l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie de fonctionnement des installations de dessalement réduit considérablement le coût de production de l'eau déminéralisée (*Mohsen et Jaber, 2001 ; Laborde et al., 2001*).

II.4.2. Solutions pour lutter contre la salinisation des sols

La lutte contre la salinité des sols doit permettre d'éviter les mécanismes suivants :

- La remontée de la nappe phréatique souvent salée à la surface du sol ou à une faible profondeur,
- Les phénomènes de capillarité (concentration des sels en superficie),
- Les mouvements d'eau souterrains d'une parcelle à une autre (des zones hautes vers les zones basses),
- La concentration des sels apportés par l'eau d'irrigation dans le sol,
- La concentration des eaux d'irrigation jusqu'à ce qu'elles atteignent un SAR (teneur en sodium) dangereux,
- La concentration des carbonates dans le sol (*Lacharme, 2001*).

a) Riziculture irriguée

La riziculture irriguée est la première méthode de lutte contre la salinité. En effet, les apports d'eau importants de cette culture permettent de nettoyer les excès de sels présents dans le sol. La double culture limite très grandement les périodes pendant lesquelles le sol est à nu et propice à des phénomènes de remontées capillaires (*Lacharme, 2001*)

b) Drainage profond

La principale méthode et la plus adaptée pour lutter contre la salinité est la réalisation de systèmes de drainage adaptés pour permettre :

- Un rabattement de la nappe phréatique en dessous d'une cote telle que les remontées capillaires soient très limitées,
- La création de flux souterrain permettant d'évacuer les sels en excès hors de la parcelle,
- De couper les flux souterrains d'eau chargée en sels d'une parcelle à un autre.

Il ne faut pas confondre ce réseau de drainage avec le système de drainage superficiel des parcelles qui sert uniquement aux vidanges des parcelles (*Lacharme, 2001*).

c) Lutte contre les remontées capillaires

Il est conseillé rapidement après la récolte de faire un léger travail du sol superficiel pour créer en surface du sol une couche de terre pulvérisée. Cela coupe les remontées capillaires en brisant les capillaires du sol. (*Lacharme, 2001*)

d) Lutte contre la concentration des sels

Cette lutte peut être réalisée à plusieurs stades de la culture :

I-Avant la mise en culture : L'opération consistera à nettoyer le sol de ses sels en excès avant de débiter les semis. (*Lacharme, 2001*)

- Réaliser une forte irrigation (lame d'eau de 5 à 10 cm).
- Laisser l'eau pendant environ 24 heures pour qu'elle dissolve les excès de sel s'étant accumulé en superficie.

- Vidanger complètement la parcelle. (En cas d'excès importants de sels, l'opération peut être renouvelée 1 ou 2 fois)

- Semis de la culture

2-Pendant la culture : Cela consistera en un renouvellement régulier de l'eau d'irrigation.

On peut soit Créer un système continu d'apport d'eau dans la parcelle afin de créer un courant permettant d'évacuer en permanence les excès de sels qui risqueraient de s'accumuler.

Ou encore vidanger régulièrement les parcelles puis les re-irriguer rapidement pour éviter une concentration en sels dans l'eau d'irrigation. Le périmètre devra être équipé au moins d'un système efficient de drainage superficiel.

e) Eviter les apports d'eau excessifs

Il faut essayer de trouver un équilibre entre les besoins de la culture et les apports en eau. Tout apport supplémentaire correspondra à un apport de sels supplémentaire, surtout si la culture ne bénéficie pas d'un système de drainage. (*Lacharme, 2001*)

f) Réduire l'évaporation

L'application de résidus ou de paillis pour le sol peut aider à diminuer le taux d'évaporation et par conséquent la salinisation du sol. (*Lacharme, 2001*)

g) Utilisation de variétés tolérantes à la salinité

Les problèmes de salinité peuvent être contre balancés par l'utilisation de variétés tolérantes. (*Lacharme, 2001*)

La tolérance d'une plante à la salinité représente son aptitude à supporter les effets d'un excès de sels dans la zone exploitée par le système racinaire. Or, le degré de tolérance ne peut être défini avec précision car il varie considérablement avec le type de salinité, la concentration du sel, les facteurs environnementaux (édaphiques, climatiques et biotiques), l'espèce, la variété et le stade de développement. Néanmoins, il peut être apprécié sur la base d'un certain nombre de critères tels que la réduction de la croissance végétative, la baisse du rendement agronomique ou la survie en milieu salin lorsque les concentrations salines sont élevées.

Le rendement relatif (T) est calculé à partir de l'équation de Maas et Hoffman (1977) :

$$T = 100 - B * (CEe - A)$$

A : Seuil de salinité en dS/m

B : Diminution du rendement en pourcentage par unité d'augmentation de la salinité

CEe : Conductivité électrique de la pâte saturée.

Les seuils de tolérance sont groupés dans le Tableau 3 :

Tableau 3 : Tolérance relative au sel de différentes espèces à l'émergence et pendant la croissance (Maas, 1977).

Espèces	A	CEe (dS/m)		B
	(dS/m)	50 % rendement	50 % émergence	
Sensibles				
Haricot	1.0	3.0	8.0	19.0
Orangers	1.7	4.8	-	16.0
Modérément sensibles				
Maïs	1.7	5.9	21-24	12.0
Canne à sucre	1.7	-	-	5.9
Bersim	1.5	-	-	5.9
Tomate	2.5	7.6	7.6	9.9
Pomme. de terre	1.7	5.9	-	12.0
Modérément tolérantes				
Luzerne	2.0	08-sept	août-13	7.3
Blé	6.0	13.0	14-16	7.1
Soja	5.0	-	-	20.0
Tolérantes				
Orge	8.0	18.0	16-24	5.0
Betterave	7.0	15.0	06-déc	5.9
Coton	7.7	17.0	15	5.2
Palmier dattier	4.0	17.9	-	3.6

h) Traitements chimiques

Le traitement du sol avec des produits chimiques permet de réduire la teneur du sodium échangeable dans ce dernier. Afin d'y parvenir, il faut ajouter du calcium sous une forme soluble (gypse) dont la quantité dépendra du SAR (Specific absorption rate) et de la CE (conductivité électrique) du sol et de l'eau d'irrigation. Après le traitement avec le calcium, le sodium ainsi que d'autres sels solubles peuvent être ensuite éliminés du sol par lessivage.

Si le sol est pourvu de carbonates libres, il est conseillé d'y ajouter de l'acide sulfurique, du soufre, des sulfates de fer ou encore des sulfates d'aluminium, qui auront pour rôle de produire de l'acide dans le sol. Ce dernier réagira ensuite avec les carbonates de calcium (chaux) pour former des sulfates de calcium (gypse), de l'eau et du dioxyde de carbone. Par la suite, le gypse réagira avec le sol pour enlever le sodium échangeable. (*Shainberg et al., 1989*)

i) Ajout de la matière organique avec ou sans le gypse

La matière organique du sol joue un rôle majeur dans la rétention des éléments cationiques et elle peut donc capter le sodium et débarrasser le sol de ses méfaits.

Selon Yazdanpanah (2011), l'ajout de la matière organique à un sol salin, diminue remarquablement sa salinité, notamment sa teneur en sodium. Selon cette étude, la matière organique a plus d'effet dans la réduction de la salinité des sols que le gypse. Par ailleurs la combinaison des engrais organiques avec ceux minéraux donnent de meilleurs résultats. Les mélanges de gypse et de matières organiques accroissent la valeur des autres amendements du sol, en particulier pour l'amélioration de la structure du sol. Des niveaux élevés de la matière organique du sol sont toujours associés à des concentrations élevées de calcium, élément qui fait partie du gypse. Le calcium diminue l'épuisement de la matière organique du sol quand les sols sont cultivés, grâce au pontage de la matière organique à l'argile.

Dans cette étude, on s'est focalisé sur l'effet de la matière organique dans la réduction de la salinité des sols irrigués avec des eaux salines.

II.5. Généralités sur la matière organique (M.O)

On désigne sous le terme de M.O un ensemble de substances organiques de nature et de propriétés variées (*Koull, 2007*).

La matière organique (M.O) est définie comme la matière spécifique des êtres vivants végétaux et animaux (*Koull, 2007*).

Elle provient de l'activité de tout organisme présent à la surface ou à l'intérieur du sol. Une partie de cette M.O est produite par les organismes vivants: déjections animales, exsudats

racinaires, litière végétale et polysaccharides microbiens. Le reste est constitué par les débris des végétaux morts, les cadavres d'animaux et les cellules microbiennes lysées (Koull, 2007).

On appelle également matière organique l'ensemble des composés organiques susceptibles d'être incorporés au sol.

II.5.1. Origines de la matière organique

La M.O du sol comprend l'ensemble des résidus des organismes vivants, animaux et végétaux incorporés dans le sol, sans tenir compte de leur état de décomposition (Koull, 2007).

Les engrais de ferme ou fumiers, contiennent des quantités plus ou moins importantes de M.O d'origine animale, mélangées ou non à des litières (paille, sciure, copeaux..).

Ces produits ont une double valeur agronomique en tant que fertilisants azotés, phosphorés et potassique et aussi comme amendement organique et basique (Koull, 2007).

Tableau 4: Caractéristiques du fumier des bovins et des ovins (Koull, 2007)

Caractéristiques du fumier	Valeurs	
	Fumier bovin	fumier ovin
MS (%)	34,12	41,11
pHeau (1/5)	6,83	6,39
CE à 25°C (1/5) (dS/m)	13,59	14,17
M.O (%)	69,81	57,32
C (%)	40,59	33,21
N total (%)	1,57	1,48
C/N	25,85	22,43
Na ⁺ (ppm)	87,50	90,00
K ⁺ (ppm)	57,50	60,00
Ca ⁺⁺ (ppm)	26,42	61,00
Mg ⁺⁺ (ppm)	41,96	23,08
Cellulose (%)	11,00	24,00
Composés humiques totaux (%o) (Meftah, 1988)	-	21,40
Acide humique (%o) (Meftah, 1988)	-	14,85
Acide fulvique (%o) (Meftah, 1988)	-	6,55

L'efficacité agronomique du fumier résulte de sa composition chimique, sa forte teneur en M.O et l'apport convenable en éléments fertilisants surtout (N, P, K) qui varie selon l'espèce animale.

II.5.2. Principaux constituants de la matière organique

La matière organique du sol est constituée de deux groupes de substances (*Koull, 2007*) :

- Les substances humiques qui sont l'acide fulvique, l'acide humique et l'humine. Ces substances nouvelles sont reconstruites à partir de certaines M.O transitoires et certaines matières minérales.
- Les composés biochimiques tels que les acides organiques, sucres, lipides et polysaccharides.

II.5.3. Evolution de la matière organique

La décomposition de la matière organique est définie comme étant le processus de séparation de matériaux organiques dans le sol de leurs constituants de base.

D'après Duchaufour (**1995**), l'évolution de la matière organique fraîche (M.O.F) engendre l'humus un peu de la même façon que les minéraux primaires qui donnent naissance à l'argile.

Les molécules complexes de la matière organique fraîche subissent une décomposition microbienne qui libère des composés simples le plus souvent solubles.

Une partie subit le processus de minéralisation, c'est-à-dire la transformation en composés minéraux solubles ou gazeux: « c'est la minéralisation primaire ». Certains de ces composés peuvent d'ailleurs se réorganiser au cours de l'humification.

Une partie échappe à la minéralisation et sert de matériau à l'édification de molécules nouvelles, de plus en plus complexe, dont l'ensemble constitue l'humus: c'est « l'humification ». Ces composés humiques contractent des liens plus ou moins étroits avec les composés minéraux (argiles et oxydes) puis ils se minéralisent à leur tour, mais plus lentement que la matière organique fraîche « minéralisation secondaire » (*Koull, 2007*).

a) Minéralisation primaire (M1)

C'est la dégradation de la M.O.F, en particulier les composants peu résistants comme les glucides, les protéines et les acides aminés, ainsi que les lipides et les acides nucléiques. Si elle est totale, les produits de la transformation sont des cations, des anions et des molécules simples. Le devenir de ces substances solubles dans la solution du sol est comme suit (*Koull, 2007*) :

1-Evacuation dans l'atmosphère du CO_2 , H_2O , NH_4^+ , N_2 , H_2S par échanges gazeux.

2-Absorption des cations, anions et H_2O par les végétaux,

3-Absorption du CO_2 , NH_4^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} , PO_4^{3-} par les micro-organismes,

4-Fixation du K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ et H^+ sur le complexe absorbant,

5-Entraînement du K^+ , Na^+ , Ca^{2+} et NO_3^- par lixiviation.

b) Humification (H)

Sous le terme général d'humification se cachent trois voies de synthèse de matière organique stabilisée, formant l'humus (*Koull, 2007*) :

- l'humification par héritage (H1), qui donne l'humine résiduelle ou héritée,

- L'humification par polycondensation (H2), qui fournit l'humine d'in- solubilisation,

- L'humification par néo synthèse bactérienne (H3), qui fournit l'humine microbienne,

L'ensemble de ces trois humines (résiduelle, d'insolubilisation et de néosynthèse bactérienne) forme la partie la plus insoluble et la plus stable de l'humus ; l'humine.

c) Minéralisation secondaire (M 2)

C'est la plus lente (1à 3 %) de la matière humifiée par an mais aboutissant au même résultat que la minéralisation primaire et concernent les molécules organiques préalablement synthétisées par l'humification. Ces molécules sont plus stables et résistent mieux à la dégradation (*Koull, 2007*).

II.5.4. Actions de la matière organique sur les propriétés du sol

Les M.O ont de multiples propriétés qui leur confèrent des fonctions primordiales dans les agro et les écosystèmes et en font une composante de la fertilité. Les fonctions des M.O participent de façon générale à l'aptitude des sols à la production végétale par l'amélioration de ces propriétés physiques, chimiques et biologiques (*Koull, 2007*).

II.5.5. Actions de la matière organique sur les propriétés physiques du sol

La M.O grossière, à la surface du sol, atténue le choc des gouttes de pluie et permet à l'eau pure de s'infiltrer lentement dans le sol ; l'écoulement en surface et l'érosion sont ainsi réduits (*Koull, 2007*).

Les M.O assurent la cohésion des autres constituants du sol entre eux et contribuent à la structuration du sol et à la stabilité de la structure. Ceci est dû au grand nombre de liaisons électrostatiques et surtout de liaisons faibles que les M.O peuvent assurer (*Koull, 2007*).

Dans les terres manquant de colloïdes minéraux et où l'absence de phénomènes de gonflement « limons ou sables » l'élévation du taux d'humus coïncide avec une certaine tendance à l'agrégation (*Koull, 2007*).

La teinte foncée des terres riche en M.O favorise l'absorption de l'énergie solaire. Ceci se traduit par un réchauffement plus rapide des sols nus (*Koull, 2007*).

La capacité du sol pour l'eau est en effet liée à la teneur en M.O en raison de l'hydrophilie des colloïdes qui la composent (*Koull, 2007*). Cette matière retient d'autant mieux l'eau qu'elle est humifiée, elle régularise le bilan de l'eau dans le sol. Selon Monnier et Gras (1965) et Hillel (1974) son affinité pour l'eau se manifeste par :

- une force de succion élevée.
- des phénomènes de contraction et d'expansions des sols, au cours de leur dessiccation-humectation. La quantité d'eau retenue dans le sol est en fonction de la nature du sol et surtout de la teneur en M.O et son degré d'humification.

II.5.6. Actions de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol

Les M.O contribuent classiquement à la fertilité chimique des sols. Elles sont une réserve d'éléments nutritifs, principalement pour l'azote, le phosphore et le soufre (*Koull, 2007*).

Elles sont connues dans leur ensemble par leur minéralisation, une source d'aliments de certains éléments nutritifs et la facilité de leur utilisation suite à la libération par oxydation de l'humus et de gaz carbonique. Selon Duthil (1973), cette décomposition progressive est

doublement intéressante : D'une part, elle s'étale sur la quasi-totalité de la période de végétation, ce qui correspond bien à une alimentation régulière et continue et évite des pertes par lessivage ou par insolubilisation. D'autre part, elle apparaît « complète » que la destruction microbienne des débris végétaux enfuis libères aussi bien N, P, K, Ca, S que d'autre élément moins connus ou moins évidents Mg, Zn, B, Cu, Fe, Al, Si, etc. Les colloïdes humiques augmentent la capacité d'échange du sol dont un gramme fixe environ 5 fois plus de cations qu'un gramme d'argile. Cette propriété rend la M.O dans certains milieux comme les sols sableux, la principale réserve des bases disponibles (K^+ et Ca^{++}) (Koull, 2007).

II.5.7. Actions de la M.O sur les propriétés biologiques du sol

Les apports organiques facilement fermentescibles permettent d'améliorer l'activité biologique (Koull, 2007).

Les M.O représentent un véritable substrat énergétique pour les micro-organismes pour synthétiser leurs propres protéines ainsi que pour former des métabolites (Koull, 2007).

Les matières organiques sont l'aliment des vers de terre et des arthropodes (insectes, acariens...). Les matières organiques jeunes apportent les sucres et les matières azotées nécessaires aux micro-organismes. Les matières organiques, en améliorant la structure et l'aération du sol, favorisent le développement des bactéries aérobies, indispensables à la minéralisation et aux échanges dans la rhizosphère (Koull, 2007).

Par son rôle capital dans la fourniture des éléments majeurs et des oligo-éléments. Les M.O favorisant la croissance et la résistance des plantes aux parasitismes (Koull, 2007).

Au contact du substrat minéral, elles ont une grande valeur comme amendement humique, comme « ensemencement microbien » et comme générateur d'enzymes, à ces points de vue, elles sont irremplaçables (Koull, 2007).

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Protocole expérimentale

III.1.1. Dispositif expérimental

Pour notre expérimentation nous avons opté pour un bloc aléatoire complet à 3 répétitions, couvrant une superficie de 324m² et renfermant 12 parcelles expérimentales de 24m². Chaque bloc de l'essai reçoit 4 doses différentes du fumier de bovins (4 Doses * 3 Répétitions) (Fig. 5).

Les différentes doses de la matière organique (fumier de bovin) répandues sur le champ sont comme suit:

D0 : 0kg (Témoin, sol sans apport de matière organique).

D1 : 48kg du fumier de bovins (20t/ha).

D2 : 96kg du fumier de bovins (40t/ha).

