

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques

Année :2015-2016



N° d'enregistrement :

/.../.../.../.../

THESE

**Pour l'obtention du diplôme de Doctorat ès sciences
En Agronomie Saharienne**

**Influence des fertilisants organiques sur la réactivité
physico-chimique et le fonctionnement microbiologique
d'un sol sableux non salé et sableux salé en conditions
d'irrigation par des eaux chargées en sels**

Présentée et soutenue publiquement

Par :

M^{lle}. OUSTANI Mabrouka

Le 22 /09/2016

Devant le jury composé de :

BISSATI-BOUAFIA Samia	Professeur	U.K.M. Ouargla	Président
HALILAT Mohamed Tahar	Professeur	Université de M'Sila	Promoteur
CHELLOUFI Hamid	Professeur	U.K.M. Ouargla	Rapporteur
HAMDI AISSA Beilehadj	Professeur	U.K.M. Ouargla	Rapporteur
BRINIS Louhichi	Professeur	U.S.T.H.B. Annaba	Rapporteur
BOURAS Noureddine	M.C.A.	Université de Ghardaia	Rapporteur

Dédicace

Je dédie cette thèse à ma chère mère, à la mémoire de mon père & aux agriculteurs des régions sahariennes. J'espère de tout cœur que ce travail pourra leur être utile !

Avant propos

Ce travail ne serait jamais allé à son terme sans la contribution efficace de tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, par leur appui en acquisition de documents, en accès à l'information ou par leur soutien moral et encouragements. A tous, je suis redevable et reconnaissante. Néanmoins, dans cet itinéraire de la reconnaissance, il y a des personnes qu'il faut spécifier.

Tout d'abord, mon encadreur M^r HALILAT M^{ed} Tahar Professeur à l'université de M'Sila, qui a bien voulu consacrer une partie de son temps pour discuter mon protocole expérimental et mes résultats, malgré les responsabilités lourdes qu'il assume; je le remercie également de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être directeur de cette thèse, je le prie de trouver ici le témoignage d'une respectueuse reconnaissance.

Mes sincères remerciements vont à remerciements à M^{me} BISSATI Samia. Président du jury et professeur à l'université de Ouargla de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury. Qu'elle trouve ici tous les respects les plus sincères d'élève à son professeur.

Ma vive gratitude pour M^r CHELLOUFI Hamid Professeur à l'université de Ouargla, pour son humanité et sa générosité ; il n'a jamais été avare à mon égard pour tout complément d'information, acquisition d'ouvrages personnels et même ses encouragements.

Mes remerciements également à M^r HAMDY AÏSSA Beilehadj Professeur à l'université de Ouargla pour l'honneur qu'il me fait d'accepter à participer au jury et d'évaluer ce travail ; qu'il trouve ici l'expression de ma grande reconnaissance.

Mes sincères remerciements à M^r. BRINIS Louhichi Professeur à l'université de Annaba, de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury. Je le remercie également pour les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec lui, ses suggestions et ses conseils précieux.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à Mr BOURAS Noureddine Maître de conférence à l'université de Ghardaïa pour avoir accepté de porter un jugement à ce travail. C'est avec sincérité que j'exprime ma gratitude et mon profond respect.

Un remerciement particulier à Mr. CHENCHOUNI Haroun et M^{me} NAFFAR Souad Maîtres assistants à l'Université de Tébessa, qu'ils trouvent ici mes vifs et sincères remerciements pour leur aides, leur compétences et leur conseils précieux.

Il serait ingrat de ma part, de ne pas remercier, Mrs MONZER Oussama (CEBAS Espagne), HANNACHI Cherif (Tunisie), MHAMDI Naceur (Tunisie), pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, et leur vive contribution à son enrichissement, pour leurs remarques et conseils judicieux.

Ont droit à mes remerciements : Mr DAOUD Professeur à l'INA Alger, Mr MEKLICH Professeur à l'INA Alger, Mr TAHAR Ali, Professeur à l'Université de Annaba, Mr IDDER Hakki Maître Assitant à l'Université de Ouargla, M^{elle} CHAOUCH Saida Maître Assistant à l'Université de Ouargla, M^{me} SEBOUKEUR Oumelkheir professeur à l'Université de Ouargla, Mr Saker M^{ed} Lakhdhar Professeur à l'Université de Ouargla, KAHLZEN Cherif Maître Assitant à l'Université de Ouargla, M^{me} Hayat de l'INRA Alger, M^{me} RAZI Malika Ingénieur au CAQUE Ouargla.

Je n'oublierai certes pas d'adresser mes plus chaleureux remerciements à mes amis et mes collègues : Fouzia YOUCEF, Laziz ABOUYAHYA, Mouhamed BELARROUSI, Ismail MAHDA, Nawel OMEIRI, DADAMOUSA M^{ed}Lakhdhar, Souad CHAHMA, Faouzi BENBRAHIM, Farida TADJINE, Safia LOUNISSI, Massika SNOUSSI, Naima Draoui, HESSAINE Amina, Wafa SOUID, pour les nombreux services qu'ils m'ont rendus durant la réalisation de ce travail.

Je suis également reconnaissante envers les agriculteurs de Hassi ben Abdalah en particulier Mr Babziz, je le remercie pour l'accueil si chaleureux qu'il m'a réservé lors de mon travail au terrain.

Mes remerciements s'adressent à l'équipe du laboratoire de Bio ressources Sahariennes, laboratoire de l'INRA (Alger et Touggourt), laboratoire de l'INRH (Ouargla), ADE (Ouargla) et laboratoire de CEBAS (Espagne).

Et tous ceux qui m'ont facilité l'acquisition de l'information au niveau des bibliothèques de : Université de/Ouargla, L'INA Alger, Université de Batna, INRA Alger et CEBAS (Espagne).

A tous les enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie Mes remerciements vont à toutes les équipes et services.

J'exprime également toute mon amitié et ma reconnaissance aux nombreuses personnes rencontrées au cours de ces années de la préparation de ce travail, étudiants, doctorants, personnels techniques, administratifs et agriculteurs qui m'ont motivé, soutenu, encouragé, amusé.

En outre, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et affectif de ma famille. Je remercie ainsi tous les membres de ma famille qui ont su me comprendre dans les moments les plus difficiles. Je les remercie également pour leur appui et leur dévotion durant toutes les années de la préparation de cette thèse.

Résumé général

Les sols des régions arides sont sujets à une dégradation qui se caractérise par une perte importante de la fertilité, en particulier la perte de la matière organique du sol. Par ailleurs, le problème de la salinité du sol et l'irrigation par des eaux saumâtres constituent une autre contrainte majeure pour le développement de l'agriculture dans ces régions. Dans le contexte aride, ces contraintes agissent le plus souvent simultanément et concourent à abaisser la productivité des sols. Une méthode possible de remédiation et de l'amélioration des situations dégradées est d'utiliser des produits organiques comme fertilisants et amendements aux sols salés. Dans ce cadre, ce travail a pour objectif principal de contribuer à la levée de ces contraintes pour permettre une mise en culture durable des sols dans ces régions par des apports organiques exogènes. L'étude réalisée s'intéresse, ainsi, aux effets de différents produits organiques : fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et résidus de palmier dattier (RPD) sur certaines propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques, ainsi que, sur l'amélioration de la production des plantes en conditions salines. L'approche méthodologique repose en premier temps sur une caractérisation physique, physico-chimique et biochimique des produits testés dans l'objectif d'estimer leur valeur fertilisante (Composition en éléments nutritifs et détermination du coefficient équivalent engrais) et amendante (C/N, Composition biochimique de la matière organique (CBM) et le fractionnement des composés humiques : AH, AF et AH/AF) de ces produits, et en deuxième temps sur des expérimentations : (i) En conditions semi contrôlées dont l'objectif porte sur l'étude de l'effet de ces produits sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques du sol salé, à savoir la conductivité électrique (CE), le pH, la capacité d'échange cationique (CEC) et la capacité de rétention en eau (CRE), (ii) En conditions contrôlées, où l'effet des produits testés sur le biofonctionnement du sol salé a été abordé en terme de l'étude de la dynamique de minéralisation de carbone et de l'azote par le test respirométrique (CO_2) et de l'extraction des deux formes de l'azote minéral (N-NH_4^+ et N-NO_3^-) respectivement, (iii) En conditions de champ, où un essai pluriannuel (2009-2012) a été installé suivant un dispositif split plot visant à comparer l'effet de cinq doses croissantes de fumier de volailles : 0, 20, 30, 40, 50 et 60 t ha⁻¹ sur certains paramètres biométriques (Paramètres de croissance végétative et de rendement), statut nutritionnel, ainsi, que sur l'évaluation de la tolérance de la pomme de terre (Variété Spunta) à la salinité, par la détermination de l'accumulation de la proline, en tant que soluté organique, et par la synthèse de la chlorophylle sous des niveaux de salinité croissant : sol peu salé (SPS : CE=1.2 dS m⁻¹), sol salé (SS : CE= 2.29 dS m⁻¹) et sol très salé (STS : CE= 5.6 dS m⁻¹) et en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels. L'analyse des résultats globaux obtenus a permis de mettre en évidence un effet favorable et significatif des différents produits organiques testés sur l'ensemble des propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques étudiées par rapport au témoin. Toutefois, l'importance de l'effet améliorant de ces propriétés semble varier en fonction de la nature biochimique de chaque produit, ainsi qu'en fonction du degré de salinité. Quant à l'essai au champ, les résultats obtenus ont indiqué que les doses croissantes de fumier de volailles ont augmenté significativement tous les paramètres étudiés par rapport au témoin, et ceci quel que soit le niveau de la salinité dans les trois sites expérimentaux. Toutefois, l'effet de l'interaction (Dose (FV) × Niveau de salinité) a montré que les meilleures performances en terme de croissance, de rendement, état nutritionnel, contenu foliaire de la pomme de terre en proline et en chlorophylle ont été enregistrées au niveau du sol le plus salé (STS) traité avec la plus forte dose de FV (60 t ha⁻¹). Par ailleurs, bien que l'ANOVA à trois critères de classification n'ait montré aucun effet significatif sur l'interaction de trois facteurs étudiés pour le rendement total t ha⁻¹, une tendance à une production plus élevée a été enregistrée au niveau de l'interaction (STS × 60 t ha⁻¹ × 2009), avec un rendement total de 45.9 t ha⁻¹. Les résultats obtenus par la présente étude montrent l'importance de la fertilisation organique pour l'amélioration de la fertilité physique, chimique et microbiologique du sol, ainsi qu'à l'amélioration de la tolérance de la pomme de terre à la salinité et à l'augmentation du rendement en conditions salines. L'accroissement de la teneur en matière organique de ces sols semble être l'une des solutions agronomiques adéquates, non seulement pour atténuer les effets osmotiques et physiologiques liés à la salinité, mais également pour exploiter les eaux saumâtres dans ces régions.

Mots clés : Produits Organiques, Salinité, pH, Conductivité électrique (CE), Capacité d'Echange Cationique (CEC), Capacité de Rétention en eau (CRE), Biodégradation, Carbone, Azote, Pomme de Terre, Etat Nutritionnel, Proline, Chlorophylle, Rendement, Zones Arides.

Global abstract

Soils of dry lands are subject to degradation that is characterized by a significant loss of soil fertility, in particular the loss of soil organic matter. The problem of soil salinity and irrigation with brackish water is another major constraint for development of agriculture in these regions. In the arid context, these constraints often act simultaneously and contribute to lower soil productivity. One possible method of remediation and improvement of degraded situations is the use of organic products as fertilizers and amendments into saline soils. With this context, this study aims to contribute to the alleviation of these constraints to develop a sustainable agriculture in these regions by exogenous organic amendments. The study also investigated the effects of different organic products: poultry manure (PM), bovine manure (BM), goat manure (GM), dromadory manure (DM) and date palm residues (DPR) on certain physical, physicochemical, and microbiological proprieties as well as on the improvement of plant production under saline conditions. The methodological approach relies first on a physical, physicochemical and biochemical characterization of the tested products to estimate their fertilizing value (nutrient composition and determination of the mineral nutrient equivalence coefficients) and amending value (C/N, biochemical composition of the organic matter (BCM) and fractioning of humic compounds: AH, AF and AH/AF) of these products. Second, the study also experiments: (i) under semi-controlled conditions, the effect of these products on some physical and physicochemical properties of saline soil namely the electrical conductivity (EC), pH, cation exchange capacity (CEC) and water-holding capacity (CR); (ii) under controlled conditions, the effect of tested products on microbiological functioning of saline soil was discussed in terms of carbon and nitrogen mineralization dynamics using the respirometric test (CO_2) and the extraction of the two forms of mineral nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$) respectively; (iii) in field conditions where a long field trial (2009-2012) was installed following a split plot design to compare the effect of six increasing rates of poultry manure: 0, 20, 30, 40, 50 and 60 t ha^{-1} on certain biometric parameters (vegetative and yield parameters), nutritional status, and on assessing tolerance of the potato (Variety Spunta) to salinity by the determination of the accumulation of proline as organic solute, and the synthesis of chlorophyll in three experimental sites with increasing salinity levels: low saline soil (LSS: $\text{CE}=1.2 \text{ dS m}^{-1}$), saline soil (SS: $\text{CE}=2.29 \text{ dS m}^{-1}$) and high saline soil (HSS: $\text{CE}=2.29 \text{ dS m}^{-1}$) and in conditions of irrigation water containing salts. The analysis of results highlighted a positive and significant effect of different organic products on all physical, physicochemical and microbiological properties compared to control. However, the improving effect of these properties seems varied depending on the biochemical nature of each nature of each product and following soil salinity levels. For the field experiment, results indicated that increasing doses of poultry manure (PM) induced a significantly increase in all parameters compared to the control regardless the level of soil salinity. However, the interaction effect (Dose (PM) \times Salinity level) showed the best performance in terms of growth, yield, nutritional status, leaf content of proline and chlorophyll which were recorded at high saline soil (STS) treated with the highest dose of (PM) (60 t ha^{-1}). Although three-way ANOVA showed no significant effect of the interaction of three factors studied on the total yield, a trend towards higher production was recorded at interaction (STS \times $60 \text{ t ha}^{-1} \times$ 2009) with a total yield of 45.9 t ha^{-1} . Results of the study showed the importance of organic fertilizer to improve the physical, chemical, microbiological fertility, as the yields of plants under saline conditions. Furthermore, the increase in the organic matter content of these soils seems one of the appropriate agronomic solutions, not only to mitigate osmotic and physiological effects related to salinity, but also to exploit the brackish waters in these regions.

Keywords: Organic Products, Salinity, pH, electrical conductivity (EC), Cation Exchange Capacity (CEC), Water holding capacity (CR), Biodegradation, Carbon, Nitrogen, Potato, Nutritional status , Proline, Chlorophyll, Yield, Arid Regions.

ملخص عام

التربة في المناطق الجافة معرضة للتدهور الذي يتميز بفقدان كبير في خصوبة التربة خاصة فيما يتعلق بفقدان محتواها من المادة العضوية. من جهة أخرى تعد ملوحة التربة و السقي بالمياه المالحة عائق رئيسي آخر يحد من تنمية الزراعة في هذه المناطق. في البيئة القاحلة هذه العوائق عادة ما تعمل في وقت واحد و تؤثر مجتمعة و بشكل متوازي على خصائص التربة مما يزيد من خفض الإنتاج.

أحد أهم وسائل معالجة هذه الوضعية تكمن في استعمال المخلفات العضوية كأسمدة عضوية و محسنات لخصائص التربة المالحة. في هذا السياق تهدف هذه الدراسة للمساهمة في رفع هذه العوائق لغرض استصلاح مستدام للتربة عن طريق اظافات عضوية خارجية. تهتم هذه الدراسة إذا بمفعول عدة مخلفات عضوية : سماد الدواجن(س.د) ، سماد البقر(س.ب) ، سماد الماعز(س.م)، سماد الجمال(س.ج) و مخلفات نخيل التمر(م.ن.ت) على بعض الخواص الفيزيائية، الفيزيوكيميائية و الميكروبيولوجية للتربة إلى جانب تحسين إنتاج النبات تحت الظروف الملحية. منهجية الدراسة اعتمدت كمرحلة أولى على تحليل فيزيائي و فيزيوكيميائي و بيوكيميائي لمختلف المواد العضوية المستعملة وذلك بهدف تقدير قيمتها السمادية (محتواها من العناصر الغذائية) و مكافئها السمادي) و قيمتها المحسنة (نسبة الكربون على الأزوت (C/N)، المحتوى البيوكيميائي للمادة العضوية (CBM)، تجزئة المركبات الدبالية (AH/AF, AH, AF). كمرحلة ثانية اشتملت الدراسة على التجارب (أ) في ظروف نصف محكمة الغرض منها دراسة تأثير الاظافات العضوية على بعض الخصائص الفيزيائية و الفيزيوكيميائية للتربة المالحة (التوصيل الكهربائي (CE)، حموضة التربة (pH) ، سعة تبادل الكاتيونات (CEC) ، و سعة الاحتفاظ بالماء (CR). (ب) في ظروف محكمة أين تم تتبع أثر هذه الاظافات العضوية على النشاط الميكروبيولوجي للتربة خاصة عمليتي (معدنة الكربون (C) ، النيتروجين (N) و ذلك عن طريق تقدير النشاط التنفسي للتربة (انطلاق CO₂) إلى جانب استخلاص النيتروجين المعدني (NH₄⁺، NO₃⁻). (ج) في ظروف ميدانية أين أجريت تجربة لمدة أربع سنوات (2009-2012) نفذت وفق تصميم الألواح المنشقة (Split plot) بهدف مقارنة مفعول خمس جرعات متزايدة من سماد الدواجن : 60،50،40،0،20،30 طن/هكتار على بعض المعايير البيومترية (معايير النمو الخضري و معايير المحصول) ، المستوى الغذائي، إلى جانب تأثير هذه الجرعات على زيادة تحمل نبات البطاطا (صنف Spunta) للملوحة و ذلك على مستويات متزايدة من ملوحة التربة : تربة قليلة الملوحة (CE=1.2 dS m⁻¹) ، تربة مالحة (CE=2.29 dS) و تربة مالحة جدا (CE=5.56 dS m⁻¹) و ذلك في ظروف السقي بالمياه المالحة التحليل العام للنتائج بين مفعول ايجابي و معنوي لهذه الاظافات العضوية على تحسين معظم العوامل المدروسة بالمقارنة بالشاهد، غير أن درجة التحسين تعتمد و بشكل أساسي على نوعية المادة العضوية المضافة و على درجة ملوحة التربة. فيما يخص نتائج التجربة الميدانية أشارت النتائج المسجلة على أن الجرعات المتزايدة من سماد الدواجن أدت إلى تزايد معنوي للعوامل المدروسة بالمقارنة مع الشاهد وهذا بغض النظر على مستوى الملوحة في التربة، غير أن أهم نتائج النمو الخضري ودلائل المحصول، المستوى الغذائي، المحتوى الورقي من بروتين (Proline) و الكلوروفيل (Chlorophyll) قد سجلت على مستوى التربة الأكثر ملوحة و المعاملة بأعلى جرعة سماد الدواجن (60 × STS /طن/ هكتار). من جهة أخرى فان التحليل الإحصائي (تحليل التباين) المطبق على التفاعل بين العوامل الثلاثة المدروسة لم يبين أي فروقات معنوية بين المعاملات على الرغم من أنه تم تسجيل إنتاج مرتفع على مستوى المعاملة (تربة مالحة جدا) (60 × طن/ هكتار × 2009). نتائج هذه الدراسة تبين أهمية التسميد العضوي في تحسين الخصائص الفيزيائية و الفيزيوكيميائية و الميكروبيولوجية للتربة، إلى جانب زيادة تحمل نبات البطاطا للملوحة إذ أن زيادة محتوى التربة من المادة العضوية يعتبر وسيلة هامة ليس فقط للتقليل من الإجهاد الملحي و الآثار الفيزيولوجية المرتبطة بالملوحة و لكن لاستغلال المياه المالحة في هذه المناطق.

الكلمات الدالة : مخلفات عضوية، مكافئ سماد معدني، ملوحة ، درجة الحموضة (pH) ، التوصيل الكهربائي (CE) ، سعة تبادل الكاتيونات (CEC) ، سعة الاحتفاظ بالماء (CR) تحلل البيولوجي، كربون، نيتروجين(N)، بطاطس، المستوى الغذائي، بروتين، كلوروفيل ، مردودية ، أراضي لجافة.

Liste des Abréviations et des Symboles

Organismes et institutions

AFES	Association Française d'Etude du Sol
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
CEBAS	Centro de Edafologia y Biologia Aplicadadel Segura
CPCS	Comité Pédologique de la Classification Française des Sols
DPAT	Direction de Planification et de l'Aménagement du Territoire.
FAO	Food and Agriculture Organization
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ONM	Office National de la Météorologie
SCPA	Société Commerciale de Potasse et de l'azote
USDA	United States Department of Agronomy
INA	Institut National d'Agronomie
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
TCMI	Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles
OMS	Organisation mondiale de la Santé
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
IHSS	International Humic Substances Society

Divers

ADL	Acid Detergent Lignin
AF	Acide Fulvique
AH	Acide Humique
AH/AF	Acides Humiques/Acides Fulviques
ATP	Adénosine Triphosphate
BM	Bovine Manure
BSA	Biomasse Sèche Aérienne
BSR	Biomasse Sèche Racinaire
C/N	Carbone/Azote
CBM	Composition Biochimique de la Matière Organique
CE	Conductivité Electrique
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CEe	Conductivité Electrique extrait pâte saturée
CE-K20	Coefficient équivalent engrais de potassium
CELL	Cellulose
CE-N	Coefficient équivalent engrais de l'azote
CE-P205	Coefficient équivalent engrais de phosphore
CI	Complexe Intercalaire
CR	Capacité de Rétention en Eau
Chl	Chlorophylle
CT	Complexe Terminal
Da	Densité Apparente
DM	Dromadory Manure
DO	Densité optique
ESP	Echange Sodium Pourcentage
ETM	Eléments traces métalliques

ETP	Evapo -Transpiration Potentielle
FB	Fumier Bovins
FC	Fumier de Caprins
FD	Fumier de dromadaire
FV	Fumier de Volailles
GM	Goat Manure
H	Humine
HEMI	Hémicellulose
Is	Indice d'instabilité Structurale
ISB	Indice de Stabilité Biologique
Keq	Coefficient équivalent engrais
LIGN	Lignine
LSD	Least Significant Difference
MM	Matière Minérale
MS	Matière Sèche
MO	Matière Organique
MOF	Matière Organique Fraîche
MOT	Matière Organique Totale
NaCl	Chlorure de Sodium
P	Précipitations
pF	Potentiel Capillaire
pH	Potentiel Hydronium
PM	Poultry Manure
rH	Potentiel redox
RPD	Résidus de palmier dattier
SAR	Sodium Adsorption Ratio
SPS	Sol Peu Salé
STS	Sol Très Salé
SS	Sol Salé
T	Temps
T	Température
TH	Taux d'humification
TNK	Test Newman Keuls

Liste des figures

Partie I. Chapitre 1

Figure 1.	Situation géographique et limites géomorphologiques de la région de Ouargla : a. Situation géographiques, b. Limites géomorphologiques de la région de Ouargla	11
Figure 2.	Carte des états de surface des sols à Ouargla	14
Figure 3.	Réserves hydriques du Sahara Algérienne : a. Réserves hydriques du Sahara Algérien b. Coupe hydrogéologique	17

Partie I. Chapitre 2

Figure 1.	Principaux types de dégradations du sol en zones arides	21
Figure 2.	Problématique de l'évolution de la matière organique dans les zones arides chaudes	26

Partie II. Chapitre 1

Figure 1.	Fractionnement biochimique de la matière organique	43
Figure 2.	Extraction des acides humiques et fulviques par différence de solubilité en milieux basique et acide	44
Figure 3.	Variation des teneurs en MS, MO et MM en fonction du type de produit organique	45
Figure 4.	Variation du pH en fonction de type de produit organique	47
Figure 5.	Variation de la conductivité électrique (CE dS m ⁻¹) en fonction de type de produit organique	47
Figure 6.	Variation de la composition en éléments fertilisants en fonction de type de produit organique	53
Figure 7.	Teneurs en éléments fertilisants disponibles à la plante (%)	55
Figure 8.	Comparaison entre la composition et la valeur fertilisante des produits organiques	56
Figure 9.	Variation du rapport C/N en fonction du type de produit organique	60
Figure 10.	Variation de la composition biochimique de la fraction organique en fonction du type de produit organique	60
Figure 11.	Teneur en acides humiques en fonction de type de produit organique	62
Figure 12.	Variation du rapport AF/AH en fonction de type de produit organique	62

Partie II. Chapitre 2

Figure 1.	a.Variation de la conductivité électrique (CE) en fonction du type de produit organique ; b. Effet du facteur temps sur l'homogénéité de la variance	78
Figure 2.	a. Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction du temps ; b. Effet du facteur temps sur l'homogénéité de la variance	79
Figure 3.	Relation entre la conductivité électrique (CE) et temps de prélèvement	82
Figure 4.	Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction du type de produit au cours de la période expérimentale	82
Figure 5.	Variation du pH en fonction du type de produit organique ; b. Effet du type de produit organique sur l'homogénéité de la variance	83
Figure 6.	a. Variation du pH en fonction du temps (produit organique) ; b. Effets du facteur temps sur l'homogénéité de la variance	86
Figure 7.	Evolution du pH en fonction de type de produit organique au cours de la période expérimentale	88

Figure 8.	a. Variation la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du type de produit organique ; b. Effets du type de produit sur l'homogénéité de la variance	90
Figure 9.	a. Evolution la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du temps ; b. Effets du temps sur l'homogénéité de la variance	92
Figure 10.	Relation entre la capacité de rétention en eau (CR) et le temps de prélèvement	92
Figure 11.	Evolution de la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du type de produit organique au cours de la période expérimentale	93
Figure 12.	a. Variation de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction du type de produit organique ; b Effet du produit organique sur l'homogénéité de la variance	95
Figure 13.	Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) au cours de la période expérimentale ; b. Effet du temps de prélèvement sur l'homogénéité de la variance	96
Figure 14.	Relation entre la capacité d'échange cationique (CEC) et le temps	97
Figure 15.	Evolution de la CEC en fonction de type de produit organique au cours de la période expérimentale	99
Figure 16.	Corrélations entre les variables étudiées	100

Partie II. Chapitre 3

Figure 1.	Evolution de dégagement cumulé de C-CO ₂ (mg 100 g ⁻¹ de sol sec) au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)	118
Figure 2.	Evolution cumulé de N-NH ₄ ⁺ (mg100 ⁻¹ g de sol sec) libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)	126
Figure 3.	Evolution de N-NO ₃ ⁻ cumulé (mg100 ⁻¹ g de sol sec) libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)	129
Figure 4.	Relation entre l'azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺) et nitrique (N-NO ₃ ⁻) (en mg100 g ⁻¹ de sol) dans : (a) le sol non sableux (NS) et (b) salé (SS)	131
Figure 5.	Evolution de l'azote minéral (N-NH ₄ ⁺ et N-NO ₃ ⁻) cumulé (mg100 ⁻¹ g de sol se libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV) (FB), (FC), (FD) et (RPD)	133