D3 : 144kg du fumier de bovins (60t/ha)

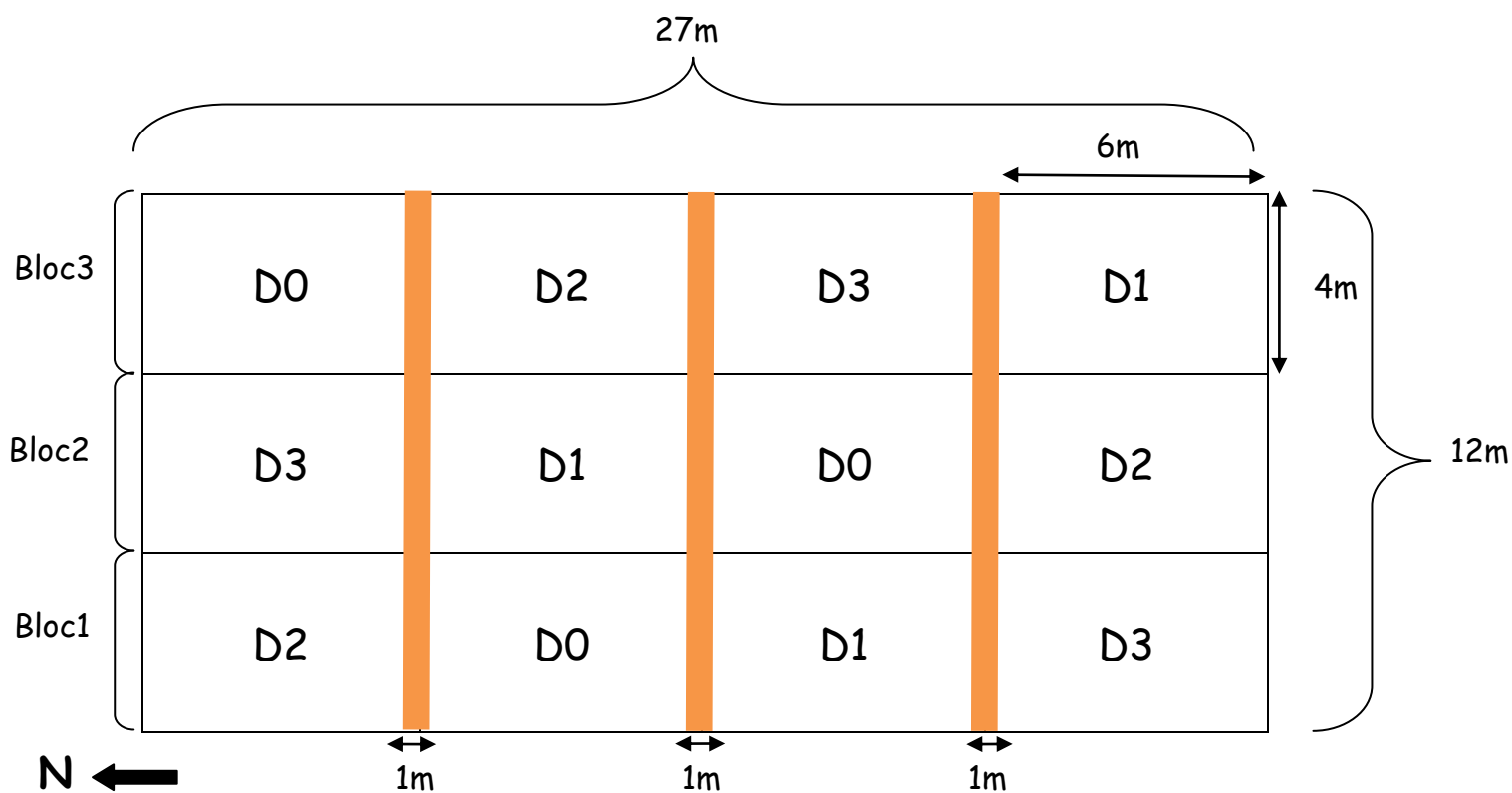


Figure 5 : Bloc aléatoire complet à 3 répétitions

L'ammonitrate a été répandu équitablement sur toute la parcelle. C'est un engrais azoté minéral à base de nitrate d'ammonium. Sur le plan agronomique, c'est une formulation intéressante car il combine l'action rapide de l'azote nitrique avec celle plus lente de l'azote ammoniacal. L'ammonitrate haut dosage que nous avons ajouté à la parcelle a tendance à acidifier les sols.

III.1.2. Irrigation de la parcelle

L'irrigation se fait par goutte à goutte, pendant 4 heures, une à deux fois par semaine, de manière à maintenir l'humidité à un taux optimum pour l'humification de la matière organique. L'eau utilisée pour l'irrigation (Tab. 5) provient d'un puits équipé d'une pompe, se trouvant à proximité de la parcelle expérimentale.

Tableau 5: Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation

Source	CE (mS/cm)	pH	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	CO ₃ ²⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)
Puits	3,98	6,96	19,2	6,2	16	0,06	28	0	0	13,37

L'eau utilisée pour l'irrigation est selon la classification de Carter (**1969**) de qualité médiocre à mauvaise, normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées.

Cette eau saline présente un éventuel danger de salinisation des sols de la région.

III.2. Méthodes de prélèvement

III.2.1. Prélèvement d'eau

Lors de chaque sortie et afin de suivre l'évolution de la salinité de l'eau dans la zone, un échantillon d'eau est collecté, une fois par mois, dans une bouteille en plastique hermétiquement fermée et portant le code du site exploité.



Photo 1 : Puits équipé d'une pompe à partir duquel la parcelle assure son irrigation

III.2.2. Prélèvement du sol

Dans le but d'obtenir une meilleure représentativité de la parcelle, des prélèvements ont été effectués au milieu et à ses bords à l'aide d'une tarière à raison de trois échantillons par parcelle élémentaire (0-20 ; 20-40 et 40-60 cm). Les échantillons du sol sont ensuite collectés dans des sachets en plastique portant le code du site avec « B » se référant au Bloc dont on a prélevé l'échantillon, « D » la dose de la matière organique ajoutée à la parcelle et finalement, la profondeur de l'horizon (0-20 ; 20-40 et 40-60 cm).



Photo 2 : Prélèvement du sol

Les prélèvements étant destinés à suivre l'effet de la matière organique dans la réduction de la salinité du sol, nous avons effectué Le 27/02/2012 un prélèvement du sol soit avant l'expérimentation afin de le caractériser et trois prélèvements répartis sur toute la période de l'expérimentation (27 mars; 26 avril et 05 juin 2012).

III.2.3. Prélèvement du fumier de bovin (M.O)

Nous avons réalisé un prélèvement du fumier bovin dans l'exploitation étudiée. Ce prélèvement concerne le fumier de bovin humide qu'on va par la suite exposer à l'air libre afin de le sécher, puis le broyer.



Photo 3 : Prélèvement du fumier de bovin

III.3. Analyses au laboratoire

Les différentes analyses physico-chimiques de l'eau et du sol ont été réalisées au sein du Laboratoire de Chimie des Sols de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles.



Photo 4 : Analyses physicochimiques au laboratoire

III.3.1. Analyse de l'eau

Afin d'apprécier la qualité de l'eau du puits analysée et particulièrement sa salinité, les analyses suivantes ont été réalisées : conductivité électrique (CE), pH et le bilan ionique.

a) Conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique de l'eau a été réalisée à l'aide d'un conductivimètre de laboratoire de Marque ORION, modèle 162.

b) pH de l'eau

Le pH de l'eau a été mesuré au moyen d'un pH mètre de marque METRHOM, modèle 691.

c) Bilan Ionique

-Dosage du Sodium et du Potassium :

Le dosage du sodium et du potassium de l'eau a été réalisé par photométrie à flamme. L'appareil utilisé est de Type JENWAY, modèle PFP7.

-Dosage du Calcium et du Magnésium :

Les ions calcium et magnésium ont été dosés par titrage complexométrique au moyen de l'EDTA (0.02N) en présence des indicateurs colorés, calconcarbonique et Noir Erichrome T (*Black, 1965*).

-Dosage des Carbonates et Bicarbonates :

Les carbonates et les bicarbonates ont été dosés par titrage acido-basique (HCl 0.05N) en présence des indicateurs colorés, phénolphtaléine et du méthylorange (*Rodier, 1984*).

-Dosage des Sulfates :

Les sulfates ont été dosés par la méthode néphélométrique qui consiste à précipiter les sulfates en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de Baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de "Tween 20". Les suspensions homogènes sont mesurées au moyen d'un colorimètre UV-Visible à 650 nm (*Rodier, 1984*).

-Dosage des Chlorures :

Les chlorures ont été déterminés par la méthode de Mohr. Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent (0.02N) en présence de chromate de potassium (10 %). La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent (*Rodier, 1984*).

III.3.2. Analyse du sol

Dans le but de déterminer la nature du sol de la région de Skhirat et afin d'évaluer sa qualité et suivre l'effet de la matière organique dans la réduction de sa salinité, les paramètres suivants ont été déterminés: Granulométrie, pH, conductivité électrique, bases échangeables, capacité d'échange cationique (CEC) et matière organique.

a) Préparation d'échantillons

Après prélèvement, le sol est séché; ensuite il est passé dans un tamis (tamisé) à 2 mm pour extraire les débris végétaux et les cailloux de taille supérieure à 2 mm. Une aliquote du sol tamisé à 0,2 mm est conservée pour l'analyse de la matière organique et l'azote.

b) Granulométrie

Les particules minérales constituant d'un sol peuvent être isolées, triées et classées suivant leur taille. C'est le principe de l'analyse granulométrique par densimétrie. Les limites de différentes classes de taille sont conventionnelles. Les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre (les cailloux et graviers de diamètre > 2mm, sont classés à part) :

Tableau 6 : Echelle granulométrique de la texture du sol

Terre fine					Terre grossière	
Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
< 2µm	2 µm à 20µm	20µm à 50µm	50µm à 200µm	200µm à 2mm	2mm à 20mm	>20mm

Dans un premier temps, la matière organique du sol est attaquée par l'eau oxygénée pour éliminer les cations adsorbants (Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , H^+). Après leur élimination, on passe à l'attaque du calcaire avec du HCL avant de siphonner la solution pour ne laisser que l'échantillon sédimenté. Un peu de KCl est ensuite ajouté afin d'éliminer les ions H^+ fixés sur les argiles. Finalement, l'eau distillée est rajoutée jusqu'à disparition totale d'HCl. Après, 25 ml de solution de Pyrophosphate de sodium $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (un dispersant) est ajoutée à une concentration de 50g/l. Par la suite, chaque échantillon est versé dans une éprouvette de 1l, qu'on complète jusqu'à 100 ml avec de l'eau distillée. Après 30 secondes d'agitation, la lecture est ensuite effectuée grâce au densimètre Boyocos (6 min, 8h et 24h). Finalement le contenu de l'éprouvette est versé dans un tamis de 0,05mm pour obtenir la fraction sableuse. Cette dernière est mise dans une boîte avant d'être déposée dans une étuve. Le sable grossier ainsi que le sable fin sont filtrés à l'aide d'un tamis de 0,2 mm.

Les fractions du sol sont calculées comme suit :

Soit :

X_6 : Lecture à 6min

X_8 : Lecture à 8h

SF : Fraction de sable fin

SG : Fraction de sable grossier

H : Humidité

K : Coefficient de correction de l'humidité

On a :

$$K = 100/100 - H$$

$$\% \text{ de l'argile} = (X_8/P) * 100 * K$$

$$\% \text{ du limon fin} = ((X_6 - X_8)/P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de sable fin} = (SF/P) * 100 * K$$

$$\% \text{ de sable grossier} = (SG/P) * 100$$

c) pH du Sol

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

Le pH (pH eau) de l'échantillon du sol est déterminé par sa mise en suspension dans l'eau distillée avec un rapport sol/eau (1/2.5). L'acidité d'échange est déterminée par ajout de KCl dans la suspension (pH KCl).

d) Conductivité Electrique

La conductivité électrique d'un sol est un paramètre important qui nous renseigne sur le degré de salinité de ce dernier. La mesure de la conductivité électrique des échantillons du sol a été réalisée sur l'extrait de la pâte saturée au moyen du conductivimètre ORION, modèle 162.

e) Azote

L'azote est dosé par la méthode Kjeldahl où on transforme l'azote des composés organiques en azote ammoniacal par l'acide sulfurique concentrés, à l'ébullition, qui agit comme oxydant et détruit la matière organique. Le carbone et l'hydrogène se dégagent à l'état de gaz carbonique et l'eau. L'azote transformé en ammoniacque est fixé par l'acide sulfurique à l'état de sulfate d'ammonium. Puis l'ammoniacque est distillée dans une solution d'acide borique. On titre avec une solution d'acide sulfurique à 0.02 N.

f) Phosphore

Le phosphore est dosé par la méthode Olsen où l'extraction est faite par le NaHCO_3 0,5 N à pH 8,5. Après agitation et filtration, la solution est dosée par un colorimètre à 825 nm.

g) Bases échangeables

On entend, communément, par bases échangeables l'ensemble des métaux alcalins et alcalino-terreux, notamment, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ liés au complexe absorbant et qui sont susceptibles d'être échangés avec d'autres cations dans la solution du sol.

L'extraction des bases échangeables a été réalisée par une solution normale d'acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ à pH 7 (*Black, 1965*).

- Le dosage du Na^+ et K^+ est réalisé au moyen du photomètre à flamme.
- Le dosage du Ca^{2+} et Mg^{2+} est réalisé par dosage complexométrique.

h) Capacité d'échange cationique (CEC)

Dans des conditions bien définies, il est possible de saturer au profit d'un seul cation, le complexe absorbant d'un sol. Le lessivage des différents cations laisse des conditions expérimentales favorables à la détermination de la capacité d'échange. Le sol ayant subi une saturation totale, il convient d'éliminer par l'alcool, en « effet piston », l'excès de solution saturante imprégnant le milieu.

La CEC des échantillons de sol a été effectuée en trois étapes (*Black, 1965*) :

- Saturation du complexe absorbant par une solution d'acétate de sodium (1N) à pH 8,2 (trois lavages de 33 ml).
- Lavage de l'excès de la solution saturante par de l'éthanol (trois lavage de

33ml).

- Extraction du sodium adsorbé par une solution normale d'acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ à pH 7 (trois lavages de 33 ml).

Le sodium ainsi extrait est dosé par photométrie à flamme permettant ainsi la détermination de la CEC.

i) Matière Organique

Le carbone, est l'élément de la matière organique le plus facilement déterminé. A partir de celui-ci, on peut se baser pour donner une estimation de la matière organique totale dans le sol dont l'un des constituants principaux est l'humus, ce dernier joue un rôle fondamental dans la dynamique du sol par le biais du complexe argileux humique.

La méthode de dosage du carbone dans le sol est réalisée par l'oxydation du carbone organique à froid selon la méthode Anne, par un excès de bichromate de potassium (1N) en milieu acide sulfurique jusqu'au dégagement du CO_2 . La fraction de bichromate non réduite peut être dosée en retour par une solution de sel de Mohr en présence de diphénylamine. Le taux de matière organique est estimé en multipliant le % de carbone organique par 1,724.

Les réactions mises en jeu sont :



j) Humidité équivalente

L'humidité équivalente est la quantité d'eau capable d'être conservée par un sol en place (*Gaucher, 1968 et Duchauffour, 1965*). Sa mesure se fait de manière assez simple par la différence de poids (pesage) avant et après le passage dans une étuve à 105 °C, et ce pendant 24 heures.

k) Pourcentage du sodium échangeable

Le pourcentage de sodium échangeable (ESP), c'est le degré de saturation en sodium du complexe d'échange du sol. Il se calcule par la formule suivante:

$$ESP = \frac{\text{sodium échangeable (Meq/100g de sol)}}{\text{capacité d'échange des cations (meq/100g de sol)}} \times 100$$

III.3.3. Analyse du fumier

a) Détermination des cendres

Après séchage à l'étuve, on procède à une calcination au four à 500 °C pendant 4 heures. Les cendres brutes sont obtenues après destruction de la matière organique par incinération (*AFNOR, 1977*).

La perte au feu est donc simplement la différence de masse :

$$\text{Perte au feu} = (\text{masse avant calcination}) - (\text{masse après calcination})$$

On l'exprime parfois en pourcentage :

$$\text{Perte au feu (\%)} = 100 \times \frac{[(\text{masse avant calcination}) - (\text{masse après calcination})]}{(\text{masse avant calcination})}$$

b) Dosage des éléments

L'azote est dosé sur la poudre de fumier par la méthode Kjeldahl. Le K⁺ et Na⁺ sont dosés par spectrophotomètre de flamme et le Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ par titration à l'E.D.T.A après la mise en solution d'éléments minéraux contenus dans la matière organique par minéralisation.

III.3.4. Analyse des données

Après les analyses au laboratoire et l'obtention des différents paramètres nécessaires pour notre étude, nous avons procédé à une analyse statistique des données afin de se renseigner sur l'éventuel effet de la M.O sur la salinité du sol, ses paramètres physico-chimiques ainsi que sur sa fertilité. Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse de la variance à deux critères de classification (dose et bloc). Une fois cette analyse faite, on a procédé au test de Dunnett avant de terminer avec les coefficients de

corrélation. Ces analyses statistiques ont été toutes réalisées à l'aide du logiciel statistique SAS 9.1.3.

a) Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) ou analyse factorielle est une technique permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes (dans notre cas : les paramètres du sol) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (dose et bloc).

b) Test de Dunnett

Le test de Dunnett est un test spécialisé pour la comparaison multiple. Il est employé quand les comparaisons ne sont faites qu'avec le groupe témoin (0 t/ha) contre tous les autres groupes.

c) Test de corrélation

En statistiques, étudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables aléatoires, c'est étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Caractérisation de l'eau d'irrigation, sol et fumier utilisés

IV.1.1. Eau d'irrigation

Pour avoir une idée sur l'évolution de la minéralisation de l'eau d'irrigation utilisée lors de cette expérimentation, une analyse de sa conductivité électrique a été réalisée durant toute la période d'étude. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7: Evolution de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation en dS/m du mois de février au juin 2012

Dates de prélèvement	CE (dS/m)
Février	3,98
Mars	3,98
Avril	4,00
Mai	3,99
Juin	4,00

Nous constatons que la conductivité électrique de l'eau d'irrigation est presque constante. Au premier prélèvement elle a été de 3,98 dS/m alors qu'en Juin (quatrième prélèvement) elle a touché une valeur de 4 dS/m (Tab. 7).

Selon les normes d'Ayers et Westcot (**1976**), la conductivité électrique de l'eau d'irrigation est élevée (eau saline), mais plus ou moins inchangée durant la période d'étude.

IV.1.2. Sol

Dans le but de suivre l'évolution de la salinité du sol, il est indispensable de l'analyser avant l'expérimentation (avant l'ajout du fumier de bovin). Les analyses granulométriques et chimiques du sol sont présentées respectivement dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8: Granulométrie du sol

		Granulométrie du sol				
		% Argile	% Limon fin	% Limon grossier	% Sable fin	% Sable grossier
Horizons (cm)	0-20	5,0	2,5	16,1	43,7	32,7
	20-40	5,0	0,0	15,7	23,3	56,1
	40-60	20,0	0,0	16,1	10,3	53,6

Le sol a une texture sableuse avec 76,4 % de sable, 18,6 % de limon et 5% d'argile pour l'horizon de surface.

Les sols sableux sont généralement bien aérés, faciles à travailler, riches en sables, mais pauvres en réserves d'eau et en éléments nutritifs. Par ailleurs, l'ajout de la M.O peut améliorer, entre autres, la structure du sol.

Tableau 9: Résultats d'analyses chimiques du sol avant l'expérimentation

		C (%)	MO (%)	N (%)	C/N	pH eau (1/2,5)	CE (dS/m)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/Kg)	K ⁺ (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100)	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100)	CEC (meq/100g)	ESP (%)
Horizons (cm)	0-20	0,72	1,24	0,07	10,60	8,00	0,77	129,30	139,40	0,30	0,64	6,60	0,75	8,60	7,44
	20-40	0,53	0,92	0,06	9,73	8,00	0,26	22,10	64,12	0,14	0,28	4,75	0,75	7,70	3,64
	40-60	0,23	0,39	0,04	5,67	7,53	0,26	9,20	61,34	0,13	0,21	4,75	0,74	6,60	3,18

Le sol a une conductivité de 0,77 dS/m. Selon les normes d'Ayers et Westcot (1976), ce sol est non salin, mais le fait qu'il soit irrigué avec des eaux salines l'expose à une future salinisation indubitable. C'est donc dans le but de prévenir ceci que s'inscrit notre travail qui consiste à étudier l'effet de la M.O dans la réduction de la salinité des sols.