Partie III

Figure 1.	A. Localisation géographique des sites d'étude ; B. Image satellite présentant la localisation des sites d'étude dans la ferme frère de Baziz	146
Figure 2.	Températures et précipitations sur les sites d'étude pendant la période expérimentale (2009-2012)	148
Figure 3.	Schéma du dispositif expérimental	160
Figure 4.	Principaux étapes de dosage de la proline	164
Figure 5.	Principales étapes de dosage de la chlorophylle	165
Figure 6.	Effet de la salinité sur le rendement total (t ha ⁻¹) durant les quatre années de l'essai	178
Figure 7.	Effets des doses de fumier de volailles (FV) sur le rendement total (t ha ⁻¹) durant les quatre années de l'essai	178
Figure 8.	Rendement (t ha ⁻¹) total en fonction des doses de fumier et du niveau de la salinité dans les trois sites expérimentaux	178
Figure 9.	Effet des doses de FV et des niveaux de la salinité du sol sur le rendement	179

	total t ha ⁻¹ au niveau des trois sites expérimentaux durant les quatre années de l'essai	
Figure 10.	Effets de la salinité sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en Azote (N), Potassium (K), Phosphore (P), Calcium (Ca ⁺⁺), Sodium (Na ⁺), Nitrates (NO ₃ ⁻), Chlorures (Cl ⁻) (en mg g ⁻¹ de MS) durant les quatre années de l'essai	190
Figure 11.	Effets des doses de fumier de volailles sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en Azote (N), Potassium (K ⁺), Phosphore (P), (Calcium (Ca ⁺⁺), Sodium (Na ⁺), Nitrates (NO ₃ ⁻), (Chlorures (Cl ⁻) (en mg g ⁻¹ de MS) durant les quatre années de l'essai	193
Figure 12.	Effets des doses de fumier de volailles sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en : Azote (N), Potassium (K ⁺); Phosphore (P), Calcium, (Ca ⁺⁺) Sodium, Nitrates (NO ₃ ⁻) et Chlore (Cl ⁻) dans les trois sites expérimentaux (mg g ⁻¹ de MS) durant les quatre années de l'essai	199
Figure 13.	Effets de l'interaction (Salinité × Dose de fumier (FV) × Année) sur les ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre : K ⁺ /Na ⁺ , Ca ⁺⁺ /Na ⁺ et NO ₃ ⁻ /Cl ⁻	203
Figure 14.	Effets de l'interaction (Salinité × Dose de fumier (FV) × Année) sur la teneur foliaire de la pomme de terre en proline (mg g ⁻¹ MF)	206
Figure 15.	Effet de l'interaction (Salinité × Dose de fumier (FV) × Année) sur la teneur foliaire de la pomme de terre en chlorophylle (mg g ⁻¹ MF) durant les quatre années de l'essai	209

Liste des Tableaux

Partie II. Chapitre 1

Tableau 1.	Coefficients équivalents engrais pour les trois éléments nutritifs majeurs (N, P, K) en fonction de type de produit organique	41
Tableau 2.	Composition en éléments fertilisants (macroéléments et en oligo-éléments en fonction du type de produit organique)	50

Partie II. Chapitre 2

Tableau 1.	Caractéristiques physiques et physico-chimiques initiales du sol avant l'apport organique (30 cm)	76
Tableau 2.	Matrice de corrélations entre les différents variables	106

Partie II. Chapitre 3

Tableau 1.	Caractérisation physico-chimique des deux sols salé et non salé (Profondeur : 0 - 30 cm)	113
Tableau 2.	Principales caractéristiques physiques, physicochimiques et biochimiques des différents produits organiques testés	115
Tableau 3.	Résultats de l'analyse statistique des effets des facteurs étudiés et de leur interaction sur la minéralisation du carbone (dégagement de CO ₂)	117
Tableau 4.	Résultats de l'analyse statistique des facteurs étudiés et de leur interaction sur la minéralisation de l'azote : Ammonification (N-NH ₄ ⁺); Nitrification (N-NO ₃ ⁻) et azote minéral (N-NH ₄ ⁺ + N-NO ₃ ⁻)	122

Partie III

Tableau 1.	Données météorologiques enregistrées pour la période de l'essai (2009 - 2012)	148
Tableau 2.	Caractérisation physique et physico-chimique moyenne du sol (0-50 cm de profondeur) au niveau des trois sites expérimentaux avant plantation	150
Tableau 3.	Caractérisation physico-chimique et biochimique comparative du fumier de volailles utilisé durant les quatre années de l'essai au champ (2009-2012) (Avant épandage sur les sols des trois sites expérimentaux)	152
Tableau 4.	Caractérisation physico-chimique moyenne de l'eau d'irrigation durant les quatre années de l'essai	155
Tableau 5.	Effets des facteurs étudiés (Salinité, Dose de fumier (FV) et Année) et de leur interaction (Moyennes ± SD et les valeurs P) sur les paramètres de croissance végétative de la pomme de terre durant les quatre années de l'essai (2009 - 2012)	168
Tableau 6.	Effet des facteurs étudiés (Salinité, Dose de fumier (FV), Année) et de leur interaction (Moyennes ± SD et les valeurs P) sur les paramètres de rendement de la pomme de terre durant les quatre années de l'essai (2009 -2012)	175

Liste des photos

Partie I. Chapitre I

Photo1.	Résidus végétales abandonnés dans les palmeraies de la région de Ouargla	18
Photo 2.	Etat de salinisation d'une palmeraie (a) et un champ de pomme de terre (b) irriguées par des eaux saumâtres	23

Partie II. Chapitre1

Photo1.	Aspects des différents produits organiques utilisés : a. Fumier de volailles, b. Fumier de Bovins, c. Fumier de Caprins, d. Fumier de Dromadaire, e. Résidus de palmier dattier	36
---------	---	----

Partie II. Chapitre 3

Photo 1.	Dispositif expérimental de la minéralisation de carbone in vitro (incubation des échantillons du sol à 28°C ; 80 % CR)	111
Photo 2.	Dispositif expérimental de la minéralisation de l'azote in vitro (incubation des échantillons du sol à 28°C ; 80 % CR)	111

Partie III

Photos 1.	Certaines opérations culturales de la conduite de l'essai expérimental	161
-----------	--	-----

Liste des annexes

Annexe I.	Contexte écologique et problématique	265
Annexe II.	Effets des produits organiques sur l'amélioration des propriétés physiques, physico- chimiques et microbiologiques des sols salé	266
Annexe III.	Essai de l'optimisation de la fertilisation organique (à base de fumier de volailles) sur la culture de la pomme de terre en conditions d'irrigation des eaux chargées en sels	279

Table des matières

Dédicace et Avant-propos	
Résumés	
Sommaire	
Introduction générale	1
Première partie. Contexte écologique du milieu naturel d'étude et problématique	10
Chapitre 1. Contexte écologique du milieu naturel d'étude	
I .Facteurs abiotiques	10
1. Géographie	10
2. Géologie géomorphologie	12
3. Climat	12
4. Pédologie (Ressources en sols)	13
5. Pédoclimat	14
6. Hydrogéologie (Ressources en eaux)	15
6.1.Continental intercalaire (CI)	15
6.2.Complexe terminal (CT)	15
6.3.Nappe phréatique	16
II. Facteurs biotiques	16
1. Flore (Végétation)	18
2. Faune	18
3. Microflore (Microorganismes organismes du sol)	19
Chapitre 2. Problématique (Destruction du potentiel de fertilité du sol en milieu aride)	
I. Principaux types de dégradation du sol en milieu aride	21
1. Dégradation physique	21
2. Dégradation physico – chimique	22
2.1. Salinité et Salinisation de la ressource sol et eau	22
2.2. Déficit en matière organique	24
3. Dégradation biologique et microbiologique du sol	26
II. Action anthropique	27
III. Conclusion partie	27
Deuxième partie .Effets des fertilisants organiques sur l'amélioration de certaines propriétés physiques, physico- chimiques et microbiologiques sols salés	
Chapitre 1.Caractérisation des produits organiques utilisés (Estimation de la valeur agronomique (Valeur fertilisante et amendante)	
Résumé	31
I. Introduction	31
II. Matériel et méthodes	35
1. Produits organiques utilisés	35
1.1.Fumier volailles	35
1.2.Fumier bovins	35
1.3.Fumier de caprins	35
1.4.Fumier de dromadaire	36
1.5.Résidus de palmier dattier	36
2. Protocole d'échantillonnage	36
2.1. Prélèvement des échantillons	36

2.2. Entreposage des échantillons	37
3. Méthodes d'analyse	37
3.1. Méthodes de caractérisation physico-chimique des produits organiques utilisés	37
3.1.1. pH	38
3.1.2. Conductivité électrique (CE)	38
3.1.3. Taux d'humidité (Hu)	38
3.1.4. Matière sèche (MS)	38
3.1.5. Matière minérale (MM)	39
3.1.6. Matière organique (MO) et carbone organique	39
3.2. Méthodes de détermination de la valeur agronomique des produits organiques testés	39
3.2.1. Valeur fertilisante (composition en éléments nutritifs)	39
3.2.1.1. Dosage de l'azote total	39
3.2.1.2. Dosage des ions ammonium et nitrate (NH_4^+ et NO_3^-)	40
3.2.1.3. Dosage des macroéléments cationique et micro-éléments	40
3.2.1.4. Dosage du phosphore total	40
3.2.1.5. Dosage du chlore	40
3.2.1.6. Méthode de détermination de l'équivalence engrais minéral	41
3.2.2. Valeur amendante (Caractérisation biochimique)	42
3.2.2.1. Rapport C/N	42
3.2.2.2. Caractérisation Biochimique de la Matière organique (CBM)	42
3.2.2.3. Fractionnement des composés humiques	43
III. Résultats et discussion	44
1. Caractérisation physique et physico-chimique en fonction de type de produit organique	44
1.1. Teneurs en MS, MO, MM	44
1.2. Variation du pH en fonction du type de produit organique	45
1.3. Variation de la conductivité électrique (CE) en fonction du type de produit organique	46
2. Valeur fertilisante en fonction du type de produit organique	48
2.1. Teneurs en éléments macroéléments et micro-éléments (oligoéléments et éléments traces métalliques)	48
2.1.1. Macroéléments	48
2.1.2. Micro-éléments (Oligoéléments et éléments traces métalliques)	49
2.1.3. Teneurs en chlorures et en sodium	49
2.2. Variation de la teneur en unités fertilisantes en fonction du type de produit Organique	52
2.3. Estimation de la teneur en éléments fertilisants disponibles à la plante	53
3. Valeur amendante en fonction du type de produit organique	54
3.1. Rapport C/N	55
3.2. Caractérisation biochimique de la Matière organique (CMB)	57
3.2.1. Cellulose	57
3.2.2. Hémicellulose	57
3.2.3. Lignine	57
3.3. Composition en acides humiques	59
3.3.1. Acides humiques (AH) et acides fulviques (AF)	59
3.3.2. Rapport AH/AF	61
IV. Conclusion du chapitre	63

Chapitre 2. Effets des fertilisants organiques sur l'amélioration de certaines propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés

Résumé	66
I. Introduction	66
II. Matériel et méthodes	68
1. Sol utilisé	68

2.Produits organiques testés	68
3.Dispositif expérimental et conduite de l'essai	69
3.1. Traitements	69
3.2. Dates et modalités de prélèvement des échantillons	70
3.3.Données mesurées (Analyses effectuées sur les mélanges)	70
4.Méthodes d'analyse	70
4.1. Méthodes d'analyse du sol	70
4.2. Méthodes d'analyse des produits organiques	75
4.3. Méthode de traitement des données	75
III. Résultats et discussion	75
1. Caractérisation du sol (avant l'apport organique)	75
2. Caractérisation des produits organiques (avant l'apport au sol)	76
3.Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur les propriétés du sol (Après mélange)	76
3.1.Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la conductivité électrique (CE)	77
3.1.1. Effet du type produit organique sur la conductivité électrique (CE)	77
3.1.2. Effet du temps de prélèvement sur la conductivité électrique (CE)	78
3.1.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur la conductivité électrique (CE)	80
3.2. Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur le pH du sol	82
3.2.1.Effet du type de produit organique sur le pH	83
3.2.2.Effet du temps de prélèvement sur le pH	85
3.2.3.Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur le pH	87
3.3.Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la capacité de rétention en eau (CR)	88
3.3.1. Effet du type de produit organique sur la capacité de rétention en eau (CR)	90
3.3.2. Effet du temps de prélèvement sur la capacité de rétention en eau (CR)	90
3.3.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur la capacité de rétention en eau (CR)	93
3.4.Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la capacité d'échange cationique (CEC)	93
3.4.1.Effet du type de produit organique sur la capacité d'échange cationique (CEC)	94
3.4.2.Effet du temps de prélèvement sur la capacité d'échange cationique (CEC)	96
3.4.3.Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur la capacité d'échange cationique (CEC)	99
3.5.Etude de quelques corrélations entre les différents variables étudiées	100
IV. Conclusion du chapitre	101

Chapitre 3. Effets des fertilisants organiques sur l'amélioration du fonctionnement microbiologique des sols salés :
Impact sur la minéralisation de l'azote et du carbone

Résumé	103
I. Introduction	103
II. Matériel et méthodes	105
1.Sites de prélèvement des échantillons du sol	105
2. Pédoclimat	106
3. Méthode de conditionnement des échantillons du sol	107
4. Méthodes de caractérisation du sol	107
5. Echantillonnage et conditionnement des produits organiques	107

6. Méthodes de caractérisation des produits organiques	107
7. Traitements et incubation	108
8. Méthodes d'étude de la dynamique de la minéralisation du carbone et de l'azote des différents produits organiques de fumiers	108
8.1. Méthode de la minéralisation du carbone organique (mesure de dégagement de CO ₂ (Technique de respirométrie)	108
8.2. Méthode de la minéralisation de l'azote organique (mesure de N-NH ₄ ⁺ et N-NO ₃ ⁻)	
9. Méthodes de traitement des données	110
III. Résultats et discussion	112
1. Caractérisation du sol (avant apport organique)	113
2. Caractérisation des produits organiques (avant apport aux sols)	119
3. Dynamique de minéralisation de carbone (évolution du dégagement cumulé de C-CO ₂)	115
3.1. Effet du type de produit organique sur la minéralisation du carbone	116
3.2. Effet de la salinité sur la minéralisation du carbone	119
3.3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur la minéralisation du carbone	120
3.3.1. Effet de la salinité sur la minéralisation du carbone	121
4. Dynamique de minéralisation de l'azote (production cumulé de l'azote)	121
4.1. Production cumulative de l'azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	121
4.1.1. Effet du type de produit organique sur l'azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	123
4.1.2. Effet de la salinité sur l'azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	124
4.2. Production cumulative de l'azote nitrique (N-NO ₃ ⁻)	124
4.2.1. Effet du type de produit organique de l'azote nitrique (N-NO ₃ ⁻)	125
4.2.2. Effet de la salinité sur l'azote nitrique (N-NO ₃ ⁻)	127
4.2.3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur l'azote nitrique (N-NO ₃ ⁻)	128
4.3. Relation entre les deux formes minérales de l'azote N-NH ₄ ⁺ et N-NO ₃	130
4.4. Production cumulative de l'azote minéral (N-NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻)	132
4.4.1. Effet du type de produit organique sur l'azote minéral (N-NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻)	132
4.4.2. Effet de la salinité sur l'azote minéral (N-NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻)	132
4.4.3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur l'azote minéral (N-NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻)	134
IV. Conclusion du chapitre	135
V. Conclusion de la deuxième partie	136

Troisième partie. Essai de l'optimisation de la fertilisation organique à base de fumier de volailles sur la culture de la pomme de terre en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels

Résumé	140
I. Introduction	144
II. Matériel et méthodes	144
1. Objectif de l'essai au champ	145
2. Sites expérimentaux	146
3. Climat	149
4. Echantillonnage et caractérisation du sol	149
5. Echantillonnage et caractérisation de fumier de volailles	151
6. Analyse de l'eau d'irrigation	154
7. Conduite de l'essai au champ et dispositif expérimental	155
7.1. Justification de choix des doses de fumiers et du matériel végétal	155
7.1.1. Matériel végétal	155
7.1.2. Doses de fumier de volailles (FV)	156
7.2. Organisation du dispositif expérimental et conduite de l'essai	156
8. Paramètres étudiés	158

8.1 Paramètres biométriques	158
8.1.1. Paramètres de croissance végétative	158
8.1.1.1. Hauteur des tiges aériennes plant ⁻¹	158
8.1.1.2. Nombre de tiges plant ⁻¹	158
8.1.1.3. Surface foliaire plant ⁻¹	158
8.1.1.4. Biomasse sèche plant ⁻¹	159
8.1.2. Paramètres de rendement	159
8.1.2.1. Nombre de tubercules plant ⁻¹	159
8.1.2.2. Diamètre du tubercule plant ⁻¹	159
8.1.2.3. Rendement plant ⁻¹	159
8.1.2.4. Rendement total(t ha ⁻¹)	159
8.2. Paramètres physiologiques et biochimiques	161
8.2.1. État nutritionnel	161
8.2.2. Paramètres biochimiques	162
8.2.2.1. Dosage de la proline	163
8.2.2.2. Dosage de la chlorophylle	164
9. Méthode de traitement des données	165
III. Résultats et discussion	165
1. Effets de la salinité, doses fumier et année et leur interaction sur les paramètres biométriques de la pomme de terre	166
1.1. Effets sur les paramètres de la croissance végétative	166
1.1.1. Effet des doses de fumier sur les paramètres de la croissance végétative	166
1.1.2. Effet de la salinité sur les paramètres de la croissance végétative	166
1.1.3. Effet de l'année sur les paramètres de la croissance végétative	168
1.1.4. Effet de l'interaction de la salinité, doses de (FV) et année sur les paramètres de la croissance végétative	169
1.1.5. Discussion générale	170
1.2. Effets sur les paramètres de rendement	173
1.2.1. Effet des doses de fumier sur les paramètres de rendement	173
1.2.2. Effet de la salinité sur les paramètres de rendement	174
1.2.3. Effet de l'année sur les paramètres de rendement	174
1.2.4. Effet de l'interaction de la salinité, doses de (FV) et année sur les paramètres de rendement	176
1.2.5. Effet de la salinité, doses de fumier de FV, année et leur interaction sur le rendement total	176
1.2.6. Discussion générale	180
2. Effet de la salinité, doses fumier (FV), année et leur interaction sur l'état nutritionnel de la pomme de terre	183
2.1. Effet des doses de fumier (FV) sur la teneur des feuilles et racines de la pomme de terre en éléments minéraux	184
2.2. Effet de la salinité sur la teneur des feuilles et racines en éléments minéraux	184
2.3. Effet de l'année sur la teneur des feuilles et racines en éléments minéraux	186
2.4. Effet de l'interaction de la salinité, dose fumier (FV), année et leur interaction sur la teneur des feuilles et racines en éléments minéraux	187
2.5. Effet de la salinité, doses fumier et année sur les ratios ioniques au niveau des racines et des feuilles de la pomme de terre	200
2.5.1. Effet des doses de fumier de volailles (FV) sur les ratios ioniques	200
2.5.2. Effet de la salinité sur les ratios ioniques	201
2.5.3. Effet de l'année sur les ratios ioniques	201
2.5.4. Effet de l'interaction de la salinité, dose de fumier (FV) et année sur les ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre	202
3. Effet de la salinité, doses fumier et année sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline	204

3.1. Effet des doses de fumier de volailles sur la teneur foliaire en proline	204
3.2. Effet de la salinité sur la teneur foliaire en proline	205
3.3. Effet de l'année sur la teneur foliaire en proline	205
3.4. Effet de l'interaction de la salinité, doses fumier et année sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline	205
3.6. Discussion générale	206
4. Effet sur de la salinité, doses fumier (FV) et année et leur interaction sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en chlorophylle totale	207
4.1. Effet des doses de fumier de volailles sur la teneur foliaire en chlorophylle	207
4.2. Effet de la salinité sur la teneur foliaire en chlorophylle totale	208
4.3. Effet année sur la teneur foliaire en chlorophylle totale	208
4.4. Effet de l'interaction de la salinité, doses fumier et année sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en chlorophylle totale	208
4.5. Discussion générale	209
IV. Conclusion troisième partie	211
V. Conclusion générale et perspectives	215
Références bibliographiques	228
Annexes	265

Les régions arides se trouvent à des stades de dégradation alarmants (Halitim, 1988 ; Lal, 2004 ; D'Odorico et Ravi, 2015). Ils sont sujets à une désertification qui se caractérise, sur le plan pédologique par une baisse notable de la fertilité de sol sur de multiples plans: physique, chimique et biologique (Tejada *et al.*, 2006 ; Lakhdhar *et al.*, 2008) attribuée principalement à l'appauvrissement en matière organique (Albaladejo *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2010 ; Dlamini *et al.*, 2014).

En effet, le bilan organique déficitaire dans les régions arides est d'autant plus alarmant si l'on considère la rapidité des processus de la dégradation des stocks de matières organiques et la lenteur des mécanismes permettant la reconstruction de ces stocks. Dans ces régions, les flux de sorties organiques dépassent largement les flux d'entrées (Halitim, 2011).

D'après Balesdent (1996); Knops et Tilaman (2000), trente années de mise en culture suffisent à dégrader une quantité de matière organique dont la restauration prendra un siècle. Cette situation serait plus grave pour les sols arides chauds où l'ampleur de la perte de la matière organique est amplifiée pour de multiples raisons.

Le drainage climatique faible caractérisant ces régions fait que la plupart des cultures sont alimentées en eau, sous l'action combinée de l'irrigation et des températures élevées. Les processus de minéralisation des matières organiques sont très intenses dans ces régions au détriment du processus d'humification qui se trouvent inhibés, que ce soit, sur le plan quantitatif par le manque de l'accumulation de la matière organique, ou sur le plan qualitatif par le blocage de la polymérisation des composés humiques formés (Duchaufour 1985 ; Oustani, 2006). Par conséquent, prend naissance un humus inerte dépourvu de ses groupements fonctionnels sans aucune influence sur la fertilité du sol (Dommergue et Mangenot, 1970 ; Duchoufour, 1977).

Les conditions climatiques dans ces régions défavorisent l'accumulation de la matière organique, et le peu qui s'accumule est rapidement dégradée dans la seule action des paramètres physico-chimiques, ce qui exclut, dans la majorité des cas, toute intervention microbienne dans les processus de l'évolution de matière la organique du sol (Sasson, 1967; Zombre, 2006 ; Nicolas *et al.*, 2012). L'absence de l'action microbienne a pour effet indirect de ralentir le recyclage des éléments nutritifs essentiels et de diminuer leur disponibilité à la plante.

Par ailleurs, le faible rendement en matière organique dans les sols arides, est en partie dû à la pauvreté et à la dégradation du couvert végétal en relation directe avec les facteurs pédoclimatiques extrêmes dans ces zones, ce qui les rendent très vulnérables à l'érosion (Al-Busaidi *et al.*, 2014).

La situation du bilan organique déficitaire dans les sols des régions arides se trouve d'autre part aggravée par la dominance du sable, caractérisant le plus souvent la fraction minéralogique de ces sols. En fait, le sable provoque une déprotection physique de la matière organique ce qui favorise sa forte oxydation et augmentant son accessibilité aux agents physiques de dégradation au détriment des agents biologiques (Duchaufour,1985 ; Naman *et al.*, 2001 ; Badiane *et al.*, 2001; Blanchart *et al.*, 2005 ; Gregorich *et al.*, 2006).

D'un autre coté, hormis l'insuffisance, voir le manque des substrats organiques dans les régions arides, qui constituent le premier facteur limitant la vie des microorganismes et des plantes, la salinité, au même titre que les facteurs précédents contribue à la dégradation des terres arides (Liang *et al.*, 2005 ; Tejada *et al.*, 2006 ; Walker et Bernal, 2008).

La salinisation des terres est un problème majeur à l'échelle du globe. Selon FAO (2009), la salinisation affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente. Il a été estimé que plus de 50 % des terres arables seront salinisés en l'année 2050 (Jamil *et al.*, 2011). Selon ces derniers, la salinité du sol augmente à un taux annuel de 10 % pour diverses raisons naturelles, y compris les faibles précipitations, la forte évaporation de surface et l'altération des roches salines.

Il est notoire que la salinité des sols dans les zones arides est tributaire des conditions naturelles et des pratiques anthropiques inappropriées (Munns, 2002 ; Jalali et Merrikhpour, 2008 ; Levy et Taib, 2013). En conséquence, d'importantes surfaces des terres des régions arides se trouvent naturellement salines ou subissent une salinisation secondaire du fait du recours intense à l'irrigation avec des eaux salines, sous climats chauds et atmosphères évaporantes (Halitim et Daoud, 1994; Lambers, 2003; Rengasamy, 2006 ; Hachicha, 2007 ; Rahmoune, 2008; Lakhdhar, 2008 ; Arzani, 2008 ; Kakumanu et Williams, 2014).

L'extension progressive de la salinisation des terres arables constituée une contrainte sérieuse pour la production agricole dans ces régions où les ressources en sols et en eau d'irrigation sont trop salines pour la plupart des cultures stratégiques (Munns, 2002 ; Parida et Das, 2005; FAO, 2006; Levy et Taib, 2013).

Cette situation se voit aggravée par la pratique de l'agriculture conventionnelle basée sur l'utilisation abusive des intrants agrochimiques notamment des engrais minéraux (Grieve et Shannon; 1999; Zougmoré *et al.*, 2004).

Ce qui importe de savoir est que, quelle que soit l'origine de la salinité, l'excès de sel modifie les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol (Rietz et Haynes, 2003; Tejada et Gonzalez, 2005; Wichern *et al.*, 2006; Tejada *et al.*, 2006 ; Lakhdhar *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010). L'altération de ces propriétés diminue la fertilité du sol et constitue un stress indirect pour la nutrition des plantes.

A ce titre, Sumner (2000) ; Liang *et al.*(2003) ; Choudhary (2003) ; Tejada et Gonzalez, 2005; Wichern *et al.* (2006); Clark *et al.* (2007) ont montré que l'augmentation de la conductivité électrique du sol (CE) diminue la stabilité structurale, augmente la densité apparente, le pourcentage du sodium échangeable (ESP), le sodium absorption ratio (SAR) et le pH du sol.

Par ailleurs, les concentrations élevées en sels agissent négativement sur la taille et l'activité microbiologique du sol, particulièrement sur les processus biologiques impliqués dans l'accumulation et la minéralisation de la matière organique. En conséquence, ces sols sont déficients en composés humiques polycondensés et en de nombreux éléments nutritifs tels que le N, P, S, Cu, Mn, Mo et Zn, nécessaires à la vie des plantes (Naidu et Rengasamy, 1993 ; Batra et Manna, 1997 ; Hanay *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2005 ; Tejada *et al.*, 2006 ;Wichern *et al.*, 2006).

Dans ces zones, le comportement des plantes (Munns, 2002; Lindsay *et al.*, 2004; Munns *et al.*, 2006 ; Achraf, 2009) et des microorganismes (Sardinha *et al.*, 2003; Rietz, 2003 ; Wichern *et al.*, 2006) se trouve en permanence sous l'effet de stress de type osmotique, ionique et nutritionnel.

En effet, le faible potentiel osmotique de la solution du sol et les contraintes des déséquilibres nutritionnels résultant de la présence des ions toxiques en excès liés à la salinité (Cl^- , Na^+), sont à l'origine de la faible acquisition des microorganismes (Setia *et al.*, 2011; Andronov *et al.*, 2012; El-Majdoub et Marschner, 2013 ; Al-Busaidi *et al.*, 2014; Reddy et Crohn, 2014) et des plantes (Harris, 1980 ; Greenway et Munns, 1980 ; Grégory, 2005 ; Haouala *et al.*, 2007 ; Rengasamy, 2010 ; Chowdhury *et al.*, 2011 ; Sall *et al.*, 2015) à l'eau et aux éléments nutritifs (K^+ , Ca^{++} , NO_3^- , PO_4^{3-}).

Ces problèmes physiologiques liés à la salinité montrent clairement que dans les régions arides, le problème de la faible productivité des sols salés est simultanément lié aux dommages causés par les quantités excessives en sels solubles et à l'absence et /ou à l'insuffisance des substances énergétiques et nutritives à la fois pour les microorganismes et les plantes.

Le bas niveau de la fertilité naturelle en relation avec les particularités pédoclimatiques est d'autant plus accentué par le faible recours des agriculteurs dans les zones arides aux restitutions organiques et aux apports organiques exogènes, notamment depuis l'apparition des engrais de synthèse. Cette pratique a fortement diminué au détriment du statut organique des sols.

Face à ces problèmes de fertilité, l'entretien du statut organique du sol s'inscrit donc comme une priorité dans la mise en valeur des sols salés des régions arides, surtout que les autres solutions habituellement recommandées restent limitées (utilisation des amendements minéraux tel que le gypse, les procédés de drainage et de lessivage...etc.), dans la mesure où leur action visent uniquement l'amélioration des propriétés physiques du sol salé et exercent peu d'effets sur l'amélioration de l'état nutritionnel des plantes et des microorganismes (Rhoades et Loveday, 1990). Ainsi, alternativement, la fertilisation organique est considérée parmi les meilleures solutions recommandées pour restaurer les sols affectés par la forte salinité et irrigués par des eaux salines (Tejada *et al.*, 2006 ; Melero *et al.*, 2007 ; Walker et Bernal, 2008 ; Mufwanzala et Dikinya, 2010 ; Sall *et al.*, 2015).