Pour cette fin, notre parcelle expérimentale a été divisée en trois blocs, chacun contenant quatre doses de M.O (D0, D1, D2, D3). L'analyse de la variance pour le facteur « bloc », durant l'expérimentation, nous a donné les résultats suivants :

Tableau 10 : Analyse de la variance par le mois de mars

Horizons (cm)	pH	P	K₂O	MO	CE	K⁺	Na⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.5954 NS	0.3905 NS	0.7683 NS	0.3329 NS	0.5284 NS	0.7683 NS	0.2981 NS	0.1861 NS	0.1987 NS	0.2302 NS	0.2738 NS
D (20-40)	0.4709 NS	0.5195 NS	0.1780 NS	0.9837 NS	0.2233 NS	0.1780 NS	0.4198 NS	0.2974 NS	0.1186 NS	0.2336 NS	0.1480 NS
D (40-60)	0.9960 NS	0.9778 NS	0.1780 NS	0.1782 NS	0.2218 NS	0.1780 NS	0.4624 NS	0.1031 NS	0.4025 NS	0.2219 NS	0.4798 NS

Tableau 11: Analyse de la variance pour le mois d'avril

Horizons (cm)	pH	P	K ₂ O	MO	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.8616 NS	0.3254 NS	0.1156 NS	0.1679 NS	0.1442 NS	0.1156 NS	0.6906 NS	0.2894 NS	0.5821 NS	0.0878 NS	0.4974 NS
D (20-40)	0.8594 NS	0.5151 NS	0.1110 NS	0.7008 NS	0.9190 NS	0.1110 NS	0.3554 NS	0.0639 NS	0.7748 NS	0.2665 NS	0.2963 NS
D (40-60)	0.9795 NS	0.9309 NS	0.1448 NS	0.1285 NS	0.1114 NS	0.1447 NS	0.6069 NS	0.5064 NS	0.8781 NS	0.5597 NS	0.5807 NS

Tableau 12: Analyse de la variance pour le mois de Juin

Horizons (cm)	pH	P	K ₂ O	MO	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP	Rendement
D (0-20)	0.8936 NS	0.3544 NS	0.1159 NS	0.3309 NS	0.3213 NS	0.4219 NS	0.6883 NS	0.1167 NS	0.5006 NS	0.1882 NS	0.6332 NS	0.2451 NS
D (20-40)	0.8797 NS	0.5251 NS	0.1560 NS	0.7476 NS	0.1241 NS	0.3075 NS	0.1609 NS	0.1376 NS	0.4707 NS	0.3298 NS	0.0606 NS	—
D (40-60)	0.9731 NS	0.5409 NS	0.2148 NS	0.2016 NS	0.1072 NS	0.0567 NS	0.2900 NS	0.0461 NS	0.1428 NS	0.1197 NS	0.1609 NS	—

NS : Valeur non significative ($Pr > 0,05$)

S : Valeur significative ($Pr < 0,05$)

HS : Valeur hautement significative ($Pr < 0,01$)

THS : Valeur très hautement significative ($Pr < 0,001$)

L'ANOVA indique que le facteur « bloc » n'a aucun effet sur les paramètres du sol. Ce dernier peut donc être considéré comme étant homogène.

IV.1.3. Fumier de bovin

Afin d'élucider l'effet de l'apport de la M.O sur la salinité des sols, il nous a paru nécessaire de caractériser, dans un premier lieu, le fumier de bovin utilisé lors de notre expérimentation (Tab. 13).

Tableau 13: Caractérisation du fumier de bovin

MS (%)	33,87
H ₂ O (%)	59,07
pHeau (1/5)	6,53
CE à 25°C (1/5) (dS/m)	13,33
M.O (%)	67,81
COT (%)	39,42
N total (%)	1,74
C/N	22,66
Na ⁺ (%)	0,88
K ⁺ (%)	2,50
Ca ⁺⁺ (%)	1,76
Mg ⁺⁺ (%)	0,49
P (%)	55,38

Nous remarquons que le fumier utilisé est composé de moitié par l'eau (59,07%). Ainsi, la dose la plus élevée que nous avons répandue sur le champ et qui est de 60 t/ha, n'est donc que l'équivalent de 30 t/ha, qui est d'ailleurs la quantité de matière organique conventionnelle conseillée.

IV.2. Résultats et interprétations d'analyses du sol durant l'expérimentation

Afin de faciliter l'interprétation de nos résultats, nous avons pris la moyenne des trois répétitions (Bloc 1, 2 et 3) pour n'avoir qu'une seule valeur moyenne pour chaque dose de M.O.

IV.2.1. Effet de la M.O sur la salinité du sol

Dans le but d'affirmer l'effet de l'apport organique sur la salinité ainsi que sur le taux de M.O du sol, une analyse de la variance a été réalisée. Les résultats statistiques de l'ANOVA sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 14 : Analyse de la variance pour la matière organique et la salinité

Horizons (cm)	Mars (M.O)	Mars (CE)	Avril (M.O)	Avril (CE)	Juin (M.O)	Juin (CE)
D (0-20)	<.0001 THS	0.0014 HS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS
D (20-40)	0.1621 NS	0.0013 HS	0.3006 NS	0.0415 S	0.1683 NS	0.4987 NS
D (40-60)	0.0003 THS	0.3868 NS	0.0002 THS	0.0572 NS	0.0007 THS	0.5984 NS

NS : Valeur non significative ($Pr > 0,05$)

S : Valeur significative ($Pr < 0,05$)

HS : Valeur hautement significative ($Pr < 0,01$)

THS : Valeur très hautement significative ($Pr < 0,001$)

D'après les résultats du tableau 14, le paramètre « dose de M.O » semble avoir un effet très hautement significatif sur le taux de M.O. Et ce, en surface tout comme en profondeur. Pour la salinité, cet effet ne touche que les horizons de surface et il est hautement à très hautement significatif. Trois mois après le commencement de l'expérience, on remarque que l'effet de la M.O sur les deux paramètres du sol est toujours très hautement significatif, surtout pour les tranches de surface.

Les résultats du test de Dunnett viennent confirmer davantage le test de signification. Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Résultats du test de Dunnett pour la matière organique et la salinité du sol

Horizons (cm)	Mars (M.O)	Mars (CE)	Avril (M.O)	Avril (CE)	Juin (M.O)	Juin (CE)
D (0-20)	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***
	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***
	20 - 0 ***		20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***
D (20-4)	—	60 - 0 *** 40 - 0 ***	—	60 - 0 ***	—	—
D (40-60)	60 - 0 ***	—	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	—
	40 - 0 ***		40 - 0 ***		40 - 0 ***	
	20 - 0 ***		20 - 0 ***		20 - 0 ***	

*** : Il y a une différence entre le témoin (0 t/ha) et la dose citée (20 ; 40 et 60 t/ha).

Le test de Dunnett nous montre l'effet de la dose sur le taux de M.O ainsi que sur la salinité du sol. Selon les résultats du tableau 15, on remarque qu'effectivement, il y a un effet de dose sur ces deux paramètres, vu qu'il y a une différence assez palpable entre le témoin et les différentes quantités de M.O ajoutées. Ces différences impliquent que chaque dose a son propre effet sur les paramètres étudiés, soit la M.O et la salinité.

a) Matière organique (M.O)

Le contenu en M.O dans les sols dépend à la fois de la restitution de la biomasse au sol (prairie, culture, forêt), de l'apport de matières exogènes (fumier, boues de stations d'épuration, compost...) et du taux de minéralisation et d'humification de la MO.

Les résultats d'analyse de la matière organique dans les sols à différents doses et à différentes profondeurs sont présentés dans le tableau 16 :

Tableau 16 : Valeurs moyennes du taux de la matière organique dans le sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	1,24	1,24	1,24	1,24	0,92	0,92	0,92	0,92	0,39	0,39	0,39	0,39
Mars	1,23	1,54	1,76	1,93	1,07	1,07	1,07	1,14	0,44	0,64	0,72	0,76
Avril	1,22	1,52	1,74	1,92	1,06	1,05	1,05	1,12	0,42	0,64	0,71	0,74
Juin	1,20	1,49	1,72	1,93	1,04	1,03	1,03	1,10	0,41	0,62	0,69	0,71

Nous remarquons que juste après l'apport de la M.O au sol, le pourcentage de cette dernière augmente légèrement et ce, pour toutes les doses à l'exception du témoin où elle reste plus ou moins constante. En surface, le taux de M.O passe de 1,24 % à 1,93 % pour D3. En profondeur, ce taux s'est aussi amplifié suite à l'apport de la M.O en passant de 0,92% et 0,39 % au premier prélèvement à 1,14% et 0,76% toujours pour D3. Après la quatrième semaine de l'expérimentation, le taux de la M.O se stabilise voire diminue légèrement dans tous les horizons et pour toutes les doses (Tab. 16).

Les graphiques suivants rendent compte de l'évolution moyenne du taux de la M.O du sol en fonction des doses et de la profondeur :

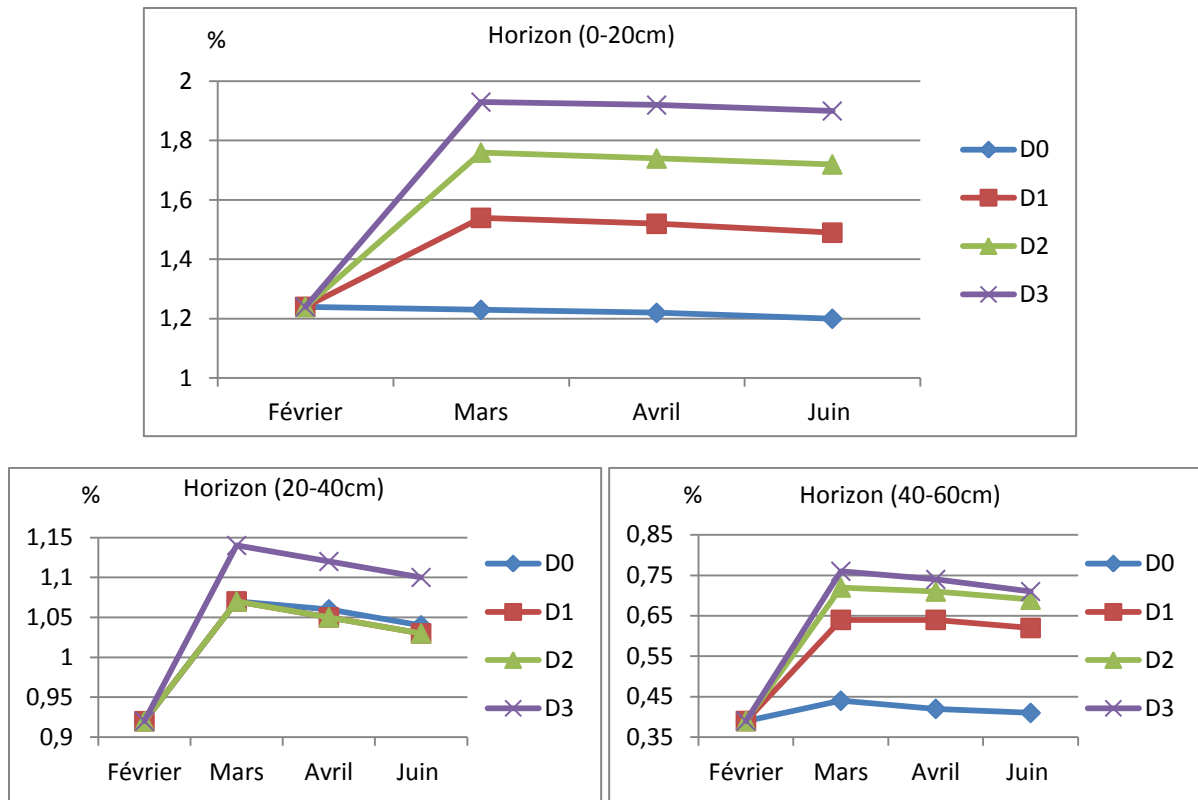


Figure 6 : Evolution moyenne du taux de la M.O dans le sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

D'après la figure 6, nous observons que l'apport du fumier de bovin au sol a augmenté le taux de M.O au niveau de tous les horizons qui sont apparemment interconnectés grâce à leur structure sableuse (l'eau circule librement dans le sol entraînant avec lui toutes sortes de nutriments). Dans l'horizon de surface, les teneurs les plus élevées en M.O sont enregistrées pour D3 avec une valeur de 1,93% alors que pour D0 (le témoin) le taux de M.O reste presque inchangé. La faible diminution de ces teneurs, inscrite en mois de Juin, est due à la minéralisation d'une partie de la M.O suite à l'élévation des températures ambiantes et la disponibilité de l'eau, deux choses qui rendent les microorganismes encore plus actifs en été qu'en autres saisons. Il est donc incontestable que l'apport du fumier au sol augmente le taux de M.O dans ce dernier. Mais cette augmentation n'est pas continue dans le temps. Après avoir atteint son niveau maximum, la M.O commence à se décomposer sous l'action de divers micro-organismes aérobies en une série de composés minéraux simples (NH_4^+ , NO_3^- , CO_2 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} ...) soit directement avec une libération rapide soit en passant par un stade humifère avec une lente libération des composés organique.

b) Conductivité électrique (CE)

Dans ce travail et à l'aide de la mesure de la CE, nous avons pu effectuer un suivi de la teneur en sels dissous dans notre sol à différentes doses de M.O et dans différents horizons.

Les résultats sont présentés ci-dessous (Tab. 17) :

Tableau 17: Valeurs moyennes de la CE du sol en (dS/m) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	0,77	0,77	0,77	0,77	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Mars	1,20	1,8	3,05	3,46	0,77	0,93	1,14	1,32	0,53	0,57	0,51	0,72
Avril	0,93	0,78	0,53	0,22	0,13	0,16	0,22	0,25	0,06	0,07	0,07	0,08
Juin	1,14	0,95	0,50	0,16	0,23	0,25	0,26	0,25	0,12	0,13	0,12	0,14

Nous remarquons qu'au deuxième prélèvement, juste après l'ajout de la M.O, la CE en surface a augmenté remarquablement passant de 0,77 à 3,46 dS/m pour D3. Au troisième prélèvement, les valeurs de la CE diminuent considérablement dans tous les horizons et pour les différentes doses de M.O, Pour l'horizon de surface, la diminution la plus notable est enregistrée pour D3 avec 0,22 dS/m. Au quatrième prélèvement, les valeurs de la CE continuent de diminuer pour D2 et D3 avec des valeurs respectives de 0,50 et 0,16 dS/m, alors qu'elles augmentent légèrement pour D0 et D1 avec des valeurs de 1,14 et 0,95 dS/m. En profondeurs, les variations de la CE suivent plus ou moins celles enregistrées en surface (Tab. 17).

Par ailleurs, nous remarquons qu'en surface et vers la fin de l'expérimentation, la CE pour D0 augmente de 50% alors que pour D3, elle diminue de presque 80%.

Les courbes suivantes soulignent l'évolution moyenne de la CE du sol en fonction des doses de M.O et de la profondeur :

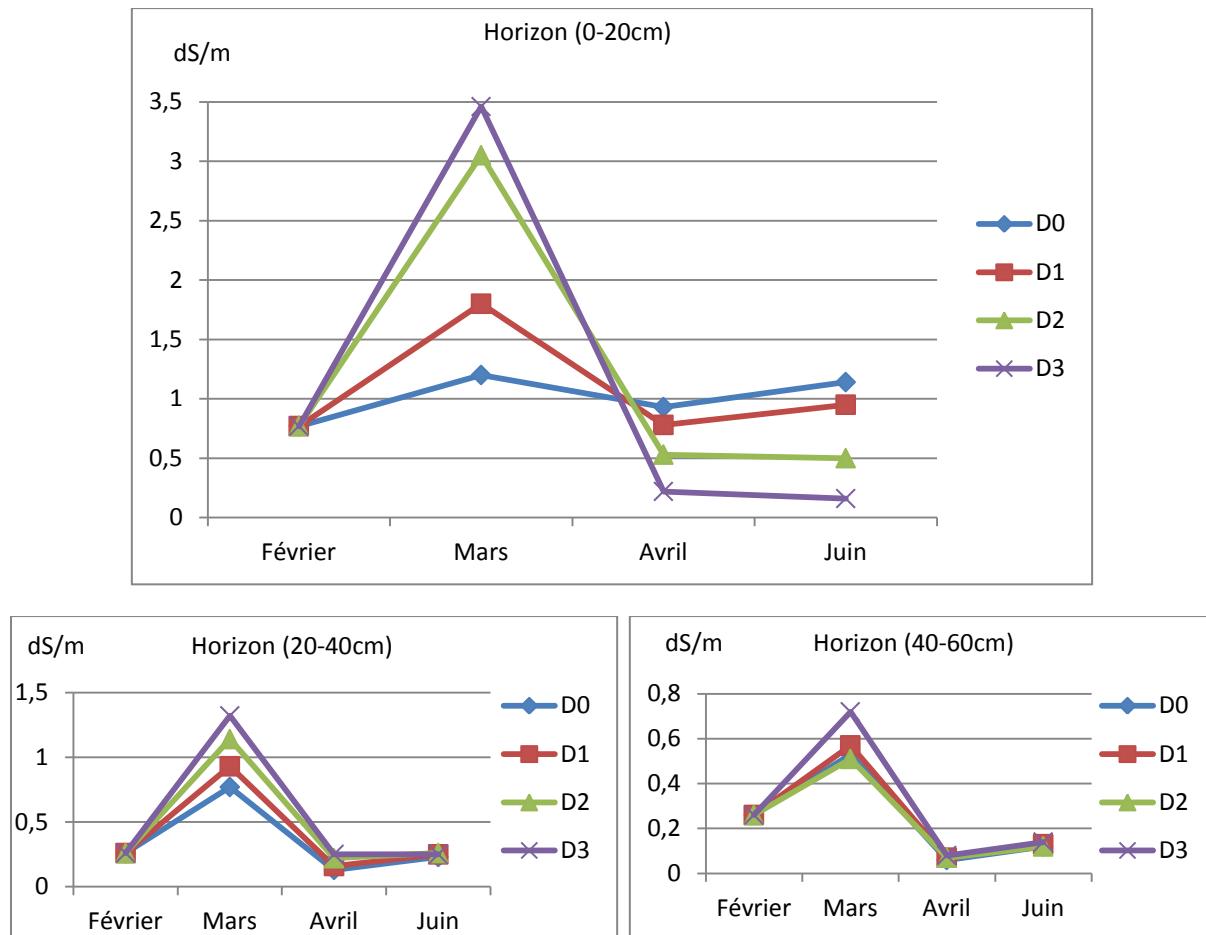


Figure 7 : Evolution moyenne de la CE du sol en (dS/m) à différentes doses et différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

Pour l'horizon de surface et après ajout de M.O au sol (le deuxième prélèvement), nous avons remarqué une palpable augmentation de la CE qui passe de 0,77 dS/m au premier prélèvement (témoin) à 3,46 dS/m au deuxième prélèvement pour la plus grande dose de M.O (D3). L'apport de la M.O a donc augmenté la teneur en sels dissous dans le sol. Cet accroissement provient de la libération des sels via la minéralisation rapide de la M.O, combiné à l'effet de l'irrigation de la parcelle expérimentale avec des eaux salines chargées en sels dissous.

Pour le troisième prélèvement effectué en mois d'avril, nous avons constaté une chute notable des teneurs en sels dissous dans le sol. Après un mois moyennement pluvieux (73,5 mm), la CE passe de 3,46 dS/m à 0,22 dS/m pour D3. Selon Yazdanpanah (2010), la

minéralisation des sols diminue souvent après une forte irrigation ou pluviométrie (phénomène de lessivage). Mais malgré l'effet indubitable de la pluviométrie dans le lessivage des sels du sol et donc dans la réduction de sa salinité, on ne peut dénier l'effet de la M.O dans la diminution de la conductivité électrique de ce dernier. Nous avons remarqué que la CE en diminuant, elle a touché 0,93 dS/m pour D0 qui reste une valeur bien plus importante que celle enregistrée pour D3 qui n'effleure que 0,22 dS/m. Ceci s'explique par l'effet de la M.O dans l'amélioration de la structure du sol qui se traduit généralement par la facilité du lessivage des sels de ce dernier et aussi par l'amélioration de la capacité de rétention d'une partie importante de ces sels par le complexe argilo-humique (CAH) .

En mois de Juin et après l'élévation des températures, on a pu remarquer que le sol avec de faibles quantités de M.O n'a pas pu résister face aux effets néfastes de l'évaporation et de l'accumulation des sels dissous en surface, contrairement au sol pourvu de plus de M.O (D2 et D3). Ceci peut être expliqué par l'apport important en M.O qui, en améliorant la structure des sols, il a facilité la rétention des sels en surface ainsi que le lessivage d'une partie par les eaux d'irrigation.

Nous pouvons donc conclure que la pluviométrie tout comme l'apport organique, ont un effet remarquable dans la réduction de la salinité des sols, mais qui diffère en fonction du temps. Contrairement à l'apport de la M.O qui prend du temps avant d'arborer des résultats significatifs, l'apport d'eau météorique lui, il a un effet plus ou moins instantané qu'on peut flairer directement après une pluviométrie importante. Donc dans une année pluvieuse (ce qui n'est pas assuré dans les zones arides et semi-arides à l'image du Maroc), l'incorporation d'une faible quantité de M.O au phénomène de lessivage par les eaux pluviales, peut prévenir la salinisation des sols. Mais comme on est dans une zone où la pluviométrie est non régulière et généralement faible, on doit donner plus d'importance à l'effet de la M.O dans la réduction de la salinité des sols qu'à celui de la pluviométrie.

c) Relation entre la M.O et la salinité du sol

Afin de bien visualiser la relation entre la M.O et la salinité du sol, on a procédé à une corrélation entre ces deux paramètres. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 18 : Résultats du test de corrélation pour la matière organique et la salinité du sol

Horizons (cm)	Mars M.O	Mars CE	Avril M.O	Avril CE	Juin M.O	Juin CE
D (0-20)	0.987	0.929	0.989	-0.972	0.989	-0.988
D (20-40)	0.535	0.763	0.439	0.842	0.503	0.298
D (40-60)	0.893	0.354	0.875	0.565	0.863	0.283

Corrélation faible : de 0,0 à 0,5

Corrélation forte : de 0,5 à 1,0

D'après les résultats du tableau 18, nous constatons qu'il y a de fortes à très fortes corrélations entre la dose de l'apport organique, le taux de M.O et la salinité du sol. En mois de mars, les corrélations sont positives pour les deux paramètres, mais deviennent négatives après pour la variable « salinité ». On peut donc conclure que l'apport organique augmente le taux de M.O dans le sol au moment où il diminue sa salinité, surtout dans l'horizon de surface ; une diminution qui continue même trois mois après l'ajout de la M.O.

Le graphe suivant montre clairement cette relation entre la M.O et la salinité du sol dans l'horizon de surface:

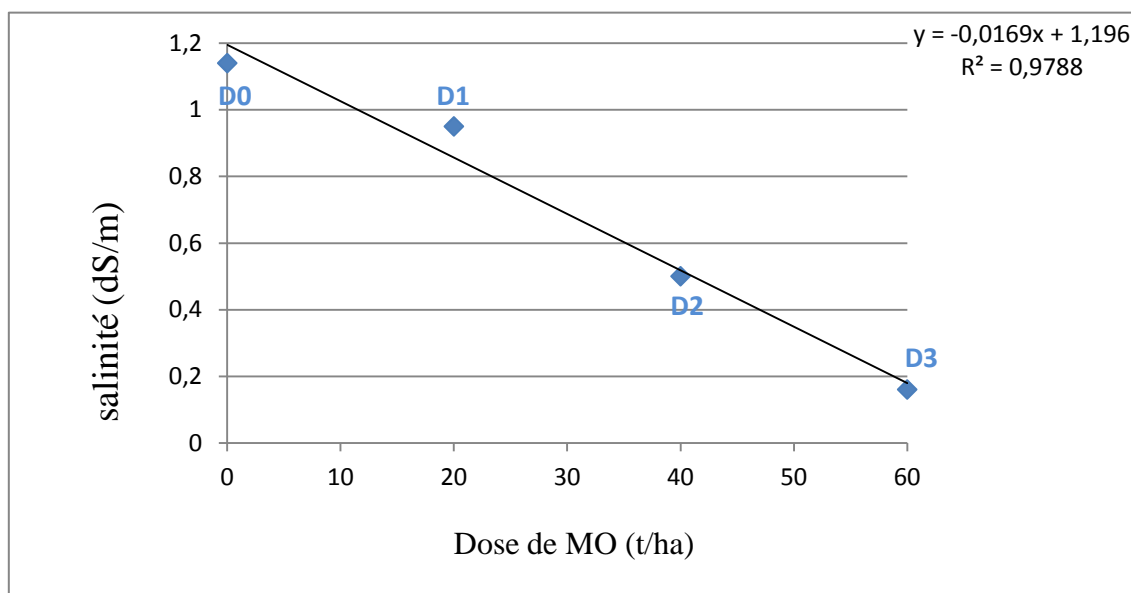


Figure 8 : Relation entre la M.O et la salinité du sol en mois de Juin

Selon le graphe, 98 % de la variabilité de la salinité est expliquée par la dose de la matière organique appliquée. Cependant, la relation entre la salinité et la M.O s'avère négative. Plus la M.O augmente et plus la salinité diminue (Fig. 8). Un résultat qui ne vient qu'affirmer davantage nos interprétations précédentes. La M.O a, en effet, une influence directe et non négligeable sur la salinité des sols.

IV.2.2. Effet de la M.O sur les propriétés physico-chimiques du sol

Les résultats statistiques de l'ANOVA sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 19 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois de mars

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.7044 NS	0.2690 NS	0.2348 NS	0.6031 NS	<.0001 THS	0.0317 S	0.0686 NS
D (20-40)	0.7952 NS	0.1416 NS	0.2706 NS	0.5145 NS	0.0356 S	0.1100 NS	0.4715 NS
D (40-60)	0.9033 NS	0.1416 NS	0.3708 NS	0.4946 NS	0.3133 NS	0.3765 NS	0.4319 NS

Tableau 20 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.1474 NS	<.0001 THS	0.0009 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS
D (20-40)	0.0831 NS	<.0001 THS	0.0010 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	0.0457 S
D (40-60)	0.3714 NS	0.0002 THS	0.5472 NS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	0.5080 NS

Tableau 21 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.1255 NS	<.0001 THS	0.0008 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS
D (20-40)	0.0878 NS	<.0001 THS	0.2991 NS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	0.5136 NS
D (40-60)	0.3827 NS	<.0001 THS	0.2329 NS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	0.2614 NS

NS : Valeur non significative ($Pr > 0,05$)

S : Valeur significative ($Pr < 0,05$)

HS : Valeur hautement significative ($Pr < 0,01$)

THS : Valeur très hautement significative ($Pr < 0,001$)

L'ANOVA montre que l'effet de la M.O sur les paramètres physico-chimiques ne devient significatif qu'à partir du mois d'avril, soit deux mois après l'ajout de la M.O au sol. Cet effet est très hautement significatif pour tous les paramètres à l'exception du pH. Il est aussi continu sur toute la période de l'expérimentation et concerne tous les horizons du sol, sauf pour le Na⁺ et l'ESP où l'effet de la M.O se limite à l'horizon de surface.

Les résultats du test de Dunnett sont présentés dans le tableau 22 :

Tableau 22 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques
en mois de mars

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	—	—	—	—	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 ***	—
D (20-40)	—	—	—	—	60 - 0 ***	—	—
D (40-60)	—	—	—	—	—	—	—

Tableau 23 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	—	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***
D (20-40)	—	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 ***
D (40-60)	—	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	—	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	60 - 0 *** 40 - 0 *** 20 - 0 ***	—

Tableau 24 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	—	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***
		40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***
		20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***
D (20-40)	—	60 - 0 ***		60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	
		40 - 0 ***	—	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	—
		20 - 0 ***		20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	
D (40-60)	—	60 - 0 ***		60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	
		40 - 0 ***	—	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	—
		20 - 0 ***		20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	

*** : Il y a une différence entre le témoin (0 t/ha) et la dose citée.

D'après le test de Dunnett, nous pouvons noter que les différences entre le témoin et les autres doses de M.O ne s'inscrivent qu'à partir du mois d'avril pour tous les paramètres à l'exception du pH. De ces résultats on peut donc conclure que la dose de la M.O a un effet palpable sur presque tous les paramètres physico-chimiques du sol et ce tout au long de la période d'étude.

a) Humidité équivalente

Durant notre expérimentation, nous avons suivi l'évolution de l'humidité équivalente dans le temps, à différentes profondeurs et à différentes doses de M.O. Les mesures sont faites sur les échantillons au laboratoire et les résultats sont présentés dans le tableau 25 :

Tableau 25 : Valeurs de l'humidité équivalente moyenne du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	3,58	3,58	3,58	3,58	0,80	0,80	0,80	0,80	0,21	0,21	0,21	0,21
Mars	9,55	10,73	15,51	15,66	8,83	8,81	8,81	9,69	13,97	10,78	10,39	14,31
Avril	10,13	12,2	15,88	15,95	9,09	10,3	10,55	10,57	13,14	15,1	15,53	15,64
Juin	10,15	12,78	16,13	16,89	9,10	10,87	11,09	11,70	13,16	15,35	15,55	15,99

Nous remarquons que l'humidité équivalente passe de 3,58% au premier prélèvement à presque 16,89% pour D3 au quatrième prélèvement dans l'horizon de surface. En profondeur, nous avons constaté qu'après l'ajout du fumier de bovin, l'humidité équivalente continue d'augmenter en passant de 0,80% et 0,21% à 11,70% et 15,99% au quatrième prélèvement toujours pour la dose la plus élevée de M.O (Tab. 25).

Les courbes suivantes donnent une vision plus claire sur l'évolution moyenne de l'humidité du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

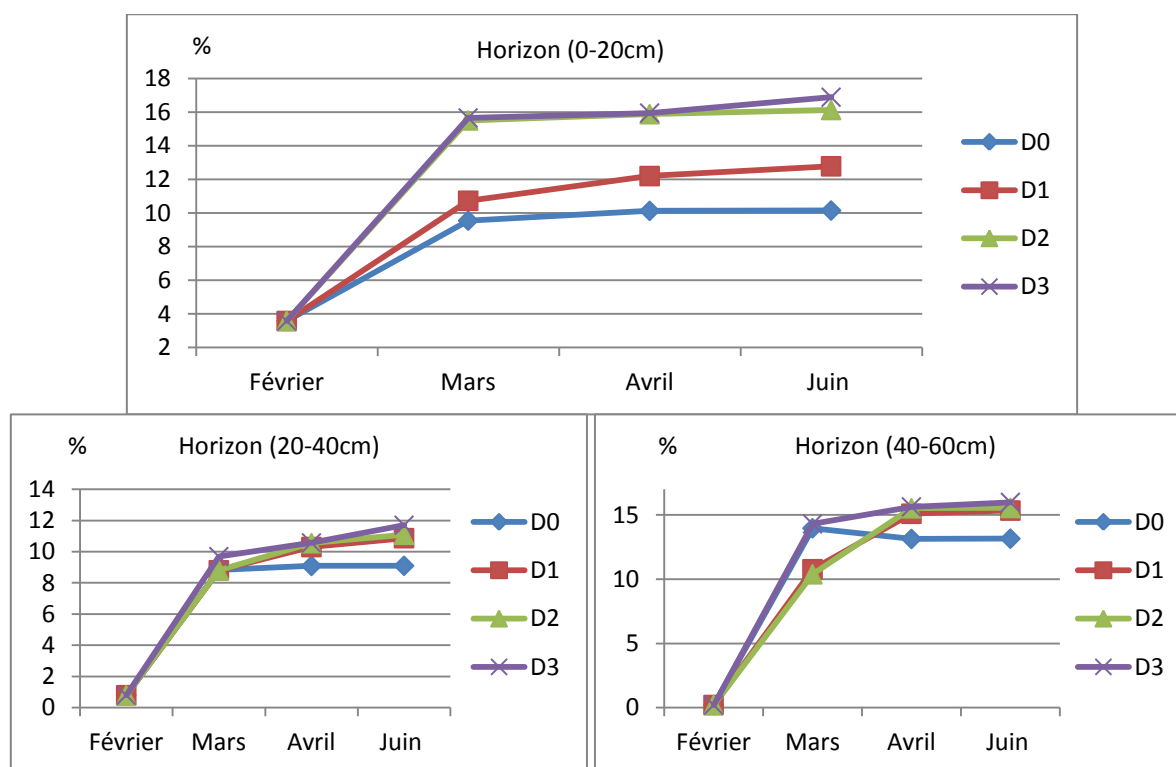


Figure 9 : Evolution de l'humidité équivalente moyenne du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

Un sol sableux a une porosité très forte mais sa capacité de stockage en eau est très faible suite à l'arrangement inadéquat des grains de sables. L'ajout d'une quantité raisonnable de M.O peut donc remédier à ceci, vu que cette dernière permet de retenir un volume plus important d'eau, qui varie généralement suivant la nature de la M.O utilisée.

D'après la figure 9, il est visible que les valeurs d'humidité vont dans le même sens que l'accroissement des doses de la M.O et ce dans tous les horizons. Monniers (1965) et Hillal (1974) ont indiqué que la M.O retient d'autant mieux l'eau qu'elle est humifiée et ceci selon Vanghan et Malcolm (1985), dépend de la présence des groupements fonctionnels spécialement carboxyles où les molécules d'eau entourent les atomes d'hydrogènes. Il est bien connu que le taux d'acide fulvique de la M.O augmente de plus en plus qu'elle est humifiée et par conséquent la quantité d'eau absorbée par la M.O augmente. Nos résultats viennent donc confirmer cette augmentation de l'humidité pendant le cycle d'évolution de la M.O apportée.

L'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol par rapport au témoin au début de l'expérimentation est expliquée par l'affinité des composantes de la matière organique (cellulose et acide fulvique) à l'eau (cf. Tab. 4).

Ainsi, L'humidité équivalente du sol est améliorée par l'amendement organique avec un maximum obtenu pour les sols amendés avec la plus grande dose du fumier de bovin, soit D3. Cette amélioration provienne du caractère hydrophile de la M.O.

b) pH

Dans les régions arides et semi-arides à l'exemple du Maroc, les sols sont généralement alcalins avec un pH qui oscille entre 7,5 et 8,5 (Daoud et Halitim, 1994).

Les résultats de mesure du pH dans les sols à différentes doses et à différentes profondeurs sont présentés dans le tableau 26.

Tableau 26: Valeurs moyennes du pH du sol à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,53	7,53	7,53	7,53
Mars	6,89	7,22	7,20	7,16	6,54	6,83	6,88	7,02	6,38	6,56	6,63	6,79
Avril	6,55	7,04	7,12	7,19	6,18	6,71	6,76	7,09	5,85	6,19	6,52	6,55
Juin	6,50	7,00	7,06	7,16	6,15	6,69	6,73	7,05	5,82	6,17	6,48	6,52

Nous constatons qu'en surface, le pH devient de plus en plus acide pour D0, passant de 8 au premier prélèvement à 6,50 en mois de Juin. Tandis que pour D1, D2 et D3, le pH diminue mais il reste plus ou moins neutre, effleurant des valeurs respectives de 7 ; 7,06 et 7,16. En profondeur le pH est encore plus acide qu'en surface et ses valeurs les plus faibles s'enregistrent toujours pour D0 avec 6,15 au quatrième prélèvement dans l'horizon 20-40cm et 5,82 dans l'horizon 40-60cm (Tab. 26).

Les courbes suivantes présentent d'une façon plus distincte l'évolution moyenne du pH du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol:

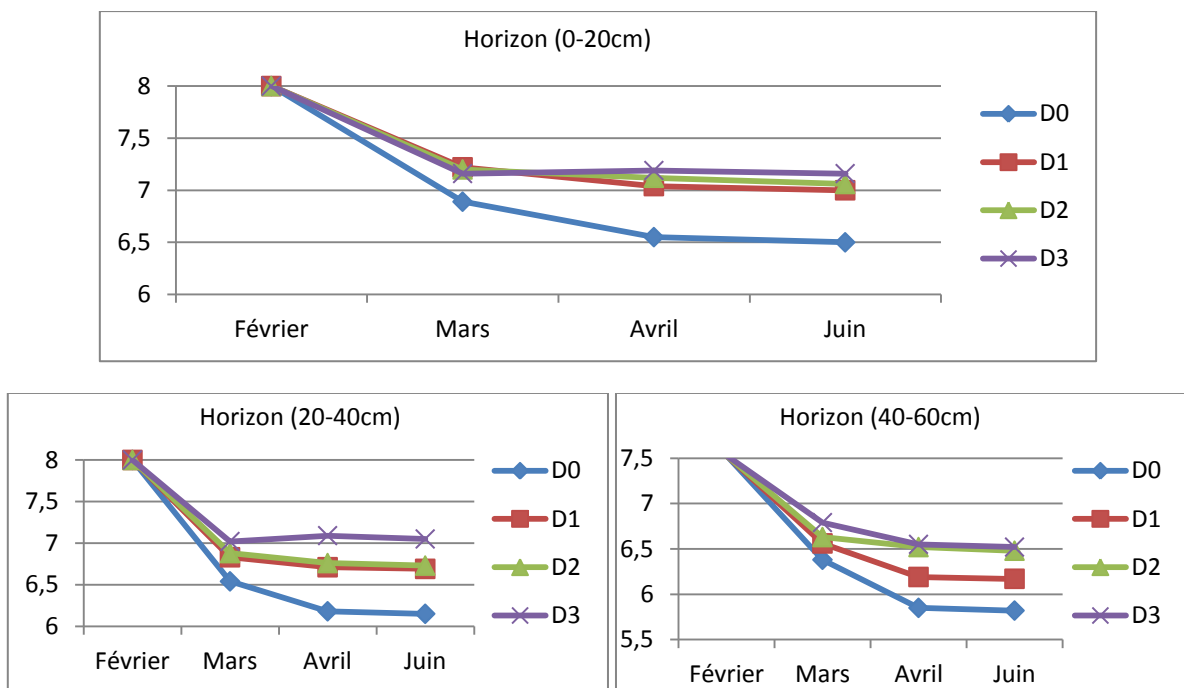


Figure 10 : Evolution moyenne du pH du sol à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

À partir de la figure 10, nous remarquons qu'après l'ajout de M.O au sol, le pH diminue. Chose expliquée par la libération des groupements acides du fumier de bovin (*Chamayou et Legros, 1989*) (il est connu que la décomposition de la M.O libère des H^+ qui acidifient le sol) et aussi par l'effet acidifiant des engrais (l'ammonitrate). Cette diminution est plus marquée pour D0 que pour D3 où la quantité de la M.O est maximale, ce qui met en évidence l'effet tampon de cette dernière.

c) Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique exprime l'aptitude d'un matériau à retenir des cations sous forme échangeable (*Calvet, 2003*). D'après Bockman et al. (1990), certains sols (particulièrement sableux légers), ont une faible capacité d'échange en cations. L'application de la M.O à ce type de sol contribue donc à l'augmentation de la CEC de ces terres (*Charreau, 1975*).

Les résultats de la capacité d'échange cationique obtenus dans ce travail sont présentés dans le tableau 27 :

Tableau 27: Valeurs moyennes de la CEC du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	8,60	8,60	8,60	8,60	7,70	7,70	7,70	7,70	6,60	6,60	6,60	6,60
Mars	9,82	11,96	13,35	14,87	7,86	8,7	8,51	11,72	7,3	8,17	7,57	8,72
Avril	8,88	12,14	13,57	15,53	6,19	6,84	7,13	10,3	5,21	6,42	6,42	7,18
Juin	8,54	11,36	13,62	15,92	5,82	6,68	7,38	10,41	5,04	6,39	7,04	8,70

Les données du tableau 27 montrent que la CEC augmente après ajout de la M.O et ce dans tous les horizons et pour toutes les doses, touchant son maximum pour D3 avec une valeur de 14,87 meq/100g. Pour D2 et D3, cette augmentation s'avère continue dans le temps et dans tous les horizons avec des valeurs maximales respectives de 13,62 meq/100g et 15,92 meq/100g dans l'horizon de surface. Alors que pour D0 et D1, la CEC ne cesse de diminuer dans le temps, en surface tout comme en profondeur.