En effet, depuis longtemps, la fumure organique reste la fertilisation adéquate et la tradition agricole la plus anciennement adoptée par les agriculteurs. L'apport organique aux sols salés améliore la fertilité physique, chimique et biologique du sol (Garcia *et al.*, 2004 ; Tejada *et al.* (2006).

Les effets des matières organiques apportées ne se résument pas à la quantité des éléments minéraux disponibles pour les plantes (Gilly et Eghball, 2002). Leur spectre d'action est très large. Elles permettent la récupération des éléments nutritifs perdus comme l'azote et le phosphore (Gilly et Eghball, 2002), améliorent les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol (Ayuso *et al.*, 1996; Gilly et Risse, 2000).

Ainsi , à l'égard de ces propriétés, les matières organiques font diminuer les principaux paramètres de la salinité à savoir : le pH, CE, le SAR et l'ESP (Lax *et al.*,1994; Qadir *et al.*,2001 ; Walker et Bernal, 2008), augmentent la stabilité des agrégats, la capacité d'échange cationique et la capacité de rétention d'eau, stimulent la croissance microbienne et/ou les cellules microbiennes et les enzymes introduites aux sols, réduisant l'effet négatif de la salinité (Wang, 2010 ; Lakhdhar, 2010 ; Wu *et al.*, 2013), stimulent la respiration, la photosynthèse, et la teneur en chlorophylle (Alburquerque *et al.*, 2007 ; Tejada et Gonzalez, 2005; Lakhdhar *et al.*, 2008). Ces effets positifs sont importants pour les sols déficients en matière organique, cas de ceux du Sud de l'Algérie ayant un taux de matière organique <1% (Halitim,1988).

Ceci dit, le remplacement des ions responsables de la salinité par d'autres apportés par la matière organique est considéré comme une stratégie viable pour l'amélioration de la nutrition des plantes cultivées sur des sols affectés par les sels (Garcia, 2000; Garcia *et al.*, 2004). Ceci est très important, surtout en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels, où l'antagonisme ionique peut protéger les plantes contre les dommages liés à la présence excessive des ions toxiques.

Par ailleurs, cet effet a été clairement observé par Rady (2012) et El Majdoub et Marschner (2013), où l'apport organique au sol salé a haussé l'approvisionnement du sol en composés carbonés facilement disponibles aux microorganismes et aux plantes, et a réduit l'effet négatif de la salinité, probablement en fournissant à ces organismes l'énergie nécessaire à la synthèse des solutés organiques. En fait, l'accumulation des osmolytes organiques nécessitent des quantités élevées d'énergie (Alarcon *et al.*, 1994 ; Grégory Bois, 2005).

Conséquemment, lorsque l'énergie et la matière disponible pour la croissance sont entièrement détournées pour l'adaptation et la protection contre les effets indésirables de la salinité, l'organisme ne dispose plus de ressources pour contenir l'excès de Na^+ loin des activités métaboliques sensibles des cellules vivantes (Gregorie, 2005). D'où l'importance des apports organiques exogènes qui agissent comme sources énergétiques supplémentaires pour assurer les processus de l'osmorégulation et osmoprotection très coûteux en matière d'énergie en conditions salines.

Cependant, si la matière organique semble la solution idéale pour les agriculteurs en améliorant la fertilité des sols salés, son utilisation reste confrontée à de problèmes de mauvaise gestion (Son application à fortes doses, manque d'informations sur les mélanges nécessaires à un bon équilibre des matières organiques utilisés, etc.).

Les utilisations irrationnelles ou la mauvaise qualité des produits organiques peut provoquer une menace potentielle en libérant des polluants organiques et inorganiques dans le sol, portant préjudice aux organismes et aux écosystèmes (Cai *et al.*, 2007).

Par conséquent, la conservation de la fertilité physique, chimique et biologique du sol par le maintien d'un taux optimum de matière organique impose des apports organiques régulières. En fait, les systèmes de production durable, dont nous avons besoin pour l'avenir de l'agriculture dans le milieu saharien, doivent avoir un triple objectif : fournir des produits de qualité, minimiser les impacts sur l'environnement et conserver le patrimoine sol avec toutes ses potentialités. À ce titre, il est impératif d'envisager des restitutions organiques régulières et à des doses raisonnables (Chaussod, 1996 ; Larney et Angers, 2012).

Cependant, il est à souligner que l'action améliorante qu'exercent les matières organiques sur les propriétés du sol salé, intervient différemment selon la nature biochimique des produits organiques apportés au sol notamment de leur biodégradabilité (Thuies *et al.*, 2002; Ha *et al.*, 2008).

Dans ce contexte, une meilleure gestion de l'utilisation des apports organiques exogènes (sous forme de fumier ou de résidus des végétaux) comme amendements ou fertilisants s'avère être indispensable dans les pratiques agricoles visant à la levée des contraintes posées à la mise en culture durable des sols salés des zones arides.

L'objectif principal de cette étude se focalise sur les effets des différents produits organiques sur la réactivité physico-chimique, le fonctionnement microbiologique et la productivité des plantes sous les conditions salines des régions sahariennes.

L'approche méthodologique qui tente à répondre à cet objectif repose sur une stratégie complémentaire mêlant (i) une revue descriptive sur le milieu naturel d'étude, et (ii) des expérimentations en conditions semi contrôlées, conditions contrôlées et des expérimentations aux champs. Ainsi, ce manuscrit s'articule autour de trois parties :

La première partie correspond à une synthèse écologique décrivant le contexte naturel dans lequel s'inscrit cette étude, tout en pointant les problématiques ayant conduit au travail expérimental présenté dans les parties suivantes. Cette première partie est divisée en deux chapitres :

- **Le premier chapitre** tentera au prime abord de faire la synthèse des connaissances sur le milieu naturel d'étude où nous avons essayé de faire ressortir les multiples facteurs abiotiques et biotiques caractérisant ce milieu.
- **Le deuxième chapitre** porte sur l'étude des effets des paramètres écologiques sur la destruction du potentiel de fertilité du sol. Il s'agit, surtout de déterminer l'impact et les répercussions des facteurs écologiques sur le faible rendement en matière organique et à la forte salinité des ressources sol et eau.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de différents produits organiques (fumier de volailles, fumier de bovins, fumier de caprins, fumier de dromadaire et les résidus de palmier dattier) sur certaines propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques des sols salés. Cette partie est répartie en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** est réservé à la caractérisation physico-chimique et biochimique des produits organiques utilisés dans le cadre de cette étude, ainsi qu'à l'estimation de la valeur agronomique des produits organiques testés (Valeur amendante et valeur fertilisante).
- **Le deuxième chapitre** décrit une étude menée en conditions semi contrôlées visant à déterminer l'effet comparé des différents produits organiques testés sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés.

Le troisième chapitre est particulièrement biodynamique par son contenu, où nous avons essayé d'étudier le processus de la biodégradation de la matière organique, notamment la minéralisation de ses composantes azotées et carbonées. Ce volet vise ainsi, à évaluer la vitesse de biodégradation et à établir des relations entre la qualité de la matière organique et la dynamique de sa biodégradation et ceci, afin d'expliquer et de prévoir le comportement de chaque produit à part.

Cette deuxième partie constitue pour cette étude une étape préliminaire ayant pour objectif de déterminer le type de produit organique qui montre l'effet le plus performant en terme de l'amélioration des propriétés physiques et microbiologiques sous nos conditions expérimentales, et ceci afin de l'intégrer dans une troisième expérimentation d'un essai en plein champ.

La troisième partie correspond, grâce à la mise en place d'une expérimentation au champ, à l'étude pluriannuelle (quatre ans) de l'effet de doses croissantes de fumier de volailles sur certains paramètres biométriques (paramètres de croissance végétative et de rendement), l'état nutritionnel, ainsi, que sur l'évaluation de l'effet de ce produit organique sur l'amélioration de la tolérance de la culture de la pomme de terre (Variété Spunta) à la salinité notamment par la détermination de la teneur en proline (en tant que soluté organique) et en chlorophylle, sous les conditions salines des régions arides.

Enfin, en guise de conclusion générale, nous proposerons une synthèse des résultats acquis, des recommandations et des perspectives.

Contexte écologique du milieu naturel d'étude

En vue de l'identification du milieu naturel, l'approche méthodologique retenue dans ce chapitre, tient compte d'une double démarche : d'une part, la connaissance du milieu physique en tant que contexte écologique et d'autre part, la connaissance des facteurs biotiques qui expriment, les potentialités biologiques de ce cadre écologique. La définition du contexte écologique, en tant que composante abiotique, se fera sur la base de l'analyse de divers éléments (Géographie, géomorphologique et géologique, climat, pédologie, pédo-climat et hydrogéologie).

I. Facteurs abiotiques

1. Géographie

La région de Ouargla est l'une des Oasis du Sahara algérien, située au fond d'une large cuvette de la vallée d'Oued M'ya. Elle est au Sud-Est du pays et au Nord-Est du grand Sahara algérien. La ville de Ouargla, chef lieu de la wilaya, est située à une altitude moyenne de 157 m, à 800 Km au Sud-Est d'Alger, à la longitude 5°20' E et à la latitude 31°58' Nord. Elle est limitée au Nord par Djelfa et El Oued, à l'Est par la Tunisie, au Sud par Tamanrasset et Illizi, et à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa (Fig1.a) (DPAT, 2010). Les limites géomorphologiques sont: au Nord : Sebket Safioune, à l'Est : Ergs Touil, au Sud : les dunes de Sadrata et à l'Ouest : le versant et la dorsale du M'Zab (Fig 1 .b).

2. Géologique et géomorphologie

Le territoire de la ville de Ouargla est situé dans l'immense bassin saharien, caractérisé par la prédominance de dépôts plio-quadernaires. Des effleurements éocènes et créacés se rencontrent néanmoins à l'Est. Elle est située dans une région très peu accidentée, techniquement stable. De point de vue lithologique, à travers le territoire de la région, on rencontre dans les affleurements, des alluvions actuels, des sebkhas et croûtes gypso salins, des calcaires lacustres, des conglomérats, des calcaires marneux à rognon siliceux, des marnes et enfin des calcaires dolomitiques (Cornet, 1961).

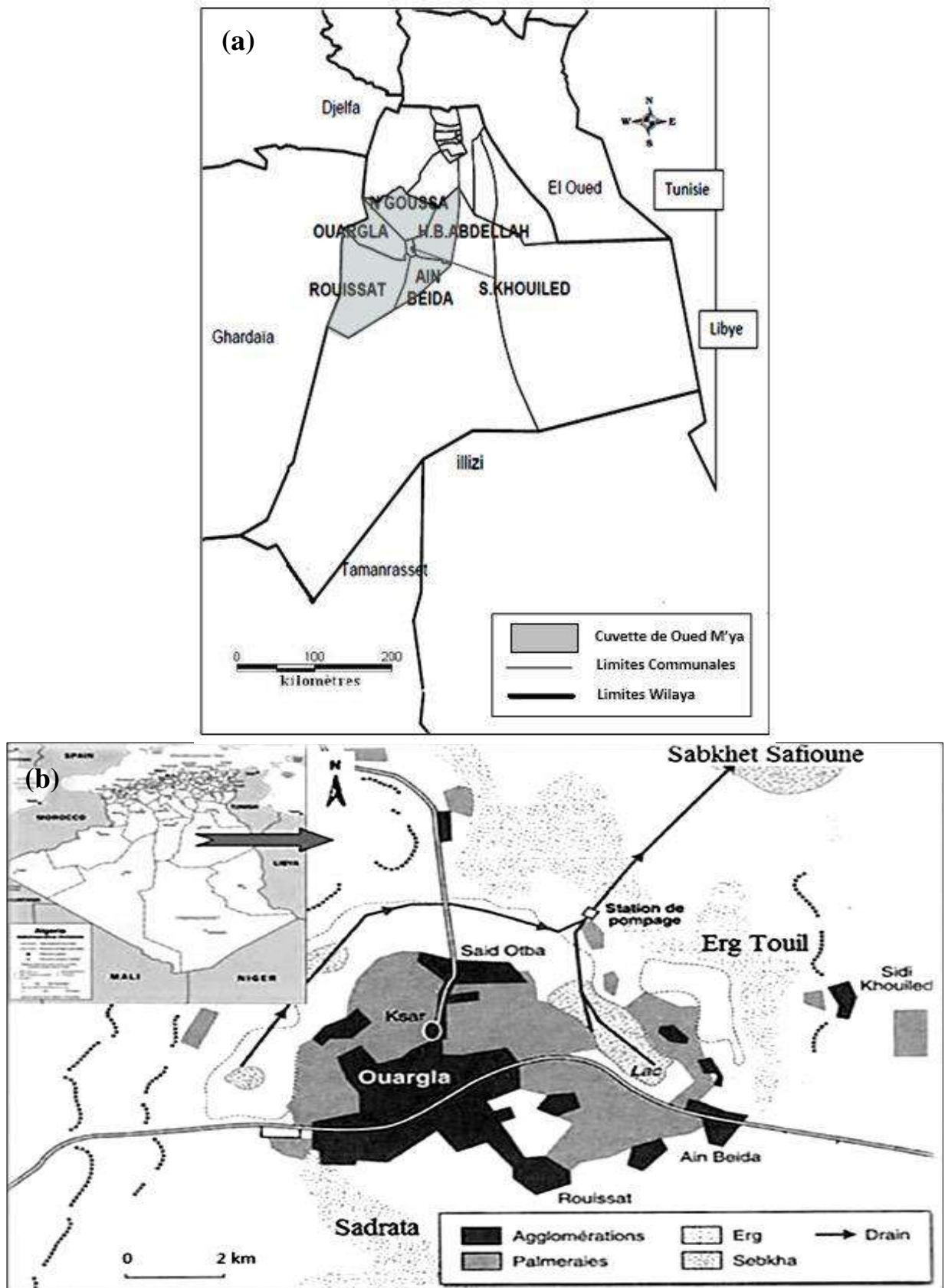


Figure 1. Situation géographique et limites géomorphologiques de la région de Ouargla : **a.** Situation géographique (DPAT, 2010), **b.** Limites géomorphologiques de la région de Ouargla (Cote, 1998)

La région de Ouargla fait partie du bassin sédimentaire de l'Oued M'ya où toutes les formations du Cambrien ou Tertiaire affleurent sur les bordures du bassin (Castany ,1982). Les terrains du Miopliocène sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires (Dunes et cordons d'erg).

Le relief de cette région est un ensemble de composantes géomorphologiques dont les principales sont :

- Le grand Erg Oriental : Dunes de sables peuvent atteindre les 200 m et qui s'étendent sur environ les 2/3 du territoire de la région.
- La Hamada : Plateau caillouteux, situé en grande partie à l'Ouest et au Sud.
- Les Vallées : Dépressions géographiques représentées par la vallée fossile d'Oued M'ya et la vallée de Oued Righ.
- Les Plaines : Espaces géographiques caractérisés par une surface plane se rencontrent à la limite occidentale de la région s'étendant du Nord au Sud (Rouvillos-Brigol ,1975).

3. Climat

D'après Ozenda (1991), les caractères du climat aride saharien sont dus tout d'abord à la situation en latitude, au niveau du tropique. Les températures sont fortes et les vents sont chauds et secs, les précipitations sont faibles et irrégulières dans le temps et dans l'espace, les amplitudes thermiques sont importantes et le pouvoir évaporant est élevé. Par conséquent, le déficit hydrique est quasi permanent (M.A.T.E, 2000).

Pour mieux illustrer les phénomènes climatiques du milieu saharien sur le terrain, nous nous sommes basés sur les relevés climatiques fournis par l'Office national de météorologie (ONM) pour la période (2002-2012). Le climat de Ouargla est de type méditerranéen aride. Il est particulièrement contrasté malgré la latitude relativement septentrionale (Rouvillos-Brigol, 1975).L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par des faiblesses des précipitations mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air (Lithellieux, 1984). Le cumul annuel des précipitations est de 35.77mm. La température moyenne annuelle est de 23.58 °C, avec un maxima moyen de 43.74 °C au mois de Juillet et un minima moyen de 5.05 °C au mois de Janvier. Les vents dominant avec une vitesse moyenne de 3.98 m/s. L'évaporation est très intense avec un cumul annuel de 3242.62 mm/an. La moyenne annuelle de l'humidité relative est de 44.01%, bien que les hivers soient relativement humides atteignant la valeur de 60.51 % en Décembre.

Les amplitudes thermiques sont importantes accompagnée d'une forte insolation, dont le cumul annuel est de 3321.98 h/an, soit une moyenne de 266.44 h /mois (Annexe I).

Pour caractériser le degré d'aridité du climat de la région d'étude et de préciser sa position à l'échelle méditerranéenne, le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1955) et le climagramme pluviothermique d'Emberger (1955), adaptée à l'Algérie et le Maroc (simplifiée par Stewart (1969) ont été établis. Sur la base de ces indices, la région de Ouargla connaît une période sèche qui s'étale sur toute l'année avec un quotient pluviothermique Q_3 de 3.17, la classant dans l'étage bioclimatique Saharien à Hiver doux (Annexe I).

4. Pédologie (Ressources en sols)

D'après Daoud et Halitim, (1994), les facteurs pédogénétiques en milieu aride sont sous la dépendance du climat avec ses principales composantes et leurs extrêmes valeurs (Température, humidité, vent, etc) et la végétation. On y note une prédominance des facteurs physiques de la pédogenèse sur les facteurs chimiques et biologiques. Ces derniers n'interviennent avec une certaine intensité qu'en période humide.

En effet, le climat saharien, avec ses caractéristiques particulières ($P/ETP < 0.20$, vent très violent et très fréquent), exerce une action sur la pédogenèse en favorisant la formation de sols minéraux bruts d'ablation en position topographique haute et dépourvue d'humidité (Concentration d'éléments grossiers, paysage de reg), et de sols minéraux bruts d'apports éolien (Concentration de sables fins, pacage dunaire) (Aubert, 1960). Les minéraux originels du sol sont entièrement désintégrés et subissent essentiellement des actions mécaniques en premier rang, desquelles il faut citer le vannage par le vent (Ozenda, 1958). Dans ces deux cas, le sol est maintenu à l'état de sol « minéral brut » dans la grande partie du Sahara.

Suite à ce qui précède, nous notons que la couverture pédologique au Sahara présente une grande hétérogénéité, qui d'après la classification française (CPCS, 1967) est composée des classes suivantes : sols minéraux bruts, sols peu évolués et sols halomorphes.

Du point de vue pédologique, la région d'Ouargla, renferme trois classes sus-citées, en plus des sols hydromorphes.

Dans les zones basses et endoréiques, l'évaporation intense conduit à l'extension des sols salins et salins sodiques avec des encroûtements gypso salins, gypseux, ou gypso-calcaires (Hamdi-Aïssa, 2001) (Fig 2) .

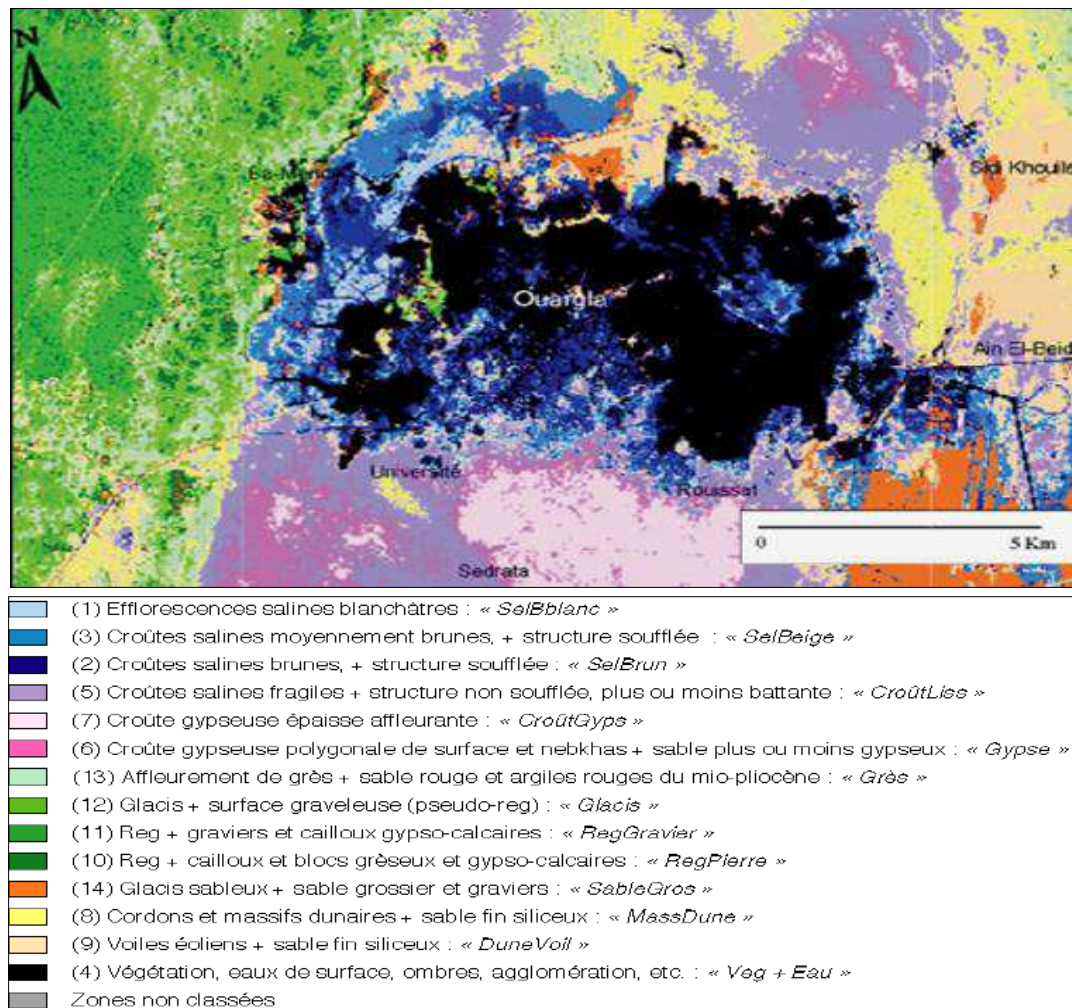


Figure 2 . Carte des états de surface des sols à Ouargla (Hamdi-Aïssa, 2001)

5. Pédoclimat

Le pédoclimat ou climat interne du sol, reflète en grande partie les conditions du climat général, notamment en ce qui concerne la température et l'humidité, mais il dépend largement aussi des propriétés physiques intrinsèques du sol: perméabilité, porosité, texture (Duchaufour , 1997 ; Gobat et *al.*, 1998). Le sol étant un milieu faiblement ouvert, Bonneau et Souchier (1979) font intervenir un troisième facteur, qui est l'oxygénation qui n'est pas du tout indépendante de l'humidité.

La température du sol dépend, essentiellement du climat atmosphérique, mais l'oxygénation et l'humidité sont influencées par la perméabilité qui, varie en fonction de la porosité et les proportions dans lesquelles l'air et l'eau l'occupent.

Le pédoclimat joue un rôle très important au niveau du sol. Il conditionne la production végétale et par conséquent l'apport des matières organiques ainsi que sa vitesse d'évolution, en agissant sur les activités des microorganismes impliqués dans la biodégradation de la matière organique (Sanchez *et al.*,1982).

La particularité des sols sahariens est leur régime hydrique de type aridique. La rareté et la concentration des pluies, la fugacité de l'humidité ainsi qu'un régime thermique «Hyper thermique» qui règne dans ces sols ne permettent qu'une activité biologique très limitée dans le temps et dans l'espace, d'où la faible évolution de ces sols.

6. Hydrogéologie (Ressources en eau)

Le Sahara algérien renferme des potentialités hydriques souterraines importantes. Ces ressources, qui seraient de cinq milliards de m³, dont 1 milliard de m³ est mobilisable, sont fossiles et donc non renouvelables (UNESCO, 1972). À Ouargla, comme dans la plupart des oasis du Sahara, les seules ressources hydriques disponibles sont d'origine souterraine. D'après Rouvillois-Brigol (1975), les formations géologiques dans cette région contiennent deux grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses: de la base du Crétacé supérieur : l'ensemble inférieur appelé le Continental Intercalaire (CI) ou "Albien", et l'ensemble supérieur appelé le Complexe Terminal (CT) (Daoud et Halitim, 1994) (Fig 3 a,b). Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes: la nappe phréatique (Cornet, 1961).

6.1. Le continental intercalaire (CI)

Le continental intercalaire (CI) est contenu dans les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses, et compris entre le Trias et le Crétacé inférieur. Il s'étend sur plus de 600 000 km² et son épaisseur moyenne est de plusieurs centaines de mètres (Cornet et Gouscov, 1952; Castany, 1982). Il affleure dans la partie Sud et Sud- Ouest et plonge à plus de 1500 m vers le Nord-Est. Comparativement aux eaux de la nappe Mioplocène, les eaux de la nappe albienne sont caractérisées par des températures très élevées de l'ordre de 55-60 °C, par contre, elles présentent une faible salinité environ 2.8 g/l de résidus secs (Rouvillois-Brigol, 1975).

6.2. Le complexe terminal (CT)

Le Complexe Terminal (CT) regroupe des formations aquifères contenues dans les horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire. Cette nappe s'étend sur une superficie de

l'ordre de 350 000 km² et sa profondeur varie de 100 à 400 m (Castany, 1982). Sur le territoire algérien, il existe en effet deux formations aquifères distinctes dans ce Complexe Terminal. La première est contenue dans les sables du Mio-Pliocène, tandis que la seconde se trouve dans le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur (Guendouz *et al.*, 1992). Ces nappes sont alimentées par les eaux de ruissellement des reliefs de la périphérie du bassin et par les infiltrations via le Grand Erg Oriental. L'écoulement de ces deux aquifères s'effectue du Sud-Ouest vers le Nord-Est. La salinité de cette nappe varie de 1.8 à 4.6 g/l (Rouvillos-Brigol, 1975). Elle peut atteindre les 7g/l de résidus secs (Khadraoui, 2006).

6.3. La nappe phréatique

Cette nappe est contenue dans les alluvions de la vallée de l'Oued Mya. Elle couvre pratiquement toute la cuvette de Ouargla. Sa profondeur varie de 1 à 8 m selon les lieux et la saison. C'est une source cruciale pour l'irrigation dans les palmeraies (Rouvillos-Brigol, 1975). Cette nappe est essentiellement alimentée, par les eaux de drainage de la palmeraie et par les eaux résiduaires urbaines, les eaux des sources, les précipitations, etc. Le sens de l'écoulement des eaux de la nappe phréatique suit celui de la nappe du Complexe Terminal, c'est-à-dire du Sud vers le Nord (Guendouz *et al.*, 1992). Les eaux des nappes phréatiques très salées avec plus de 4 à 5 g/l de résidus secs et bien souvent trois fois plus (Dubost et Mogdatt, 2002).

II. Facteurs biotiques

Les milieux sahariens sont des milieux fragiles, où les populations animales et végétales sont sujettes à des variations brutales, en extension et en nombre. D'après Boudy (1952), la répartition géographique des végétaux et des animaux et la dynamique des processus biologiques sont foncièrement conditionnées par le climat. En effet, le rythme de développement des populations animales et végétales dans ces milieux est aléatoire, et étroitement dépendant des précipitations. Toutefois, le Sahara malgré, l'aridité du climat, présente une grande biodiversité qui semble être adaptée aux conditions climatiques extrêmes.

À l'instar du reste du Sahara, la flore et la faune de la région de Ouargla s'explique par l'histoire climatique. Les limites de cette région sont en deçà des isohyètes 100 à 130 mm et se confondent avec celles du désert, c'est-à-dire avec celles du territoire caractérisé par un appauvrissement considérable de sa biocénose (Senoussi, 1999).

1. Flore (Végétation)

La végétation du Sahara est le plus fidèle témoin du climat (Gardi, 1973). Les conditions désertiques extrêmes font que le couvert végétal est très clairsemé, avec un aspect en général discontinu et très irrégulier (Ozenda, 1991).

En association avec cette végétation naturelle, il faut signaler, la présence d'une espèce cultivée depuis des milliers d'années au niveau des oasis et des zones cultivées et qui s'adapte bien aux conditions climatiques, édaphiques et hydriques de la région. Il s'agit, du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*). Ce dernier constitue l'élément fondamental de l'écosystème oasien. Sa culture tient une grande place dans l'agriculture saharienne avec ses valeurs économique, écologique et sociale.