La figure suivante retrace clairement l'évolution moyenne de la CEC du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol:

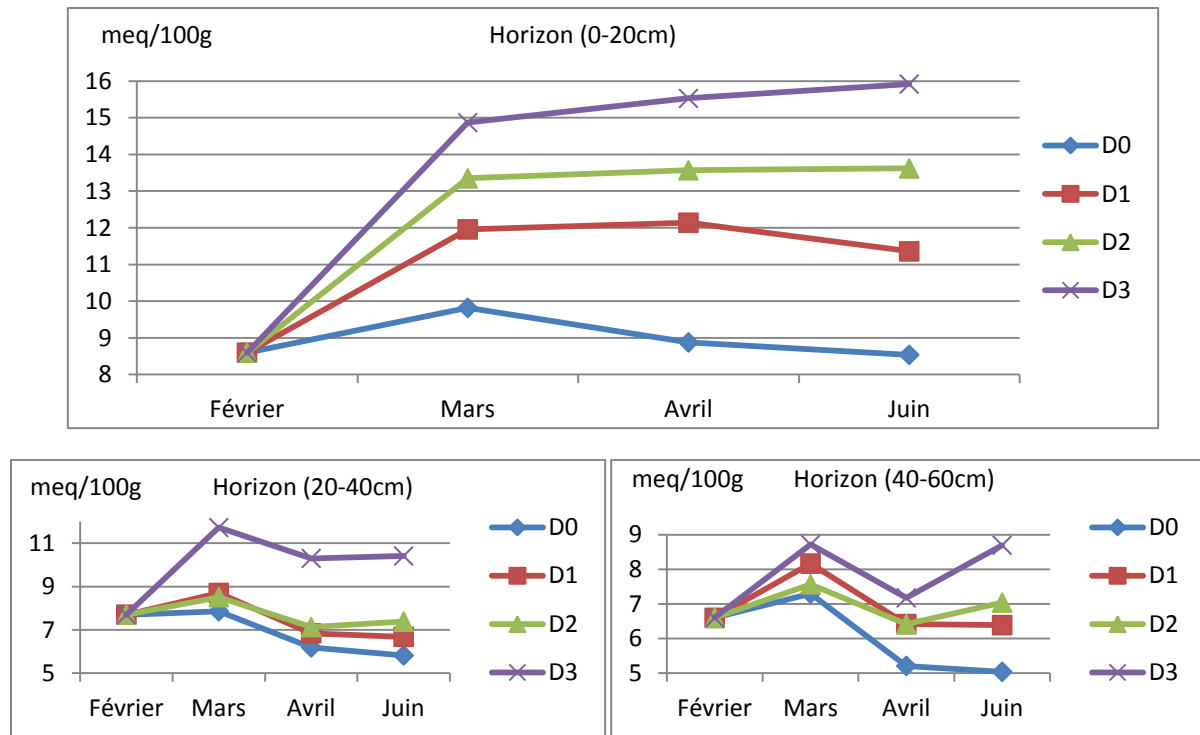


Figure 11 : Evolution moyenne de la CEC du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

Le fumier de bovin en cours d'humification comme toutes les autres sources de la M.O (*Delas, 1971*) a augmenté sensiblement la CEC des sols. Selon Baize (2000), la CEC augmente avec le degré d'humification. Elle présente une grande variation avec le mode d'humification de la M.O (*Mustin, 1987*). Thuriès et al. (2000) ont montré que pour le sol sableux, il y a une relation étroite entre la teneur en carbone et la CEC.

Dans l'horizon de surface et d'après les résultats obtenus, la CEC augmente au fur et à mesure qu'on accroît la dose de la M.O (Fig. 11). D'après Charreau (1975) et Baize (2000), cette augmentation est due essentiellement à l'existence des groupements carboxyles (-COOH). Nos résultats confirment ceux trouvés par Thuriès et al. (2000) qui ont indiqué que la fertilisation organique conduit à une augmentation de la capacité d'échange cationique (cas des sols sableux). C'est ainsi que la CEC est considéré comme un très bon indicateur de la fertilité du sol. Plus la CEC est élevée et plus elle peut retenir des cations dans le sol. Ces cations peuvent servir à améliorer la structure du sol (Ca^{2+} , par exemple) ou à alimenter les végétaux (NH_4^+ , par exemple).

Pour D0 tout comme en profondeur (témoin pourvu d'une faible quantité de M.O), la CEC diminue à partir du mois de Mars. Ceci s'explique par le décroissement de carbone

organique du sol par la minéralisation continue de la M.O du sol initial. Selon Mustin (1987), plus le sol est riche en M.O stable plus sa CEC est élevée. Tant que la M.O de notre sol est mature, elle se dégrade en décroissant la CEC du sol. Toutain (1979) a indiqué que dans les sols sahariens, la matière organique est détruite rapidement en climat chaud sous irrigation. Le décroissement de la CEC pour D0 et en profondeur est dû à la dégradation de la M.O et par conséquent un manque de sites électronégatifs où se fixent les cations.

Les résultats de la capacité d'échange cationique montrent donc que l'apport organique améliore indéniablement la CEC en libérant des composés organiques générateurs d'électronégativité et permettant de fixer les cations.

d) Pourcentage de sodium échangeable (ESP)

L'ESP est le degré de saturation en sodium du complexe d'échange du sol. Les données de ce dernier sont présentées dans le tableau 28 :

Tableau 28: Valeurs moyennes de l'ESP du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	7,44	7,44	7,44	7,44	3,64	3,64	3,64	3,64	3,18	3,18	3,18	3,18
Mars	6,77	4,82	5,87	4,88	4,72	5,93	5,57	7,50	4,20	6,08	5,20	8,64
Avril	7,20	3,16	2,46	1,70	7,48	7,27	7,58	10,60	11,64	10,19	6,86	10,53
Juin	8,16	3,85	2,32	1,38	8,78	6,89	6,34	7,49	10,54	12,63	11,78	14,46

En surface, nous avons observé une palpable diminution de l'ESP en mois de mars, soit juste après l'ajout de la M.O. La plus faible valeur de l'ESP est enregistrée pour D3 avec 4,88%. La diminution est continuelle dans le temps pour D2 et D3 avec 2,32 % et 1,38%, contrairement au D0 et D1 où l'ESP augmente vers la fin de l'expérimentation touchant son maximum pour D0 avec une valeur de 8,16%. En profondeur, les valeurs de l'ESP ne cessent d'augmenter, effleurant sa plus grande valeur pour D3 avec 7,49% dans l'horizon 20-40cm et 14,46% dans l'horizon 40-60cm (Tab. 28).

Les courbes suivantes décrivent l'évolution moyenne de l'ESP du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

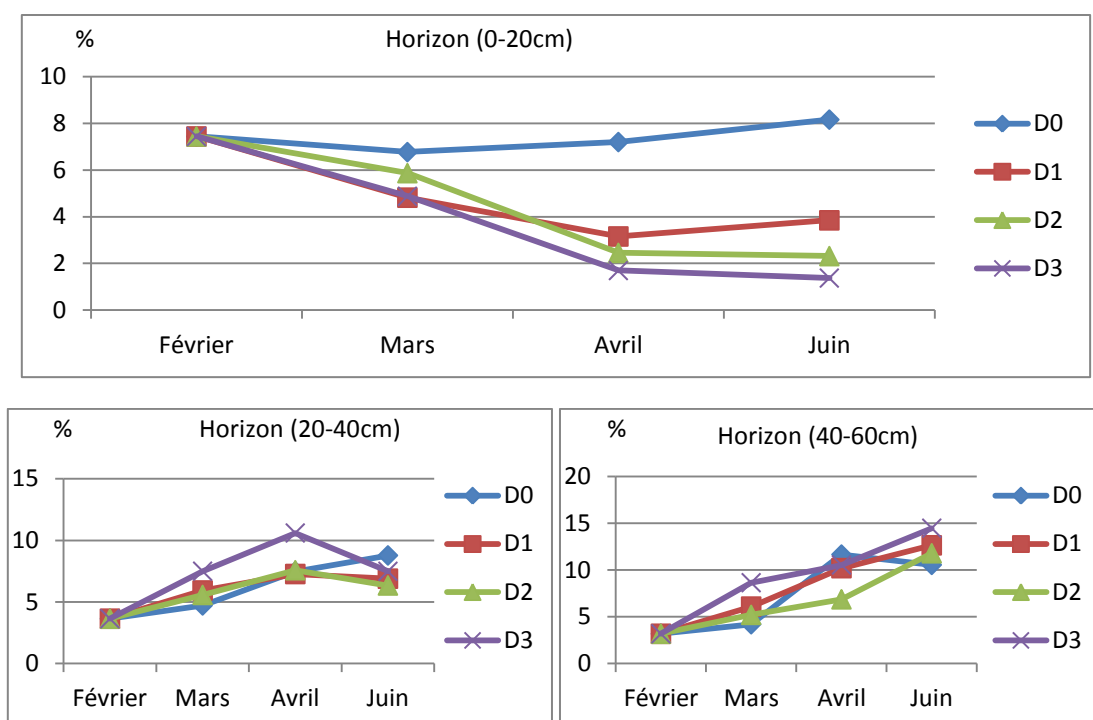


Figure 12: Evolution moyenne de l'ESP du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012

Généralement, l'apport de la M.O réduit l'ESP et ce par substitution du Sodium par le calcium sur le CAH et par lessivage de l'excès des sels dans la couche arable du sol et vers les profondeurs de ce dernier. Il est connu que les acides organiques renforcent la CEC du complexe argilo-humique, favorisant ainsi la désorption du sodium et son remplacement par le calcium.

e) Sodium

Pratiquement tous les cations rencontrés dans le sol (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ ...) ont un effet bénéfique ou neutre sur la structure, sauf le sodium (Na^+) qui agit en tant que dispersant dans le sol, contribuant ainsi à sa désagrégation.

Les résultats du dosage du sodium échangeable sont présentés dans le tableau 29 :

Tableau 29 : Valeurs moyennes du sodium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	0,64	0,64	0,64	0,64	0,28	0,28	0,28	0,28	0,21	0,21	0,21	0,21
Mars	0,66	0,57	0,77	0,71	0,37	0,51	0,46	0,94	0,31	0,5	0,39	0,79
Avril	0,64	0,38	0,33	0,26	0,46	0,50	0,54	1,09	0,61	0,68	0,44	0,76
Juin	0,70	0,44	0,32	0,22	0,51	0,46	0,47	0,79	0,53	0,80	0,83	1,26

Dans l'horizon de surface, nous avons remarqué une légère augmentation des teneurs en sodium échangeable du sol et ce juste après l'apport du fumier de bovin à ce dernier. L'augmentation concerne D0, D2 et D3 dont les valeurs passent de 0,64 meq/100g au premier prélèvement à 0,66 meq/100g au deuxième prélèvement pour D0 ; 0,77 meq/100g pour D2 et 0,71 meq/100g pour D3. Tandis que pour D1, la teneur en sodium échangeable diminue en touchant une valeur de 0,57 meq/100g. Au quatrième prélèvement, les teneurs en sodium échangeable continuent d'augmenter pour D0 qui n'est pourvu que d'une faible quantité de M.O, contrairement à D1, D2 et D3 où les teneurs en sodium échangeable diminuent remarquablement arrivant jusqu'à 0,44 meq/100g pour D1 ; 0,32 meq/100g pour D2 et 0,22 meq/100g pour D3. En profondeur, les valeurs du sodium ne cessent d'augmenter, effleurant les plus grandes valeurs pour D3 avec des valeurs de 0,79 meq/100g dans l'horizon 20-40cm et 1,26 meq/100g dans l'horizon 40-60cm (Tab. 29).

Les courbes suivantes décrivent l'évolution moyenne du sodium échangeable du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

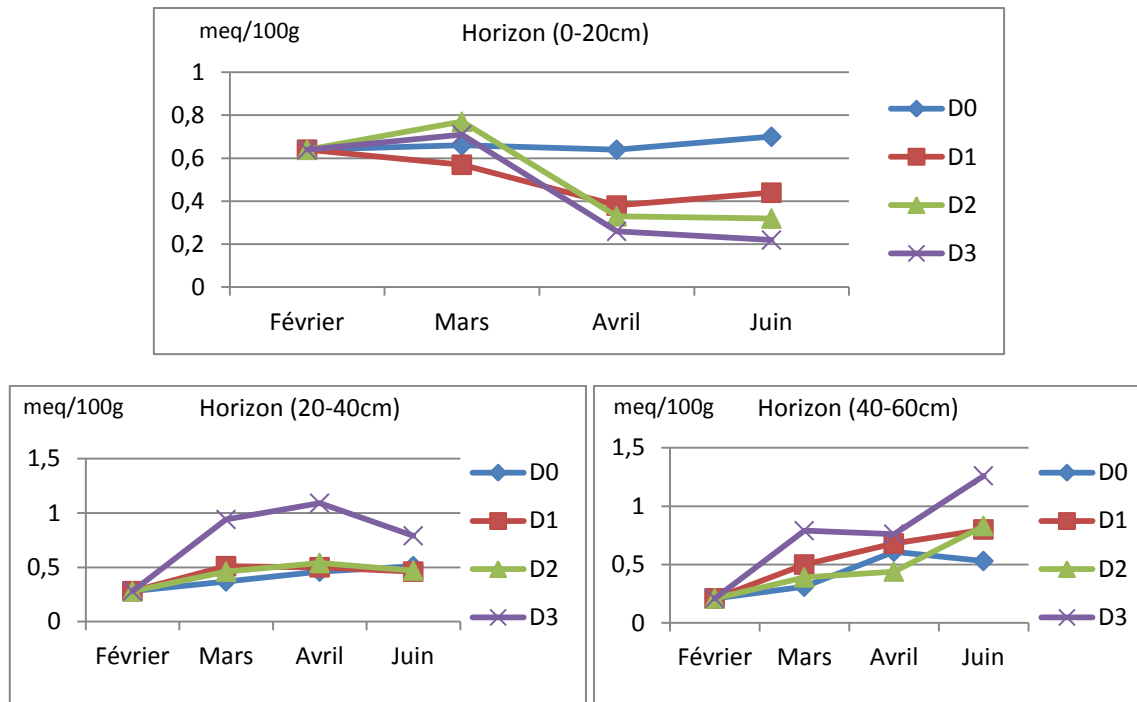


Figure 13 : Evolution moyenne du sodium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

L'apport organique à notre sol se traduit par une augmentation du sodium (Na^+) au début de l'expérimentation (Fig. 13). Une augmentation qu'on ne peut pas vraiment lier à la dose. Par contre la diminution de ce dernier est fortement liée aux doses de la M.O apportée et ceci est principalement dû au rôle des acides fulviques dans la rétention du sodium, mais aussi à l'effet des apports organiques sur les propriétés des sols qui, en améliorant leurs structures, ils facilitent le lessivage des sels et notamment le sodium. En profondeur et d'après l'ANOVA, l'effet de la M.O sur le sodium est non significatif.

f) Potassium

La teneur des sols en potassium diffère d'après la composition minéralogique de la roche mère et l'intensité des pertes, par exportation, le lessivage et l'érosion (*Halilat, 1993 et Halilat et al., 2000*).

Les résultats obtenus après dosage du potassium échangeable, sont exposés dans le tableau 30 :

Tableau 30 : Valeurs moyennes du potassium échangeable du sol en meq/100g à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au mois de Juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	0,30	0,30	0,30	0,30	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
Mars	0,47	0,60	0,80	1,03	0,20	0,23	0,20	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20
Avril	0,11	0,24	0,34	0,58	0,06	0,13	0,07	0,15	0,03	0,10	0,06	0,08
Juin	0,08	0,21	0,31	0,44	0,02	0,10	0,05	0,13	0,02	0,09	0,04	0,07

Un mois après l'ajout de la M.O, nous enregistrons une augmentation de la quantité du potassium dans tous les horizons et ce en fonction des doses de la M.O ajoutée. En surface, la valeur du potassium échangeable passe de 0,30 meq/100g à 1,03 meq/100g pour D3. Alors qu'en profondeur, le potassium passe de 0,14 meq/100g et 0,13 meq/100g à 0,30 meq/100g et 0,20 meq/100g toujours pour D3. Au troisième prélèvement les valeurs du potassium diminuent proportionnellement pour toutes les doses et dans tous les horizons (Tab. 30).

Les courbes suivantes décrivent l'évolution moyenne du potassium échangeable du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

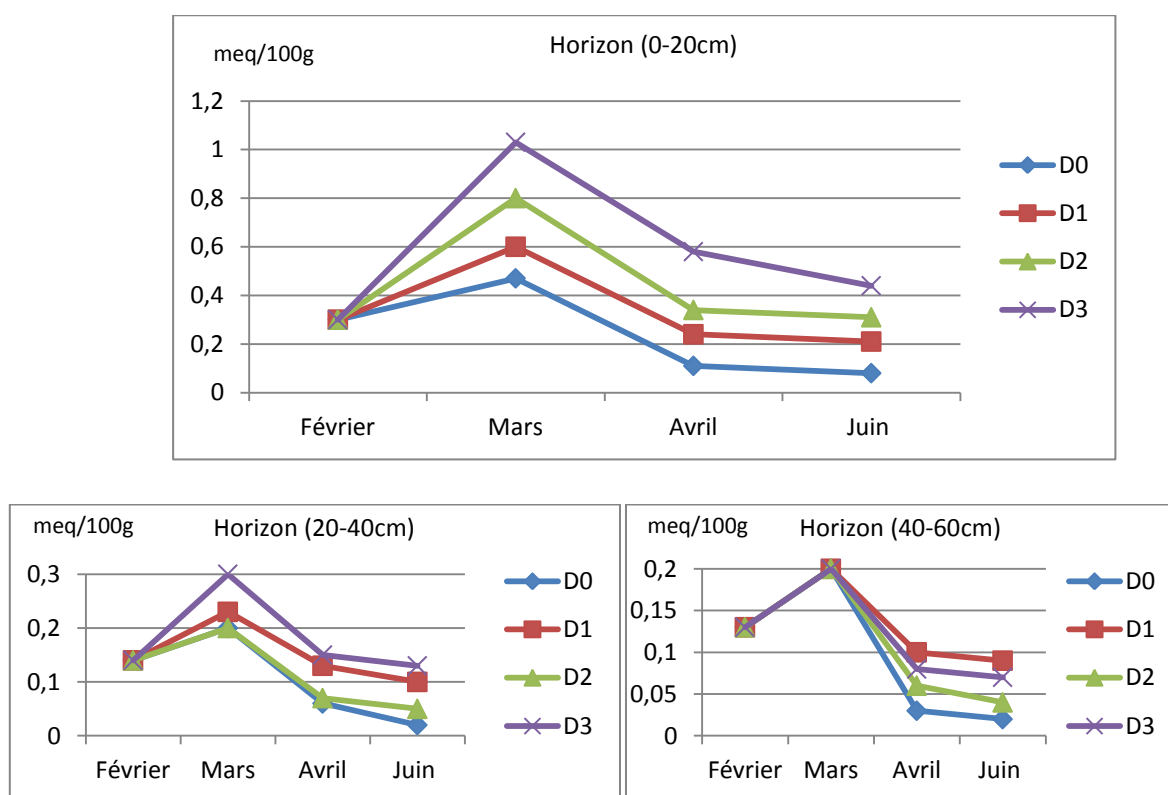


Figure 14 : Evolution moyenne du potassium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

La minéralisation de la M.O libère du potassium qu'on voit augmenter dans tous les niveaux du sol après ajout du fumier de bovin. La dose la plus importante du potassium est enregistrée dans le sol pourvu de la plus grande quantité de M.O (D3). À partir du troisième prélèvement, la quantité du potassium entre dans une phase de diminution perpétuelle et ce dans tous les horizons (Fig. 14). Dans l'horizon de surface, le potassium, un nutriment indispensable pour la plante (pomme de terre) se trouve donc épuisé par cette dernière alors qu'en profondeur, le décroissement du potassium est probablement dû au phénomène du lessivage déclenché par les pluies moyennement importantes du mois d'avril. On peut donc conclure que l'apport de la M.O pourvoie le sol d'une quantité assez importante du potassium utile pour la croissance des cultures.

g) Calcium

Le calcium échangeable est représenté par le calcium adsorbé sur les colloïdes argilo-humiques et plus généralement sur les complexes adsorbants.

Les résultats du dosage du calcium échangeable sont présentés dans le tableau 31 :

Tableau 31 : Valeurs moyennes du calcium échangeable du sol en meq/100g à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au mois de Juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	6,60	6,60	6,60	6,60	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
Mars	7,70	8,73	8,88	8,92	6,28	6,13	5,67	7,45	5,70	5,97	5,28	5,95
Avril	7,06	8,82	9,00	9,2	5,02	5,18	5,43	7,09	4,20	4,87	4,99	5,16
Juin	6,68	8,49	9,45	9,89	4,76	4,97	5,55	7,25	4,00	4,62	5,13	5,87

Après l'apport de la M.O au sol, sa teneur en calcium s'accroît en fonction des doses. Il est remarqué que dans l'horizon de surface, la valeur du calcium passe de 6,60 meq/100g à 8,92 meq/100g pour D3. Le calcium continue d'augmenter pour D2 et D3 et ce jusqu'au quatrième prélèvement touchant ainsi des valeurs respectives de 9,45 meq/100g et 9,89 meq/100g. Pour les faibles doses de M.O, les valeurs du calcium ne cessent de diminuer dans le temps arrivant à 6,68 pour D0 et 8,49 pour D1. En profondeur, les valeurs du calcium augmentent légèrement après l'apport de la M.O passant de 4,75 meq/100g à 7,45 meq/100g pour D3 pour ensuite décroître, effleurant ainsi leur minimum pour D0 avec 4,00 meq/100g (Tab. 31).

Les courbes suivantes décrivent l'évolution moyenne du calcium échangeable du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

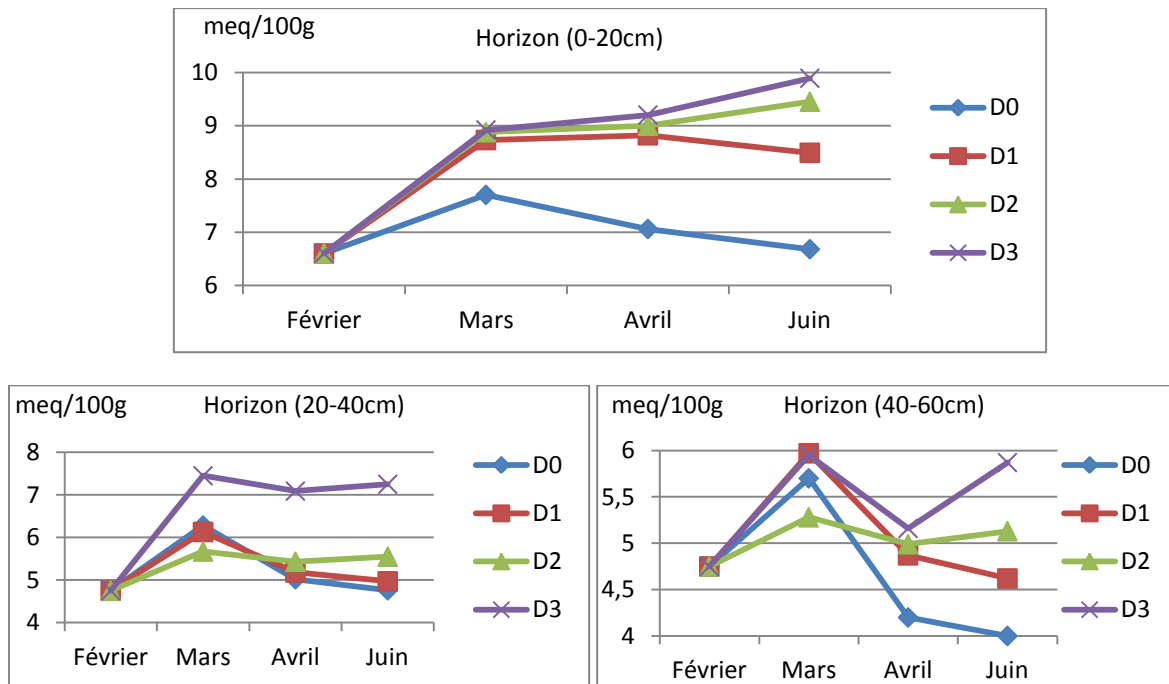


Figure 15 : Evolution moyenne du calcium échangeable du sol en (meq/100g à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

D'après la figure 15, nous constatons que l'apport organique au sol se traduit par une augmentation du calcium échangeable. Cet accroissement paraît clair après le deuxième prélèvement, soit la quatrième semaine de l'essai. Nos résultats confirment ceux obtenus par Thuriès *et al.* (2000), qui ont indiqué que la fertilisation organique entraîne une augmentation des cations échangeables en augmentant la teneur en carbone organique, ce qui est déjà cité dans plusieurs publications (Boissezon, 1977 & Moreau, 1983 & Wilczynski *et al.*, 1993 & Feller, 1994). Les plus grandes valeurs du calcium échangeable sont observées en surface, notamment pour D3. Ce résultat s'explique par la quantité de M.O apportée au sol. L'accroissement est toutefois suivi par une diminution vers la fin de la période expérimentale (pour D0 et D1) vu que le complexe argilo-humique ne retient pas assez de calcium, ceci est dû aux valeurs plus ou moins faibles de la M.O dans ces sols. En profondeurs, le calcium diminue après le deuxième prélèvement, probablement suite à son lessivage par les pluies du mois d'avril (73,5mm).

h) Magnésium

Le magnésium est presque toujours associé au calcium. Quand il est libéré dans le sol, il sature le complexe adsorbant, mais toujours en moindre proportion que le calcium.

Les résultats du dosage du magnésium échangeable sont présentés dans le tableau 32.

Tableau 32: Valeurs moyennes du magnésium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizons (20-40cm)				Horizons (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74
Mars	0,95	1,75	2,57	4,15	0,82	1,40	1,80	2,80	0,78	1,30	1,50	1,65
Avril	0,78	1,82	2,84	4,95	0,19	0,78	0,92	1,84	0,15	0,52	0,64	1,11
Juin	0,72	1,86	2,91	4,99	0,16	0,78	0,94	1,86	0,12	0,51	0,67	1,13

Après l'apport de la M.O au sol, nous avons remarqué que sa teneur en magnésium s'accroît avec la dose. En surface, la valeur du magnésium passe de 0,75 meq/100g à 4,15 meq/100g pour D3. La teneur en magnésium continue d'augmenter pour D1, D2 et D3 et ce jusqu'au quatrième prélèvement effleurant son maximum pour D3 avec 4,99 meq/100g. Pour D0 les valeurs du magnésium diminuent après le deuxième prélèvement arrivant à 0,72 meq/100g en mois de juin. En profondeurs les valeurs du magnésium augmentent légèrement après l'apport de la M.O passant de 0,75 meq/100g à 2,80 meq/100g pour D3 pour ensuite décroître au quatrième prélèvement et ce pour toute les doses (Tab. 32).

Les courbent suivantes décrivent l'évolution moyenne du magnésium échangeable du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

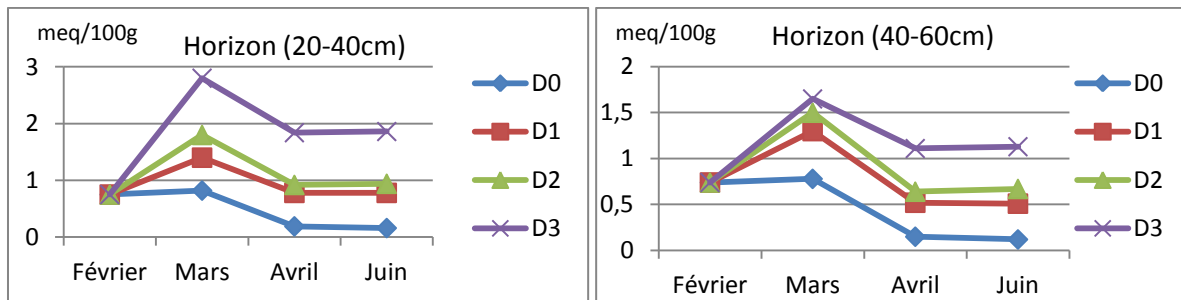
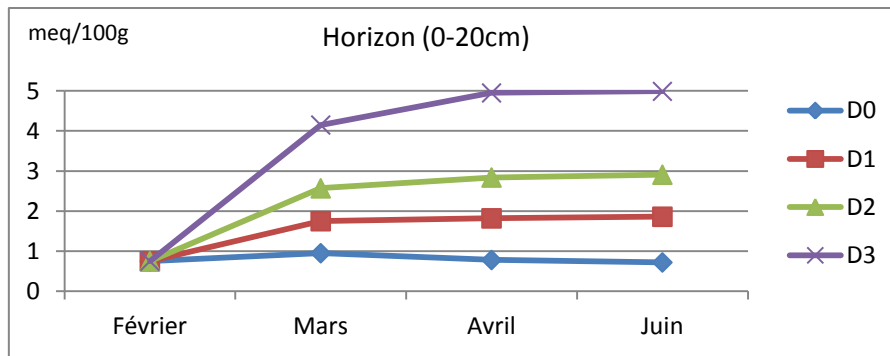


Figure 16: Evolution moyenne du magnésium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

À l'instar du calcium, le magnésium lui aussi se trouve influencé par l'apport organique. D'après la figure 16, le magnésium augmente avec l'accroissement de la dose de la M.O apportée. En surface, la plus grande valeur du calcium est observée pour D3 avec 4,99 meq/100g. Thuriès et *al* (2000) ont indiqué que la fertilisation organique entraîne une augmentation des cations échangeables. Pour D0, l'accroissement est suivi d'une décroissance vers la fin de la période expérimentale à cause de la diminution de la CEC du sol, suite à la dégradation de la M.O et aussi à l'exportation de la plante. En profondeurs, les teneurs en magnésium diminuent après le deuxième prélèvement et ce probablement suite au lessivage de ce dernier par les eaux pluviales du mois d'avril.

i) Relation entre la M.O et les paramètres physico-chimiques du sol

La relation entre la M.O et les paramètres physico-chimiques du sol peut être traduite à travers le test de corrélation dont les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 33 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois de mars

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.276	0.654	0.251	0.339	0.967	0.799	-0.341
D (20-40)	0.327	0.478	0.523	0.243	0.747	0.598	0.398
D (40-60)	0.287	0.478	0.469	0.011	0.566	0.389	0.457

Tableau 34 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.663	0.977	-0.887	0.862	0.979	0.981	-0.886
D (20-40)	0.758	0.654	0.790	0.871	0.960	0.887	0.621
D (40-60)	0.591	0.382	0.099	0.901	0.972	0.873	-0.214

Tableau 35 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin

Horizons (cm)	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	ESP
D (0-20)	0.680	0.993	-0.929	0.953	0.983	0.995	-0.927
D (20-40)	0.753	0.704	0.377	0.888	0.963	0.921	-0.205
D (40-60)	0.586	0.503	0.1871	0.946	0.983	0.981	0.483

Corrélation faible : de 0,0 à 0,5

Corrélation forte : de 0,5 à 1,0

D'après les résultats des tableaux 33 ; 34 et 35, nous constatons qu'à partir du mois d'avril, les corrélations entre la M.O et les paramètres physico-chimiques deviennent fortes à très fortes et ce en surface tout comme en profondeur. Ces corrélations sont positives pour la majorité des paramètres, à l'exception du Na⁺ et du ESP. On peut donc conclure que la M.O augmente les teneurs de la plupart des paramètres dans le sol au moment où elle diminue celles du Na⁺ et du ESP, surtout dans l'horizon de surface ; une diminution qui continue même trois mois après l'ajout de la M.O.

IV.2.3. Effet de la M.O sur la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre

La M.O est un facteur déterminant de la fertilité des sols. Dans les sols sablonneux comme ceux utilisés pour la culture de la pomme de terre, elle augmente la CEC de ces sols, permettant ainsi une meilleure efficacité des engrais minéraux appliqués (ex : l'ammonitrate) et, par conséquent, une réduction de leur perte dans l'environnement.

Les résultats de l'ANOVA pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 36 : Analyse de la variance pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre

Horizons (cm)	Mars P	Mars K ₂ O	Avril P	Avril K ₂ O	Juin P	Juin K ₂ O	Rendement
D (0-20)	0.2661 NS	0.2690 NS	0.2182 NS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS
D (20-40)	0.3611 NS	0.1416 NS	0.3039 NS	<.0001 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	—
D (40-60)	0.7512 NS	0.3868 NS	0.7016 NS	0.0002 THS	<.0001 THS	<.0001 THS	—

NS : Valeur non significative (Pr > 0,05)

S : Valeur significative (Pr < 0,05)

HS : Valeur hautement significative (Pr < 0,01)

THS : Valeur très hautement significative (Pr < 0,001)

Les résultats de l'ANOVA viennent affirmer l'effet de la M.O sur la fertilité du sol ainsi que sur le rendement de la pomme de terre. Un effet qui n'est concret que deux mois après le début de l'expérimentation et qui demeure significatif tout au long de la période d'étude. Cet effet est très hautement significatif et concerne surtout les horizons de surface.

Les résultats de Dunnett sont présentés dans le tableau 37 :

Tableau 37 : Résultats du test de Dunnett pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre

Profondeurs (cm)	Mars P	Mars K ₂ O	Avril P	Avril K ₂ O	Juin P	Juin K ₂ O	Rendement
D (0-20)	—	—	—	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***
				40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***
				20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***
D (20-40)	—	—	—	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	—
				40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	
				20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	
D (40-60)	—	—	—	60 - 0 ***	60 - 0 ***	60 - 0 ***	—
				40 - 0 ***	40 - 0 ***	40 - 0 ***	
				20 - 0 ***	20 - 0 ***	20 - 0 ***	

*** : Il y a une différence entre le témoin (0 t/ha) et la dose citée.

Le test de Dunnett, nous révèle que les différences entre le témoin et les autres doses de M.O ne s'enregistrent qu'à partir du mois d'avril et ce juste pour le K₂O, alors que pour le phosphore, ces différences n'apparaissent qu'en mois de juin, soit trois mois après l'ajout de la M.O au sol. Le facteur « Dose » a donc un effet significatif sur la fertilité du sol et par conséquent sur le rendement de la pomme de terre.

a) Potassium (K₂O)

Le potassium est l'élément absorbé en plus grande quantité par les plantes et il détermine le rendement et la qualité de manière décisive. La pomme de terre extrait du sol environ 60 kg de K₂O pour 10 tonnes de rendement en tubercules.

Les résultats d'analyse du potassium du sol à différentes doses et à différentes profondeurs sont présentés dans le tableau 38 :

Tableau 38: Valeurs moyennes du potassium du sol en (mg/kg) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au Juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	139,40	139,40	139,40	139,40	65,05	65,05	65,05	65,05	60,41	60,41	60,41	60,41
Mars	216,84	278,80	371,73	480,16	92,93	108,42	92,93	139,40	92,93	92,93	92,93	92,93
Avril	51,11	109,97	156,44	267,96	26,33	58,86	34,08	69,70	15,49	48,02	29,43	35,62
Juin	37,17	96,03	142,50	206,00	9,29	48,02	23,23	61,96	7,74	40,27	20,14	34,08

Un mois après l'ajout de la M.O, nous enregistrons une augmentation de la quantité du potassium dans tous les horizons et ce en fonction des doses de la M.O ajoutée. En surface, la valeur du potassium passe de 139,40 mg/kg à 480,16 mg/kg pour D3. Alors qu'en profondeur, le potassium passe de 65,05 mg/kg et 60,41 mg/kg à 139,40 mg/kg et 92,93 mg/kg toujours pour D3. Au troisième prélèvement les valeurs du potassium diminuent proportionnellement pour toutes les doses et dans tous les horizons (Tab. 38).

Les courbes suivantes décrivent l'évolution moyenne du potassium du sol en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol :

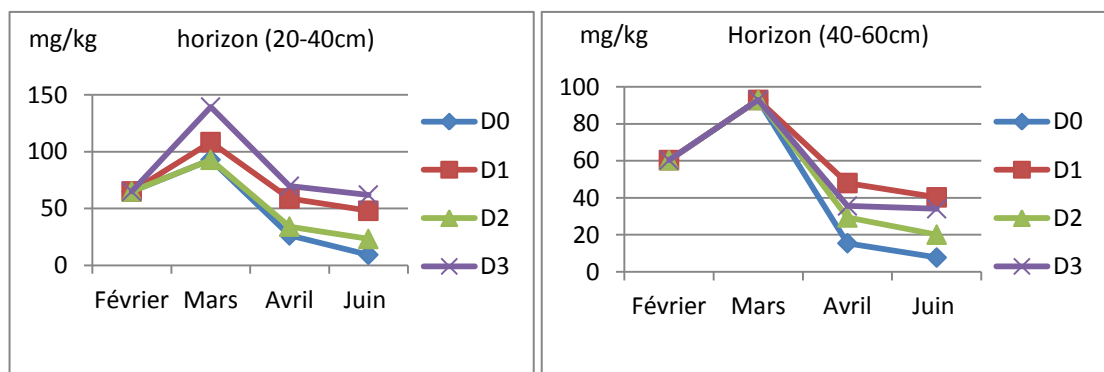
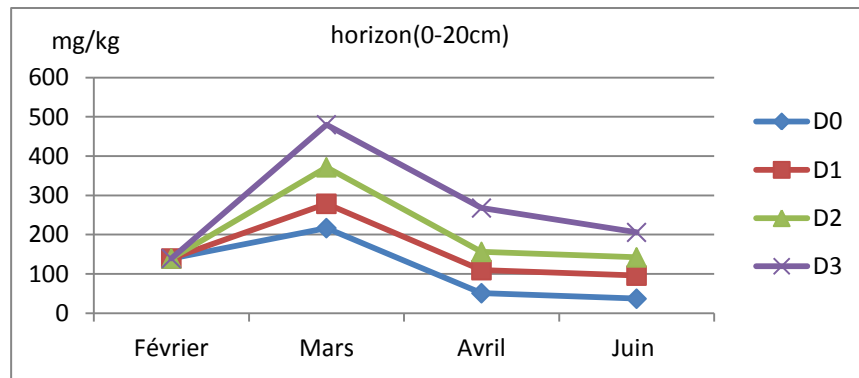


Figure 17: Evolution moyenne du potassium du sol en (mg/kg) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

La minéralisation de la M.O libère du potassium qu'on voit augmenter dans tous les niveaux du sol après ajout du fumier de bovin. La dose la plus importante du potassium est enregistrée dans le sol pourvu de la plus grande quantité de M.O (D3). À partir du troisième prélèvement, la quantité du potassium entre dans une phase de diminution perpétuelle et ce dans tous les horizons (Fig. 17). Dans l'horizon de surface, le potassium, un nutriment indispensable pour la plante (pomme de terre) se trouve donc épuisé par cette dernière alors qu'en profondeur, le décroissement du potassium est probablement dû au phénomène du lessivage déclenché par les pluies moyennement importantes du mois d'avril. On peut donc conclure que l'apport de la M.O pourvoie le sol d'une quantité assez importante du potassium utile pour la croissance des cultures.

b) Phosphore (P)

Le phosphore est une ressource limitée des sols qui se trouve dans les minéraux, les microbes du sol et la M.O. Dans la M.O, il existe plus de nutriments sous forme organique que sous forme inorganique. Par conséquent, une plus grande quantité de phosphore peut être

absorbée par les microbes du sol et la M.O et sera libérée au fil du temps par la minéralisation (Entz et al., 2011).