Néanmoins, l'expansion de ses zones de croissance génère de plus en plus de la biomasse, partiellement utilisée (Régimes, dattes blessées, pétiole, etc.), qui constitue un déchet encombrant, devenant une source de maladies compromettant à la fois l'environnement et la production de dattes.

D'après Romani *et al.* (2007) et Oustani (2011), ces résidus peuvent être valorisés comme fertilisant organique, ce qui réduit les coûts de leur élimination et constitue une stratégie visant à améliorer le statut organique des sols sableux.

2. Faune

Le nombre d'espèces qu'un désert peut abriter par unité de surface est relativement faible, mais y reste une variété surprenante d'animaux adaptés aux conditions désertiques (Catalisano, 1986 ; Le Berre, 1990). Cette richesse est conditionnée par les contraintes climatiques de l'environnement et par la disponibilité des ressources offertes (Le Berre, 1990).



Photo 1. Résidus végétaux abandonnés dans les palmeraies de la région de Ouargla (Oustani, 2009)

3. Microflore (Microorganismes du sol)

Historique et généralités

Le sol dans les régions arides est suivant l'opinion classique, caractérisé par l'absence ou l'extrême réduction de toute activité microbienne. D'après Sasson (1967), c'est en 1912 que Lipman, a publié ses premiers résultats concernant l'importance de la microbiologie des sols des terres arides. Par la suite, Killian et Feher (1939), ont constaté que malgré l'humidité extrêmement basse, les sols désertiques, autrefois considérés comme stériles, renferment des microorganismes à l'état de vie active. Ces sols sahariens représentent des écosystèmes assez particuliers, pouvant abriter une microflore adaptée aux conditions difficiles qui sévissent dans les régions arides (Zitouni, 1995 ; Moustfaoui et al. ,1998).

Composition

Les microbiocénoses des sols des régions arides présentent une importance variable suivant les biotopes. Elles comprennent :

➤ **Des Bactéries, parmi lesquelles prédominent :**

Des actinomycètes et des germes bacilles sporulés, en fait les sols sahariens, bien que soumis à un climat aride, révélés être riches en actinomycètes y compris des genres peu fréquemment ou rarement isolés dans le monde (Zitouni, 1995 ; Moustfaoui, 1998). D'après les mêmes auteurs, les genres : *Nocardioopsis*, *Actinomadura*, *Microtetraspora*, *Saccharothrix*, *Streptosporangium*, *Spirillospora* et surtout ; *Planomnospora* (rare dans le monde), sont présents en quantité appréciable dans les sols sahariens. Ces résultats montrent que les sols sahariens constituent un potentiel assez riche en actinomycètes, qui peut contenir des taxons rares ou même originaux. Les Bactéries fixatrices de l'azote atmosphérique aérobies (*Azotobacter*) et anaérobies (*Clostridium*), sont relativement rares en milieu désertique et ne se prolifèrent que dans les biotopes les plus favorisés tant sur le plan de l'humidité que sur celui de l'offre de matière organique.

➤ **Des champignons, dont la résistance à la sécheresse a été maintes fois soulignée.** Les champignons semblent plus résistants que les bactéries aux conditions de faibles humidités. Les genres *Penicillium* et *Aspergillus* représentent un pourcentage important de la microflore fongique désertique.

➤ **Des algues, dont la présence est caractéristique de faible évolution pédologique des milieux colonisés.** Ils constituent ainsi, le stade initial de la végétation des roches et des sols minéraux infertiles : terrains salés, déserts, sols dégradés. Leur abondance a été mise en évidence, même pendant la sécheresse estivale et dans des échantillons prélevés entre 10 à 15 centimètres de profondeur (les chlorophycées prédominent en raison de leurs facultés de produire des spores) (Sasson, 1967).

Densité et biodiversité

Rivkind (1929), a signalé que dans les sols sahariens, la microflore totale variait entre 12 et 22. 10⁷ de germes par g de terre dans les sols cultivés, alors qu'elle n'était que de 2,8 10⁷ germes par gr de terre dans les sols incultes. D'après Dommergues et Mangenot (1970), les densités bactériennes sont faibles mais, elles tombent rarement en dessous de 10⁴ à 10⁵ germes par g de sol sec dans les horizons superficiels. Au sujet de la biodiversité de microflore désertique, Killian et Feher (1939) sont arrivés à isoler 98 espèces de Bactéries, 28 espèces de Champignons et 84 espèces d'Algues.

Problématique (Destruction du potentiel de fertilité du sol en milieu aride)

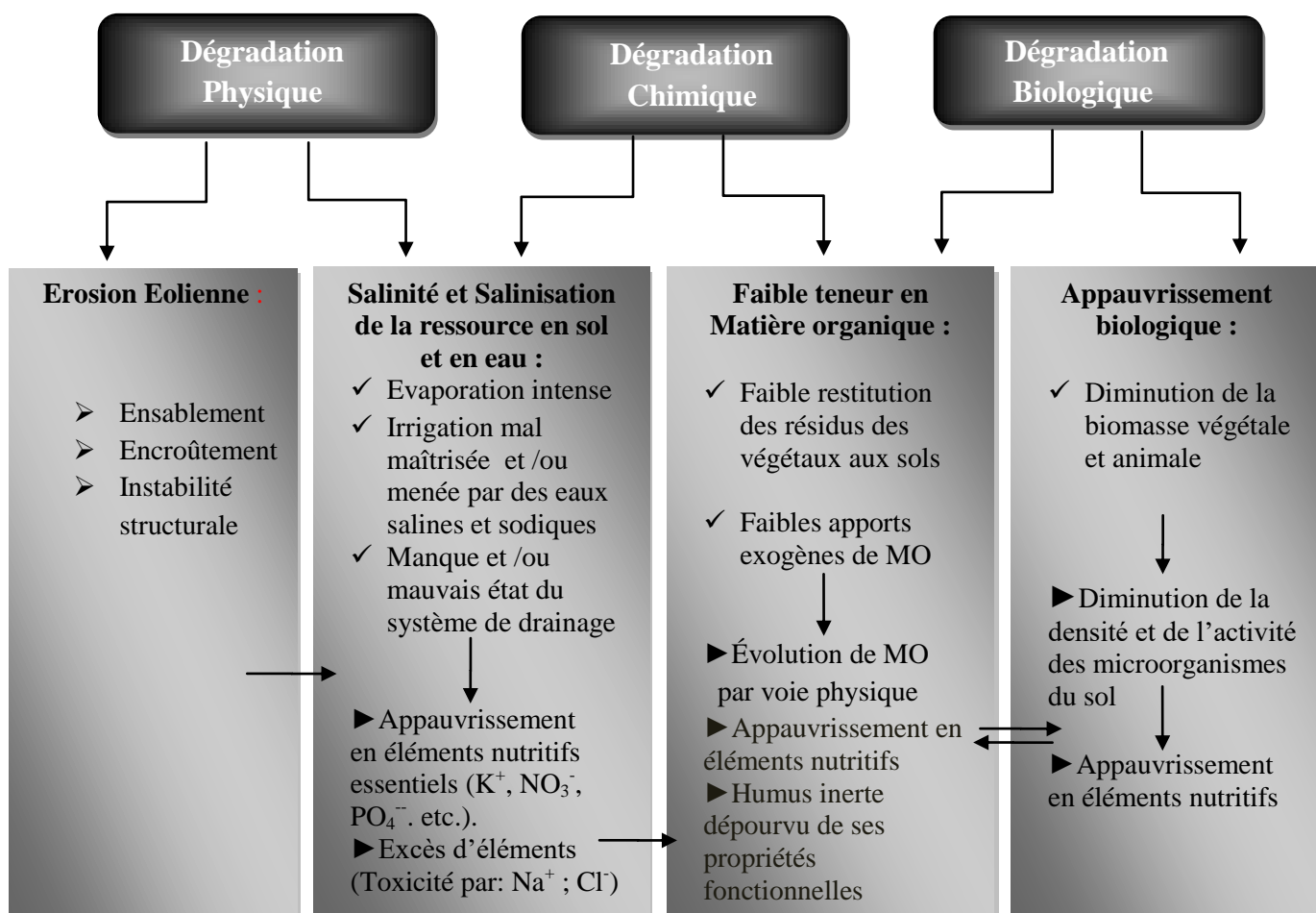
L'écosystème édaphique dans les zones arides, plus particulièrement dans les zones sahariennes se caractérise par un équilibre délicat et très fragile. Selon Garcia (2000); Albaladejo *et al.* (2000); Lal (2004), le sol est l'élément de l'environnement dont la destruction est souvent irréversible. La dégradation des ressources en sol dans ces régions extrêmes résulte des effets synergiques du climat, de l'agressivité de certaines conditions naturelles et des activités humaines exercées sur les sols. Dans ces zones, les sols posent d'énormes problèmes de mise en valeur. Ils sont caractérisés par un faible potentiel de fertilité (faible taux de matière organique, érosion éolienne, diminution de l'épaisseur du sol, salinisation, etc.). Ils présentent souvent des croûtes calcaires ou gypseuses et sont dans la plupart des cas, sujets à l'érosion éolienne (Aubert, 1960).

Du point de vue agronomique, les sols possèdent des propriétés physiques, chimiques et biologiques défavorables à la croissance des végétaux. Ils sont généralement caractérisés par une fraction minérale constituée dans la quasi totalité de sable avec une structure particulière expliquant la faible cohésion entre les particules du sol (Halilat et Tesier, 2006). Le pourcentage d'argile est très faible et ne dépasse pas en général 10 %, et même s'il existe par endroit, il se trouve à l'état dispersé à cause de l'abondance de sodium dans la garniture ionique du complexe argilo-humique (Daoud et Halitim, 1994).

Ces sols sont caractérisés également par un faible taux de matière organique. Par conséquent, leur complexe adsorbant est réduit à cause de leur faibles taux en colloïdes minéraux et organiques). Ils sont caractérisés par des pH alcalins, une forte salinité et une faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs, expliquant la faible activité biologique régnant dans ces sols.

I. Principaux types de dégradation du sol en milieu aride

Les différents processus de dégradation des sols dans les régions arides sahariennes peuvent être groupés en trois différents types de dégradation: physique, chimique et biologique. Mais, il existe des connections étroites entre ces processus (Fig 1).



✓ Cause ; ▶ Conséquence

Figure 1. Principaux types de dégradation du sol en zones arides

1. Dégradation physique

Les zones sahariennes sont affectées par l'érosion éolienne qui constitue le phénomène de dégradation le plus typique dans ces régions. Il s'agit plus d'un facteur géomorphologique que pédologique, mais ses conséquences se répercutent sur le plan pédologique (Halitim, 1988).

En effet, l'érosion éolienne se traduit par de principaux changements dans la texture des sols et dans leur potentiel de fertilité, de processus de déflation et de vannage sélectif, de

disparition des horizons superficiels les plus propices à la végétation, et l'apparition en surface des encroûtements stériles et/ou le développement de voiles sableux.

Les croûtes sont surtout formées de calcaire, et celles d'origine gypseuse s'opposent à la végétation et aux cultures par leur extension, leur continuité et leur forte induration (Dutil, 1971; Halitim et Robert, 1992). Par ailleurs, la fraction minérale, par suite de ce phénomène, est formée dans sa quasi-totalité, de sables. Ces derniers recouvrent de grandes étendues dans ces régions et sont faiblement fertiles. Ils sont caractérisés par une absence de plasticité et d'une grande sensibilité à l'érosion éolienne. Leur stabilité structurale est médiocre et les processus d'érosion sont fréquents (Halitim, 1988). De plus, ces sols peuvent subir une forte dégradation due à l'insuffisance de couverts végétaux, les rendant ainsi très vulnérables à l'agressivité des conditions climatiques.

D'après Chotte *et al.* (2002), bien que les sols sableux soient pauvres, leur fertilité peut être améliorée, si on y crée une activité biologique intense. Un amendement organique permettrait dans beaucoup de cas, d'accroître l'emménagement de l'eau, la rétention en éléments minéraux et par conséquent, la récupération des terres auparavant considérées impropres aux cultures (Blanchart *et al.*, 2007).

2. Dégradation physico - chimique

2.1. Salinité et salinisation des ressources sol et eau

Dans les régions arides et plus particulièrement dans les zones sahariennes, l'agriculture évolue dans un contexte particulièrement sévère où toutes les mesures d'intensification et d'extension sont conditionnées par ce milieu aux caractéristiques extrêmes. À titre d'exemple, les conditions climatiques, et en particulier l'ETP (Evapotranspiration potentielle), expliquent l'intensité de l'évaporation et les besoins en eau élevés des cultures. Ceci entraîne des risques de salinisation par concentration des solutions salines.

Le processus de salinisation et de sodisation des sols est l'un des principaux facteurs limitant la croissance et la production agricole, en raison de la diminution de la pression osmotique dans le sol et de l'augmentation de la concentration de certains ions, atteignant un niveau toxique pour la plante. Les fortes concentrations en NaCl provoquent deux stress à l'égard des plantes: un stress osmotique lié à la diminution du potentiel hydrique du sol et un stress ionique lié à la toxicité des ions Na^+ et Cl^- .

Par conséquent, les propriétés physiques, chimiques, et biologiques se dégradent, devenant néfastes pour les cultures.

Ainsi, le processus de salinisation du sol, à court ou à long terme, engendre un processus de sécheresse et on ne peut concevoir une étude complète des effets de la salinité sans tenir compte de la composante eau d'irrigation. L'extension de l'agriculture irriguée et l'utilisation des eaux saumâtres souterraines pour l'irrigation, combinées à une forte évaporation dans les régions arides, conduisent inévitablement à la salinisation des sols et des nappes d'eau (Radhouane, 2008). Dans de nombreuses régions arides, et en particulier au Sud de l'Algérie, cette situation est aggravée par la raréfaction des ressources en eau douce suite aux faibles précipitations caractérisant ces régions. En effet, les eaux saumâtres constituent la majorité des eaux souterraines (Daoud et Halitim, 1994).

Cette situation constitue une menace permanente pour les plantes qui se trouvent de ce fait, diminuées de leur capacité d'absorber l'eau.

Face à ce problème de pénurie de ressources en eau douce, l'utilisation des eaux salines et sodiques pour l'irrigation des terres agricoles est obligatoire dans les régions arides (Ayers et Westcot, 1985; Jalali et Merrikhpour, 2008).