Les résultats d'analyses du phosphore dans les sols à différents doses et à différentes profondeurs sont présentés dans le tableau 39 :

Tableau 39 : Valeurs moyennes du phosphore du sol en (ppm) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

	Horizon (0-20cm)				Horizon (20-40cm)				Horizon (40-60cm)			
	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3	D0	D1	D2	D3
Février	129,30	129,30	129,30	129,30	22,10	22,10	22,10	22,10	9,20	9,20	9,20	9,20
Mars	154,53	164,70	184,86	202,41	89,10	87,75	100,53	99,36	27,54	24,93	38,43	42,12
Avril	148,03	159,78	178,65	198,21	83,37	67,5	94,80	95,03	21,57	19,2	32,59	37,79
Juin	137,87	145,30	169,97	187,89	76,85	53,23	88,76	90,32	17,34	17,87	27,75	31,78

Après l'apport de la M.O au sol, soit au deuxième prélèvement, une augmentation de la quantité du phosphore est enregistrée dans tous les horizons et en fonction des doses de la matière organique ajoutée. En surface, la valeur du phosphore passe de 129,3 ppm à 202,41 ppm pour D3. Dans l'horizon 20-40cm, les plus grandes valeurs du phosphore, 100,53 ppm et 99,36 ppm sont enregistrées respectivement pour D2 et D3. En profondeur (horizon 40-60cm) les valeurs du phosphore passent de 9,20 ppm à 42,12 ppm pour D3. Au troisième prélèvement les valeurs du phosphore diminuent proportionnellement pour toutes les doses et dans tous les horizons (Tab. 39).

Les courbes suivantes représentent d'une façon plus claire l'évolution moyenne du phosphore du sol en ppm en fonction des doses de la M.O et de la profondeur du sol:

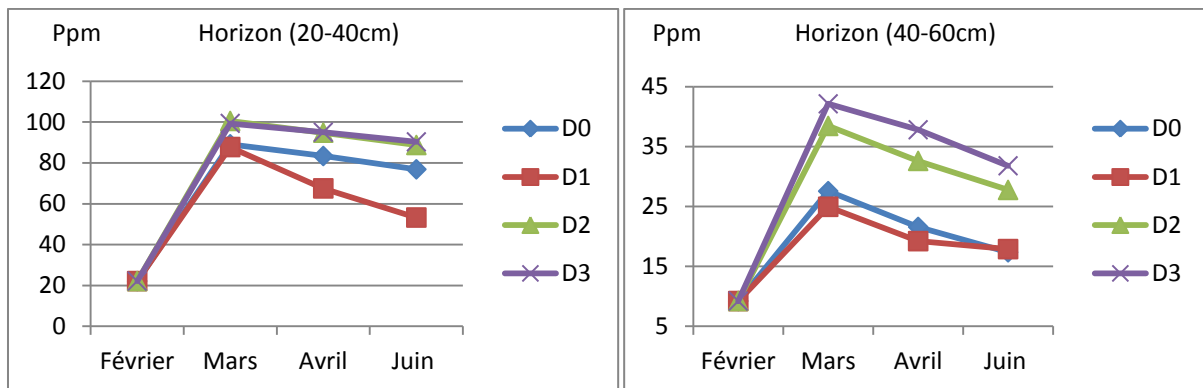
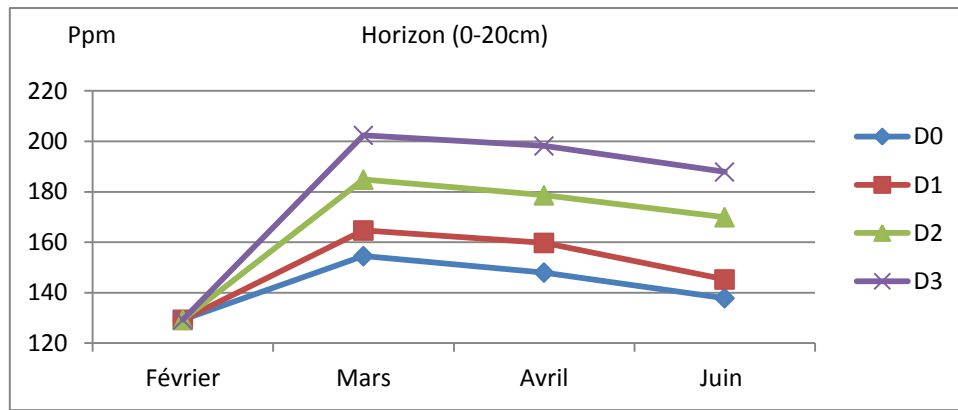


Figure 18 : Evolution moyenne du phosphore du sol en (ppm) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012

La minéralisation de la M.O libère plus d'une myriade de nutriments, parmi eux on trouve le phosphore. C'est pour cela qu'au deuxième prélèvement, juste après l'ajout de la M.O, la quantité du phosphore augmente remarquablement dans le sol surtout pour D3, là où on a le plus de M.O (Fig. 18). Au troisième prélèvement, la quantité du phosphore diminue dans tous les horizons ceci est due à deux phénomènes bien distincts. Dans l'horizon de surface, le phosphore est absorbé par la plante (pomme de terre) qui en a le plus grand besoin pour garantir sa nutrition et sa croissance tandis qu'en profondeur, le phosphore est lessivé par les eaux pluviales et celles d'irrigation, ce qui explique son décroissement dans les horizons 20-40cm et 40-60cm. Il s'avère donc que l'apport de la M.O pourvoie le sol d'une quantité non négligeable du phosphore, nécessaire pour un bon rendement des cultures.

c) Rendement de la pomme de terre

Les résultats du rendement sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 40: Valeurs moyennes du rendement de la pomme de terre en (t/ha) en fonction de la dose de la M.O

Doses	Rendement (t/ha)
D0	35
D1	40,10
D2	47,10
D3	63

Le rendement de la pomme de terre passe de 35 t/ha pour D0 à 63 t/ha pour D3. Cette différence est due aux doses de la M.O ajoutée. Plus le sol est pourvu de M.O, plus il devient fertile et donne de meilleurs résultats surtout au niveau du rendement (Tab. 40).

d) Relation entre la M.O, la fertilité, le rendement et la salinité du sol

La relation entre la M.O et la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre peut être exprimée à travers le test de corrélation dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 41 : Résultats du test de corrélation pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre

Horizons (cm)	Mars P	Mars K ₂ O	Avril P	Avril K ₂ O	Juin P	Juin K ₂ O	Rendement
D (0-20)	0.61375	0.65491	0.63288	0.97766	0.97771	0.99376	0.960
D (20-40)	0.34783	0.47809	0.38072	0.65497	0.56775	0.70407	—
D (40-60)	0.36588	0.45409	0.39732	0.38274	0.91175	0.50340	—

Corrélation faible : de 0,0 à 0,5

Corrélation forte : de 0,5 à 1,0

Selon le test de corrélation, nous pouvons remarquer qu'à partir du mois de mars, les corrélations entre la M.O et la fertilité du sol sont fortes, mais elles ne deviennent très fortes qu'en mois d'avril pour K₂O voire juin pour le phosphore. La relation entre la M.O et le rendement de la pomme de terre est également très forte avec une valeur de 0,960. De ces résultats, on peut conclure que la M.O contribue remarquablement à la fertilité du sol ainsi qu'à son rendement.

Afin de bien visualiser la relation entre le rendement, la M.O et la salinité, il nous a paru utile d'étudier leurs corrélations. Les résultats sont présentés sur les graphes suivants :

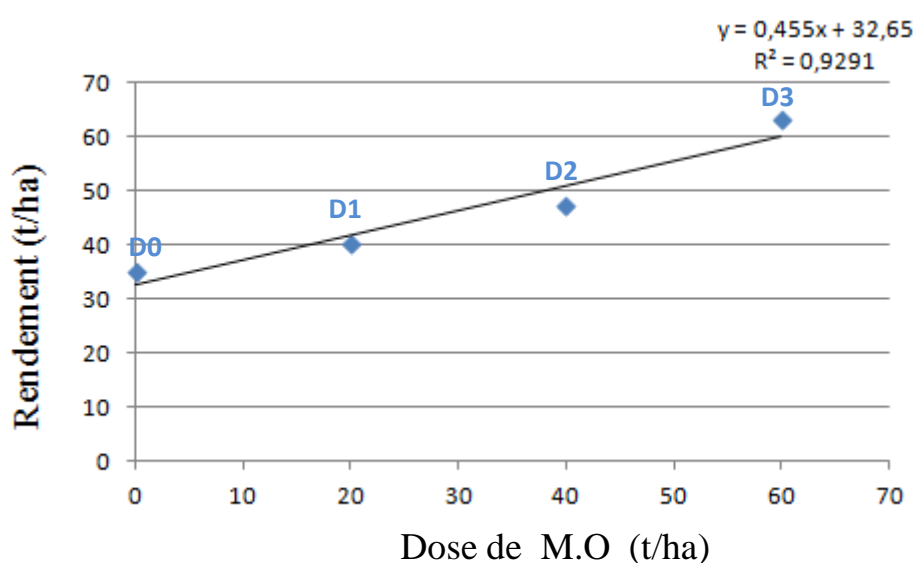


Figure 19 : Relation entre le rendement et la dose de M.O

D'après la figure 19, 93 % de la variabilité du rendement est expliquée par la dose de matière organique appliquée. La relation entre ses deux s'avère positive. En effet, le rendement augmente avec le taux de M.O ajouté au sol. La M.O a donc un effet assez important sur les rendements des cultures.

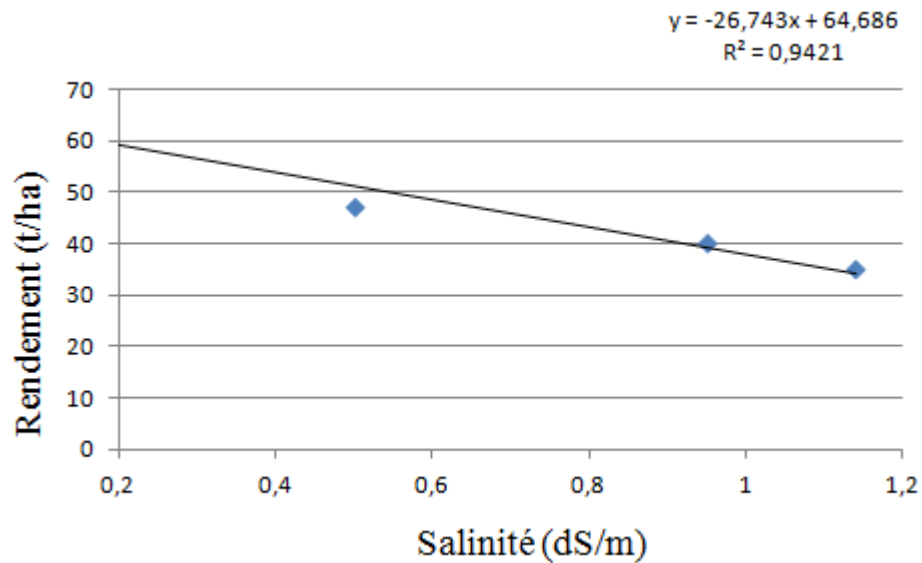


Figure 20 : Relation entre le rendement et la salinité du sol

La figure 19 montre que 94 % de la variabilité du rendement est expliquée par la salinité. Néanmoins, la relation entre le rendement et la salinité s'avère plutôt négative. Moins la salinité du sol est importante et plus le rendement augmente. Ainsi, la salinité peut être considérée comme étant un paramètre défavorable pour le développement des cultures.

Conclusion et recommandations

À l'issue de cette étude, il apparaît clairement que l'apport organique aux sols sableux, irrigués avec les eaux salines de la région de Skhirat, améliore leurs propriétés physicochimiques ainsi que leur fertilité et diminue remarquablement leur salinité.

L'analyse de l'ensemble des paramètres étudiés permet de tirer les conclusions suivantes :

Au début de l'essai, l'apport organique a augmenté la salinité du sol suite à la libération des sels via la minéralisation rapide de la M.O, ceci combiné à l'effet de l'irrigation de la parcelle expérimentale avec des eaux salines chargées en sels dissous. La conductivité électrique diminue après avec le temps mais aussi avec l'accroissement de la dose de matière organique. Ceci s'explique par l'effet de la M.O dans l'amélioration de la structure du sol qui se traduit généralement par la facilité du lessivage des sels de ce dernier et aussi par l'amélioration de la capacité de rétention d'une partie importante de ces sels par le complexe argilo-humique (CAH). En surface, la plus faible salinité enregistrée est de 0,16 dS/m. Celle-ci est obtenue vers la fin de l'expérimentation avec la dose D3 (60 T/h). En mois de Juin, nous avons remarqué que pour D0 la salinité a augmenté de presque 50% tandis que pour D3, elle a diminué d'à peu près 80%.

L'apport organique à des doses croissantes fait diminuer le pH. Chose expliquée par la libération des groupements acides du fumier de bovin mais aussi par l'effet acidifiant des engrais. Cette diminution est plus marquée pour D0 que pour D3 où la quantité de la M.O est maximale, ce qui met en évidence l'effet tampon de cette dernière.

La matière organique accroît l'humidité équivalente du sol pendant toute la période expérimentale. La valeur maximale est enregistrée pour D3 avec 16,89%.

L'analyse des résultats de la capacité d'échange cationique a montré que l'utilisation du fumier de bovin comme amendement est très positive. On constate une amélioration très hautement significative de la capacité d'échange cationique en fonction de la dose de matière

organique et par conséquence une amélioration des cations échangeables : calcium, magnésium et potassium. Le sodium quant à lui, il diminue en fonction de la dose.

Généralement, l'apport de la matière organique réduit le pourcentage de sodium échangeable et ce par substitution du sodium par le calcium sur le complexe argilo-humique et par lessivage de l'excès des sels dans la couche arable du sol et vers les profondeurs de ce dernier. Il est connu que les acides organiques renforcent la capacité d'échange cationique du complexe argilo-humique, favorisant ainsi la désorption du sodium et son remplacement par le calcium.

La minéralisation de la matière organique libère le potassium et le phosphore utile pour la croissance des cultures. Ils augmentent alors en début de l'expérimentation mais ils se retrouvent vite épuisés par la plante (pomme de terre).

Plus le sol est pourvu de matière organique, plus il devient fertile et donne de meilleurs rendements. Un rendement qui passe de 35 t/ha pour D0 à 63 t/ha pour D3. Cette différence est due aux doses de la M.O ajoutée.

Au terme de cette étude, le suivi de l'effet de la matière organique sur la salinité du sol pendant quatre mois nous permet de montrer que l'apport de la matière organique influe considérablement sur la salinité du sol, sur ses propriétés physico-chimiques et aussi sur sa fertilité et son rendement.

En ce qui concerne la dose, nous avons constaté que la dose 60 t/ha (D3) et celle qui a donné de meilleurs résultats sur tous les niveaux. Mais au lieu d'utiliser une assez grande quantité de matière organique en une seule fois, il serait plus pratique d'opter pour des apports raisonnables et réguliers.

La fertilisation organique est donc très intéressante pour les sols sableux en diminuant leur salinité et en améliorant en général leurs propriétés physico-chimiques, leur fertilité et leur rendement. Même si ces modifications sont limitées dans le temps, nous pensons que l'apport organique régulier et raisonné peut maintenir cette amélioration.

Des progrès plus fins sont encore possibles en matière de prévenir voire diminuer la salinisation des sols. Les problèmes environnementaux rencontrés dans les grands périmètres irrigués, peuvent être maîtrisés voire même résolus si les gestionnaires de ces périmètres ainsi que les agriculteurs et usagers de l'eau adoptent une panoplie de mesures techniques et de management rationnel des ressources en eau et des sols. Des stratégies spécifiques doivent être définies tenant compte de ces problèmes environnementaux hiérarchisés, par ordre de priorité d'une part, et des moyens financiers, humains et matériels potentiellement mobilisables, d'autre part. Une implication et une sensibilisation de tous les acteurs concernés sont plus qu'impératives pour la réussite des actions d'amélioration et de gestion durable des ressources naturelles et des infrastructures hydro-agricoles, pas juste dans la zone de Skhirat, mais aussi à l'échelle nationale voire même internationale.

Références bibliographiques

- AFNOR, (1977)** - Aliments des animaux. Dosage des cendres brutes. NFV.18-101.2 p..
- AHMAD G.E., SCHMID J., (2002)** - "Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems". Energy Conservation and Management, 43:2641-2649.
- AL-WAZZAN Y., SAFAR M., MESRI A., (2003)** - "Reverse osmosis brine staging treatment of subsurface water". Desalination, 155:141-151.
- AYERS R.S., WESTCOT D.W., (1976)** - "Water quality for agriculture". FAO Irrigation, Drain, Paper, 29.Fev.1, FAO, Rome.
- BADRAOUI M., BELLOUTI A., LAHLOU M., CHARKAOUI F.Z., CHOURAICHI M., (2005)** - Gestion de la salinité des sols et des eaux dans le périmètre irrigué du Tadla. Actes édition, IAV, Rabat, pp 87 -100.
- BADRAOUI M., SOUDI B., LAHLOU M., KABBASSI M., ANIBA K., (1998)** - Evaluation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué des Doukkala. Projet d'initiatives propres, AGCD-UCLIAV.
- BAIZE D., (2000)** - Guide des analyses en pédologie. Choix. Expression. Présentation. Interprétation. 2^{ème} Ed., INRA, Paris, 257p..
- BLACK C.A., (1965)** - "Methods of soil analyses, chemical and Microbiological properties", Num9, in the series Agronomy, Part2, pp 771-1572.
- BOCKMAN O.C., KARSTED O., LIE O.H., RICHARD I., (1990)** - Agriculture et fertilisation. Les engrais et leur avenir. Edit, Taugen Grafiste, Centre, Oslo, 258p..
- BOISSEZON P., (1977)** - Essai de détermination du rôle des matières organiques dans la capacité d'échange des sols ferralliques. Science du sol, Vol 2, pp 61-68.
- BRYSSINE G., (1961)** - La salinité du sol et ses problèmes. Les cahiers de la recherche agronomique 12 : 37- 56.
- CALVET R., (2003)** - Le sol propriétés et fonctions. Tome 1. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Edit, France Agricole, 455p..
- CHAMAYOU H., LEGROS J.P., (1989)** - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Technique vivante. Presses universitaires de France, Paris, pp 212-213.
- CHARREAU G., (1975)** - Matière organique et biochimique du sol dans les zones tropicales sèches d'Afrique occidentale. Bullet. Pédol. FAO. N° 27, Rome, pp 303-323.
- DAOUD Y., HALITIM A., (1994)** - Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. Sécheresse. 5(3), pp 151-160.
- DEBBARH A., BADRAOUI M., (2002)** - Irrigation et environnement au Maroc. Situation actuelle et perspectives. In : Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002. Marlet S., Ruelle P. (éd.). Montpellier, CEMAGREF, Cirad, IRD (cédérom du Cirad).
- DELAS J., (1971)** - Évolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apport massif et répété de matières organiques de différentes origines. Ann. Agr.vol 5 (22), pp 585-610.
- DUCHAUFOR Ph., (1995)** - Abrèges pédologie : sol, végétation, environnement. 4^{ème}Ed., Masson, Paris, 324p..
- DUCHAUFOR Ph., (1965)** - Précis de pédologie. Masson, Paris, 481p..
- DUTHIL J., (1973)** - Elément d'écologie et d'agronomie. Tome II. Exploitation et amélioration du milieu. Ed.J.B. Baillièrè, Paris, 265p..

- EL-KADY M., EL-SHIBINI F., (2001)** - "Desalination in Egypt and the future application in supplementary irrigation". *Desalination*, 136:63-72.
- ENTZ M.H., GUILFORD R., GULDEN R., (2001)** - Crop yield and soil nutrient status on 14 organic farms in the eastern portion of the northern Great Plains. *Revue canadienne de phytotechnie* 81, 351-354.
- FAO, (1994)** – "Irrigation and drainage paper" . *Water quality for agriculture*. 29 Rev.1.
- FELLER C., (1994)** - La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 :1 : recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse de Doctorat, Univ. Strasbourg (ULP), 190p..
- GAUCHER G., (1968)** - *Traité de pédologie, agricole, le sol et ces caractéristiques agronomiques*. Ed. DUNOD, Paris, 578p..
- GAUCHER G., BURDIN, S. (1954)** - " Géologie, Géomorphologie et Hydrologie des terrains salés", *Presse Universitaire de France*, 9-35.
- GHANEM H., (1974)** - " Carte pédologique des Zaers, de la Basse Chaouia N-E et des Sehouls au 1/200.000ème ".
- HALILAT M.T., (1993)** - Etude de la fertilisation azoté et potassique sur le blé dure (variété Aldura) en zones sahariennes (région d'Ouargla). *Mémoire, Magis, Batna*, 130p..
- HALILAT M.T., DOGAR M.A., BADRAOUI M., (2000)** - Effet de l'azote, du potassium et de leur interaction sur la nutrition du blé sur sol sableux du désert algérien. *Revue. Homme, terre et eaux*. Vol.30 (115), pp 32-39.
- HILLAL D., (1974)** - *L'eau et le sol : principes et processus physiques*. Poly Académie, Presse, Neuyourk, 357p..
- KOULL N., (2007)** – Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région de Ouargla. *Mémoire de Master, Univ. Kasdi Merbah Ouargla*, 92p..
- LABORDE H.M., FRANCA K.B., NEFF H., LIMA A.M.N., (2001)** - "Optimisation strategy for a small-scale reverse osmosis water desalination system based on solar energy", *Desalination*, 133:1-12.
- LACHARME M., (2001)** - La mise en place des cultures, variétés, dates de semis, mode de semis (semis direct et pépinière-repiquage). *Direction de la Recherche Formation Vulgarisation*, 25p..
- LAHLOU M., BADRAOUI M., SOUDI B., GOUMARI A., TESSIER D., (2002)** - Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. *Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France*.
- LEE R.W., GLATER J., COHEN Y., MARTIN C., KOVAC K., MILOBAR M.N., BARTEL D.W., (2003)** - "Low pressure RO membrane desalination of agricultural drainage water". *Desalination*, 155:109-120.
- MAAS E.V., HOFFMAN M., (1977)** - "Crop salt tolerance : current assessment". *Journal of irrigation and drainage division* Vol 103:115-134.
- MARGAT J., (1961)** - Les eaux salées au Maroc – *Hydrogéologie et hydrochimie*. Editions du service géologique du Maroc-Rabat, N°151, pp 17-22.
- MEFTAH H., (1988)** - Influence d'un apport de litière de volailles et de fumier ovin en sol saharien nu et irrigué de la région d'Ouargla, dynamique du carbone et humification. *Thèse, Ing. Uni. Ouargla*, 58p..
- MOHSEN M.S., AL-JAYYOUSI O.R., (1999)** - "Brackish water desalination: an alternative for water supply enhancement in Jordan". *Desalination*, 124:163-174.
- MOHSEN M.S., et JABER J., (2001)** - "A photovoltaic-powered system for water desalination". *Desalination*, 138:129-136.
- MONNIERS G., (1965)** - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 16 (4 et 5), pp 327-534.

- MOREAU R., 1983.** Evolution des sols sous différents modes de mise en culture en Côte d'Ivoire forestière et pré forestière. Cah. O.R.S.T.O.M. Sér. Pédol. 20 (4). pp 311-325.
- MORSLI B., (2007)** - Étude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols. Acte des JSIRAUF, pp 6-9.
- MUNNS R., SCHACHTMAN D.P., CONDON A.G., (1995)** - "The significance of a two-phase growth response to salinity in wheat and barley". Aust. J, Plant Physiol, 22:561-9.
- MUSTIN M., (1987)** - Le composte, gestion de la matière organique. Ed. François Dubusc, Paris, 954p..
- NEZZAGHI F., (2010)** - L'irrigation et le risque de salinité : cas des eaux saumâtres de la plaine de Berrechid. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan II, Rabat, 136 p..
- OUAHOU M., (2010)** - Quelques options d'aménagement hydro-agricole dans une zone sous forte contrainte d'eau : cas de la Chaouia côtière. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan II, Rabat, 115 p..
- RESSOURCES EN EAU DU MAROC, HYDROLOGIE DU MAROC, (1975).**
- RHOADES J. (1990).** "Assessing suitability of water quality for irrigation". In Canadian (ed), water soil and crop management relating to the use of saline water, FAO, Rome, 52-70.
- RICHARD L., (1954)** - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USSS, USDA, 60p..
- RODIER J., (1984)** - "L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer". 7^{ème} Edition Dunod.
- SCHIFFLER, M. (2004).** "Perspectives and challenges for desalination in the 21st century". Desalination, 165:1-9.
- SECRETARIAT D'ETAT CHARGE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT, (2000-2001)** - Etat de la qualité des ressources en eau au Maroc.
- SHAINBERG I., SUMNER M.E., MILLER W.P., FARINA M.P.W., PAVAN M.A., FEY M.V., (1989)** - Use of gypsum on soils: a review. Advances in Soil Science, 9, 1-111.
- TANJI, (1997)** - Soil salinity and water quality. Agricultural Water Management, Volume 33, pp 215-217
- THURIES L., ARRUFAT A., DUBOIS M., FELLER C., HERRMANN P., LARRE-LARROUY M.C., MARTIN C., PANSU M., REMY J.C., VIEL M., (2000)** - Influence d'une fertilisation organique et de la solarisation sur la productivité maraîchère et les propriétés d'un sol sableux sous abri. Etude et gestion du sol. 7 (1). pp 73-88.
- TOUTAIN G., (1979)** - Élément d'agronomie saharienne De la recherche au développement. I.N.R.A, Paris, 276p..
- VANGHAN D. et Malcolm R.E., (1985)** - Soil organic matter and biological activity. Development in plant and soil sciences. Martinus Nijhoff, Vol. 16, 469p..
- WILCZYNSKI A.W., RENGER M., JOZEFACIUK G., HAJNOS M. et SOKOLOSKA Z., (1993)** - Surface area and C.E.C as related to qualitative and quantitative change of forest soil organic matter after liming. Zpflanz Boden. 156 (3). pp 235-238.
- YAZDANPANAH N., PAZIRA E., NESHAT A., NAGHAVI H., MOEZI A.A., MAHMOODABADI M. (2011)** - Effect of some amendments on leachate properties of a calcareous saline-sodic soil. Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Khuzestan, Iran, pp 307-310.

Webographie

FAO, Water at a Glance. http://www.fao.org/ag/agl/aglw/WaterTour/index-t_en.htm

FAO. http://www.fao.org/ag/aglw/aquastat/water_use/irrwatuse.htm

Organisation mondiale de la santé. <http://www.who.org>

US Environmental protection agency. www.epa.gov/owow/NPS/facts

Liste des tableaux

Tableau 1 : classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels, selon différentes sources	17
Tableau 2 : Classification des sols basée sur la concentration en sels (<i>Ayers et Westcot, 1976</i>)	18
Tableau 3 : Tolérance relative au sel de différentes espèces à l'émergence et pendant la croissance (<i>Maas, 1977</i>)	27
Tableau 4 : Résultats des analyses des M.O (fumier de bovin et fumier d'ovin) (<i>Meftah, 1988</i>)	29
Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation	36
Tableau 6 : Echelle granulométrique de la texture du sol	41
Tableau 7 : Evolution de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation en dS/m du mois de février au juin 2012	48
Tableau 8 : Granulométrie du sol	48
Tableau 9 : Résultats d'analyses chimiques du sol avant l'expérimentation	49
Tableau 10 : Analyse de la variance par le mois de mars	49
Tableau 11 : Analyse de la variance pour le mois d'avril	50
Tableau 12 : Analyse de la variance pour le mois de Juin	50
Tableau 13 : Caractérisation du fumier de bovin	51
Tableau 14 : Analyse de la variance pour la matière organique et la salinité	52
Tableau 15 : Résultats du test de Dunnett pour la matière organique et la salinité du sol	53
Tableau 16 : Valeurs moyennes du taux de la matière organique du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	54
Tableau 17 : Valeurs moyennes de la CE du sol en (dS/m) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	56
Tableau 18 : Résultats du test de corrélation pour la matière organique et la salinité du sol	59
Tableau 19 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois de mars	60
Tableau 20 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril	60
Tableau 21 : Analyse de la variance pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin	61
Tableau 22 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques en mois de mars	62
Tableau 23 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril	62
Tableau 24 : Résultats du test de Dunnett pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin	63
Tableau 25 : Valeurs de l'humidité équivalente moyenne du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	64
Tableau 26 : Valeurs moyennes du pH du sol à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	65
Tableau 27 : Valeurs moyennes de la CEC du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	67

Tableau 28 : Valeurs moyennes de l'ESP du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012	69
Tableau 29 : Valeurs moyennes du sodium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012	71
Tableau 30 : Valeurs moyennes du potassium échangeable du sol en meq/100g à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au mois de Juin 2012	73
Tableau 31 : Valeurs moyennes du calcium échangeable du sol en meq/100g à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au mois de Juin 2012	74
Tableau 32 : Valeurs moyennes du magnésium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	76
Tableau 33 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois de mars	78
Tableau 34 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois d'avril	78
Tableau 35 : Résultats du test de corrélation pour les paramètres physico-chimiques en mois de Juin	78
Tableau 36 : Analyse de la variance pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre	79
Tableau 37 : Résultats du test de Dunnett pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre	80
Tableau 38 : Valeurs moyennes du potassium du sol en (mg/kg) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de Février au Juin 2012	81
Tableau 39 : Valeurs moyennes du phosphore du sol en (ppm) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	83
Tableau 40 : Valeurs moyennes du rendement de la pomme de terre en (t/ha) en fonction de la dose de la M.O	85
Tableau 41 : Résultats du test de corrélation pour la fertilité du sol et le rendement de la pomme de terre	86

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	8
Figure 2 : Pluviométrie observée dans la région de Skhirat durant la période allant du mois de janvier 2012 au mois d'avril 2012 (<i>CT de Skhirat</i>)	10
Figure 3 : l'emblavement dans la région de Skhirat en 2011-2012 (<i>CT de Skhirat</i>)	13
Figure 4 : Carte de classification des principales nappes phréatiques selon la qualité globale de leurs eaux (<i>SEEE, 2000-2001</i>)	16
Figure 5 : Bloc aléatoire complet à 3 répétitions	35
Figure 6 : Evolution moyenne du taux de la M.O du le sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	55
Figure 7 : Evolution moyenne de la CE du sol en (dS/m) à différentes doses et différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	57
Figure 8 : Relation entre la M.O et la salinité du sol	59
Figure 9 : Evolution de l'humidité équivalente moyenne du sol en (%) à différentes doses et différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	64
Figure 10 : Evolution moyenne du pH du sol à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	66
Figure 11 : Evolution moyenne de la CEC du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	68
Figure 12 : Evolution moyenne de l'ESP du sol en (%) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au mois de juin 2012	70
Figure 13 : Evolution moyenne du sodium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	72
Figure 14 : Evolution moyenne du potassium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	73
Figure 15 : Evolution moyenne du calcium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	75
Figure 16 : Evolution moyenne du magnésium échangeable du sol en (meq/100g) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	77
Figure 17 : Evolution moyenne du potassium du sol en (mg/kg) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	82
Figure 18 : Evolution moyenne du phosphore du sol en (ppm) à différentes doses et à différentes profondeurs des prélèvements du mois de février au juin 2012	84
Figure 19 : Relation entre le rendement et la dose de M.O	86
Figure 20 : Relation entre le rendement et la salinité du sol	87

Liste des photos

Photo 1 : Puits équipé d'une pompe à partir duquel la parcelle assure son irrigation	37
Photo 2 : Prélèvement du sol	37
Photo 3 : Prélèvement du fumier de bovin	38
Photo 4 : Analyses physico-chimiques au laboratoire	39

ANNEXES

- Calcul des statistiques de base pour le mois de Mars

Le tableau ci-dessous donne les statistiques élémentaires pour les paramètres analysés du sol.

Tableau : Statistiques de base obtenues pour les paramètres du sol en mois de mars

Variable	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
CE0020	2.37833	1.00905	0.97000	3.69000
CE2040	1.03917	0.28092	0.64000	1.60000
CE4060	0.58417	0.16822	0.39000	1.02000
pH0020	7.11583	0.33950	6.55000	7.65000
pH2040	6.81750	0.53124	6.08000	7.72000
pH4060	6.59083	0.53022	5.74000	7.40000
MO0020	1.61583	0.27408	1.22000	1.97000
MO2040	1.08750	0.04288	1.02000	1.17000
MO4060	0.64000	0.13585	0.40000	0.80000
K0020	0.72500	0.33878	0.40000	1.60000
K2040	0.23333	0.06513	0.20000	0.40000
K4060	0.23333	0.06513	0.20000	0.40000
Ca0020	8.55667	1.30515	6.50000	10.55000
Ca2040	6.38333	1.45748	5.10000	10.65000
Ca4060	5.72500	0.69101	5.00000	6.65000
Mg0020	2.35500	1.25814	0.90000	4.34000
Mg2040	1.70500	0.99368	0.55000	2.91000
Mg4060	1.30750	0.57482	0.40000	2.50000
Na0020	0.67667	0.16395	0.40000	0.98000
Na2040	0.57083	0.36805	0.32000	1.60000
Na4060	0.49917	0.33241	0.18000	1.40000
CEC0020	12.49750	2.41764	8.73000	16.65000
CEC2040	9.20000	2.22414	7.40000	15.54000
CEC4060	7.93917	1.09618	6.60000	10.02000
ESP0020	5.58333	1.57604	2.88000	8.09000
ESP2040	5.93083	2.34649	3.67000	10.30000
ESP4060	6.02917	3.17644	2.40000	13.97000

L'écart type est une mesure de la dispersion d'une variable aléatoire réelle. D'après les informations contenues dans le tableau ci-dessus, nous constatons que les valeurs des différents paramètres du sol sont peu dispersées autour de la moyenne et ce pour toutes les

tranches du sol. Nos répétitions (4 Doses * 3 Répétitions) forment donc une série homogène dont les valeurs se regroupent autour de la moyenne.

- Calcul des statistiques de base pour le mois d'avril

Le tableau suivant expose les statistiques élémentaires pour les paramètres analysés du sol.

Tableau : Statistiques de base obtenues pour les paramètres du sol en mois d'avril

Variable	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
CE0020	0.61500	0.28510	0.20000	0.98000
CE2040	0.19083	0.06052	0.11000	0.29000
CE4060	0.07000	0.01651	0.05000	0.10000
pH0020	6.97417	0.35498	6.30000	7.50000
pH2040	6.68750	0.42738	5.90000	7.14000
pH4060	6.28000	0.48185	5.46000	6.80000
MO0020	1.60250	0.27499	1.20000	1.95000
MO2040	1.07083	0.04699	1.00000	1.15000
MO4060	0.62667	0.13425	0.39000	0.78000
K0020	0.31500	0.17916	0.10000	0.59000
K2040	0.10167	0.04041	0.05000	0.16000
K4060	0.06917	0.02746	0.03000	0.11000
Ca0020	8.52250	0.89515	6.98000	9.26000
Ca2040	5.67917	0.86812	5.00000	7.15000
Ca4060	4.80500	0.38876	4.10000	5.21000
Mg0020	2.59917	1.61178	0.61000	5.03000
Mg2040	0.93250	0.61711	0.17000	1.87000
Mg4060	0.60500	0.36110	0.12000	1.16000
Na0020	0.40500	0.15524	0.24000	0.75000
Na2040	0.64833	0.28562	0.36000	1.30000
Na4060	0.62083	0.24560	0.11000	0.98000
CEC0020	12.53167	2.54352	8.68000	15.71000
CEC2040	7.61667	1.66220	6.13000	10.44000
CEC4060	6.31000	0.78990	4.99000	7.21000
ESP0020	3.62750	2.26626	1.54000	8.36000
ESP2040	8.23167	1.81456	5.76000	12.45000
ESP4060	9.80500	3.60905	1.90000	14.37000

D'après les résultats du tableau ci-dessus, nous ne constatons aucune anomalie concernant les valeurs des différents paramètres du sol. En mois d'avril, ces dernières se trouvent toutes groupées autour de la moyenne et ce pour tous les horizons du sol. Les répétitions des doses dans les trois blocs de l'expérimentation constituent donc une série homogène dont les valeurs se trouvent, toutes, peu dispersées autour de la moyenne.

- Calcul des statistiques de base pour le mois de Juin

Le tableau suivant affiche les statistiques élémentaires pour les paramètres analysés du sol du mois de juin.

Tableau: Statistiques de base obtenues pour les paramètres du sol en mois de juin

Variable	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
CE0020	0.68500	0.39910	0.14000	1.15000
CE2040	0.24667	0.02348	0.21000	0.29000
CE4060	0.12667	0.01923	0.10000	0.16000
pH0020	6.92833	0.35009	6.26000	7.40000
pH2040	6.65500	0.42385	5.86000	7.10000
pH4060	6.24667	0.48025	5.43000	6.77000
MO0020	1.57667	0.27543	1.18000	1.94000
MO2040	1.04917	0.04562	0.98000	1.13000
MO4060	0.60667	0.13337	0.37000	0.76000
K0020	0.25917	0.13983	0.07000	0.46000
K2040	0.07667	0.04755	0.01000	0.15000
K4060	0.05500	0.02939	0.01000	0.09000
Ca0020	8.62833	1.30041	6.48000	10.02000
Ca2040	5.63417	1.05943	4.33000	7.42000
Ca4060	4.90750	0.75345	3.82000	6.10000
Mg0020	2.61917	1.64755	0.53000	5.11000
Mg2040	0.93500	0.63666	0.15000	1.88000
Mg4060	0.60500	0.37768	0.10000	1.16000
Na0020	0.41833	0.19604	0.20000	0.84000
Na2040	0.55583	0.26301	0.26000	1.22000
Na4060	0.85417	0.29629	0.41000	1.33000
CEC0020	12.36167	2.86136	8.08000	15.96000
CEC2040	7.57167	1.82983	5.74000	10.76000
CEC4060	6.79167	1.38350	4.99000	8.90000
ESP0020	3.92917	2.75103	1.26000	9.29000
ESP2040	7.37583	2.50762	2.59000	11.67000
ESP4060	12.35083	2.63483	7.99000	17.32000
Rendement	46.27083	11.03382	33.88000	63.88000

Après lecture du tableau ci-dessus, nous constatons qu'en mois de juin, les valeurs des paramètres du sol ne s'éloignent que très peu de la moyenne. On conclue alors que les répétitions des doses dans les trois blocs de l'expérimentation constituent une série homogène dont les valeurs se trouvent groupées autour de la moyenne et ce pour tous les horizons du sol, en surface tout comme en profondeur.