Néanmoins, la disponibilité des ressources d'eau souterraines, même si elle constitue un espoir pour les régions arides pour combler le déficit hydrique pluviométrique, se traduit souvent par un risque d'augmentation de la salinité des sols. C'est ainsi qu'au Sud de l'Algérie, la salinisation secondaire à la suite de l'irrigation avec des eaux fortement minéralisées entraîne l'extension de la salure dans de nombreux périmètres irrigués (Daoud et Halitim, 1994; Halitim, 2011).



Photo 2. Etat de salinisation d'une palmeraie (A) et d'un champ de pomme de terre (B) irrigués par des eaux saumâtres

L'utilisation de ces eaux salines en agriculture se heurte à plusieurs difficultés, en particulier au degré de tolérance des espèces cultivées au sel, qui sont pour la plupart des glycophytes sensibles (Mâas, 1986).

La photo 2 présente un état de salinisation d'une palmeraie et d'un champ de pomme de terre irrigués par des eaux saumâtres.

Enfin, étant donné que l'eau salée est fréquemment la seule eau disponible dans ces régions, il devient nécessaire d'accepter ses limitations et de l'utiliser raisonnablement. La valorisation des eaux salées reste l'une des préoccupations les plus importantes dans les régions arides.

D'après Bauder et Brock (2001), Hamdy (2002) et Mace et Amrhein (2001), les eaux salées peuvent être utilisées en irrigation sur certains sols, si des pratiques de gestion adéquates sont appliquées.

2.2. Déficit en matière organique

La matière organique constitue un substrat indispensable à la vie biologique des sols, du fait qu'elle est la source majeure de carbone, d'énergie et d'éléments nutritifs pour les microorganismes et les plantes. Son rôle est important dans les propriétés chimiques et physiques du sol. Un faible taux de matière organique s'accompagne généralement par la destruction des propriétés du sol sur le triple plan bio-physico-chimique.

Malheureusement, dans les régions désertiques, la fraction organique est très faible, généralement inférieure à 1% (Halitim, 1988 ; Robert, 1996). La combinaison des facteurs pédoclimatiques spécifiques dans ces régions (Températures élevées, humidité faible, fort potentiel d'oxydation, texture grossière, etc.) font que la minéralisation de la matière organique est très intense, ce qui est en relation avec un bilan humique généralement déficitaire. En effet, l'accumulation de la matière organique semble dépendre à la fois des conditions climatiques (la végétation étant une fonction directe de la pluviométrie) et des caractéristiques texturales du sol.

Paradoxalement à la minéralisation qui se trouve très favorisée par les conditions pédoclimatiques, l'humification est fortement inhibée, que ce soit, sur le plan quantitatif par le manque d'accumulation de la matière organique, ou sur le plan qualitatif par le blocage de la polymérisation des composés humiques formés.

La dégradation du tapis végétal à cause des contraintes naturelles, dont les plus marquantes sont la sécheresse et la salinisation des sols, a pour conséquence une production de matière organique bien plus faible que dans les régions humides (Rahmoune *et al.*, 2008).

Il paraît évident que sous les conditions climatiques sahariennes, un sol sableux, très pauvre chimiquement, l'accumulation de la matière organique sous une forme stable ne peut être qu'infime, et on ne s'étonnera pas des valeurs obtenues en ce qui concerne les fractions acides humiques et de l'humine, surtout des taux trop faibles d'indice de polymérisation. La nature sableuse des sols et leur pauvreté en éléments fins, limitent les surfaces minérales d'absorption et de stabilisation des composés organiques. Dans ces sols sableux, la perte de la matière organique est très importante, du fait qu'ils sont trop aérés et que la matière organique s'y décompose plus facilement. Ils renferment moins d'argile et sont alors moins protégés, ce qui pourrait induire une déprotection physique de cette matière organique (Feller et Beare, 1997).

D'après Duchaufour (1985), en sols sableux, si les conditions pédoclimatiques sont favorables à la minéralisation primaire, un niveau de productivité élevé, après restitution d'amendement organique, peut être éphémère et il ne restera qu'une matière organique squelettique privée de ses groupements fonctionnels actifs, aussi bien carbonés qu'azotés. Ainsi, malgré un bilan humique relativement élevé, la présence de cette matière organique n'aura aucune signification sur le plan de fertilité du sol.

D'autre part, l'ambiance chimique, très complexe des sols sahariens, notamment la présence des sels à différentes solubilités, sous forme de gypse, de calcaire et d'autres sels plus solubles, induit une évolution particulière de la matière organique.

D'après Sarag (1980), l'évolution de la matière organique dans les sols des zones arides (Présence de calcaire, gypse et sels) est caractérisée par une nette dominance de la fraction extractible d'acides fulviques, avec un rapport AF/AH toujours supérieur à 1, traduisant une faible polymérisation des composés humiques formés (Duchaufour, 1980 ; Gallali, 1980). Les processus de polycondensation physico-chimique n'offrent que de maigres possibilités d'humification par insolubilisation et de néo-synthèse et en revanche favorise l'humification par héritage et la dominance de l'humine résiduelle (Héritée).

Du point de vue agronomique, ceci peut expliquer une raison importante de la fragilité de la structure des sols salés, car la faible teneur de la couche arable de ces sols en composés humiques polycondensés, empêche la formation des agrégats stables. Par conséquent, la structure reste précaire. La figure 2 synthétise le scénario d'évolution de la MO dans les sols sahariens.

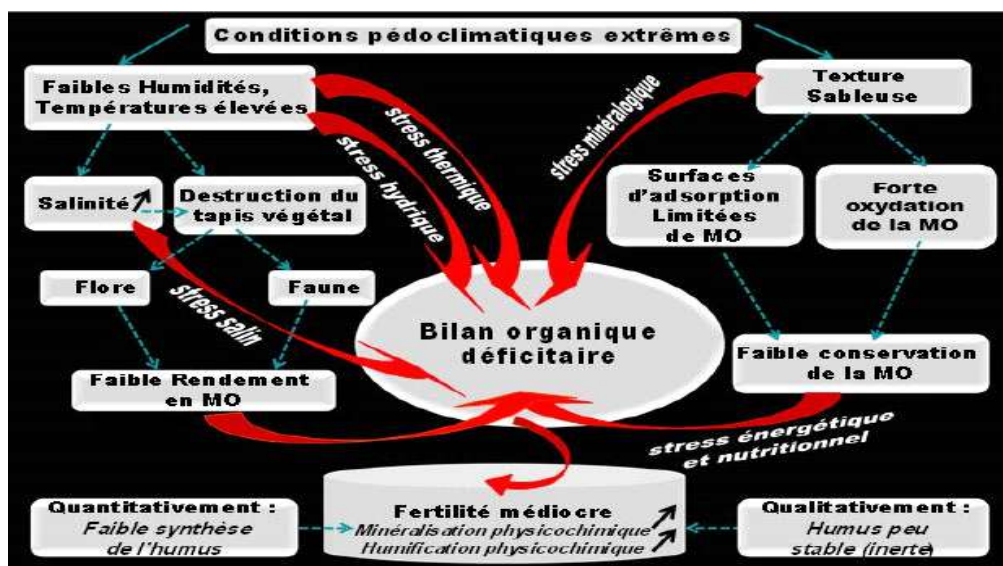


Figure 2. Problématique de l'évolution de la matière organique dans les zones sahariennes (Oustani, 2006)

3. Dégradation biologique microbiologique du sol

En conditions arides, le sol constitue un biotope à haut pouvoir contraignant à l'égard des micro-organismes qui le peuplent. En effet, les fortes températures, les faibles humidités, la texture sableuse, la forte salinité et la faible teneur en éléments nutritifs influent négativement sur la biomasse végétale et animale et par conséquent, sur l'abondance et l'activité des microorganismes.

Le faible nombre de microorganismes enregistré dans les sols des zones arides n'est pas la conséquence d'une baisse de diversité par rapport aux sols classiques, mais plutôt d'une baisse dans les effectifs des espèces microbiennes, attribuée à la faible teneur en matière organique (Zombre, 2006).

Toutefois, si le potentiel d'activité biologique du sol en zone aride dépend de l'apport organique avec lequel il est en étroite corrélation (Dianou et Thiombian, 1999), il est en retour en fonction des caractéristiques physico-chimiques intrinsèques de celui-ci.

Dans ce cadre, la salinité a été signalée comme un important facteur stressant l'environnement des microorganismes du sol aride (Sardinha *et al.*, 2003).

Il paraît qu'en réponse aux fortes concentrations en sels, il se développe au sein de la microflore tellurique des particularités qui réduisent l'activité microbiologique dont dépend la biodégradation des matières organiques (Domergues et Mangenot, 1970 ; Zahran *et al.*, 1992; 1996; Batra et Manna, 1997 ; Rietz et Haynes, 2003 ; Sardinha *et al.*, 2003).

II. Action anthropique

Si les facteurs écologiques peuvent prendre une certaine part dans la destruction de la qualité du sol, il est clair que l'homme prend la part la plus importante dans la destruction de son environnement, en particulier dans les zones arides, où l'accroissement actuel de la pression exercée par les activités humaines sur un milieu naturellement dégradé, sont et seront les principales causes des dégradations des ressources en sols et en eaux déjà limitées.

Parmi les principales menaces pesant sur les milieux arides conduisant à la restriction de la vie des organismes vivants (Faune et flore), l'appauvrissement de la diversité biologique et la destruction de la fertilité des sols, citons, les pratiques non durables d'utilisation des sols (tels que l'irrigation mal contrôlée par des eaux chargées en sels, l'utilisation abusive des intrants agrochimiques, les faibles apports organiques exogènes aux sols), la pollution, l'urbanisation, etc.).

III. Conclusion première partie

La dégradation des sols dans les zones arides est liée classiquement à deux facteurs : les conditions écologiques extrêmes et les activités anthropiques qui concourent indirectement à amplifier l'état dégradé de ces sols.

Par ailleurs, il est à signaler que la dégradation du sol par les fortes concentrations en sels est souvent associée à la dégradation de la ressource en eau. Ce qui impose une réflexion sur les orientations à entreprendre pour atténuer ce phénomène et d'asseoir une stratégie de développement durable des ressources naturelles dans ces régions dans le but de sauvegarder la fertilité des sols, de maîtriser la fertilisation des plantes et de bien gérer les ressources hydriques disponibles.

Plusieurs approches agronomiques sont possibles pour la mise en valeur et la réhabilitation de ces terrains dégradés. Dans ce cadre, l'utilisation des apports organiques exogènes est une pratique largement recommandée pour remédier à ces problèmes liés à la salinisation des sols et à la ressource d'eau. Néanmoins, le maintien d'un taux optimum de matière organique dans les sols impose des apports raisonnables, provenant traditionnellement des résidus de récolte et de l'incorporation de la matière d'origine animale ou urbaine sous forme d'apport exogène. À ce titre, une gamme diversifiée de produits organiques peut être utilisée par les agriculteurs pour la mise en valeur de ces sols dégradés. Toutefois, il est nécessaire de les caractériser et d'apprécier leur valeur agronomique (Valeur fertilisante et valeur amendante) avant leur épandage sur les sols salés.

Les matières organiques ont une grande réactivité qui leur confère un certain nombre de fonctions de première importance en particulier dans les agro-systèmes où elles constituent une composante importante de la fertilité du sol. En effet, sur le plan pédologique, les matières organiques exercent une action profonde aussi bien à l'état frais qu'à l'état d'humus stabilisé. Si leur action est différente suivant leur degré d'évolution, elles existent normalement dans les sols à tous les états (Duchaufour, 1980). L'apport de matière organique exogène au sol sous forme d'amendements ou d'engrais permet d'augmenter et de maintenir le stock organique du sol. Cette restauration de la qualité du sol est généralement associée à un changement des caractéristiques physiques et physico-chimiques et une stimulation de l'activité biologique (Thuries *et al.*, 2000 ; Annabi, 2009).

L'objectif de cette partie de ce travail s'inscrit dans le contexte scientifique de la compréhension des dynamiques d'évolution de différents produits organiques appartenant à deux familles différentes (résidus des végétaux et effluents d'élevage) en fonction de la dynamique de décomposition de leurs composés carbonés et azotés, et dans le contexte technique de la définition de produits utilisables par les agriculteurs pour améliorer la qualité physique, chimique et microbiologique de leurs sols notamment en conditions salines.

Cette partie se propose ainsi, d'évaluer les effets de cinq produits organiques (Quatre types de fumier et un résidu végétal) sur certaines propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol salé. Le premier chapitre est réservé à la caractérisation analytique initiale des produits organiques avant l'apport au sol, alors que, les deux autres chapitres sont réservés par l'adoption de deux dispositifs expérimentaux à l'effet de ces produits sur certaines propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques des sols salés :

- *Un dispositif expérimental en conditions semi contrôlées (pour l'étude de l'effet des produits organiques sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés).*
- *Un dispositif expérimental en conditions contrôlées (pour l'étude de l'effet des produits organiques sur les propriétés microbiologiques des sols salés).*

Il est à mentionner que l'apport organique aux sols pour les deux dispositifs a été dicté en références aux nombreuses études, dont la plupart s'accorde sur l'existence d'une relation linéaire entre la texture du sol (Plus particulièrement le pourcentage d'argile) et la teneur en matière organique (Carter et Chareau, 1975 ; Mallouhi et Jacquin, 1986). Ainsi, les échantillons de sol pour les deux dispositifs ont été rapportés à un niveau organique jugé souhaitable (Sous forme d'apport organique). D'après le graphique établi par l'INRA (Soltner, 2003), ce niveau correspond à une dose de 3 % (Annexe II.1).

Caractérisation physique, physico-chimique et biochimique des produits organiques : *Estimation de la valeur agronomique (Valeur fertilisante et amendante)*

Résumé

Les sous-produits organiques issus de l'élevage et des résidus des végétaux représentent une source de matière organique (MO) importante, mais dont la valeur agronomique reste encore difficile à évaluer avec précision à cause de la grande variabilité dans la composition de ces produits. Par ailleurs, les éléments nutritifs contenus dans ces produits sont présents sous différentes formes, minérales et organiques, disponibles pour les cultures dans des délais très variables en fonction de leur nature biochimique de chaque produit. La présente étude vise à déterminer la valeur agronomique (Valeur fertilisante et amendante) de cinq types de produits organiques : fumier de volailles (FV), fumier bovins (FB), fumier caprins (FC), fumier dromadaire (FD) et résidus de palmier dattier (RPD). La valeur fertilisante a été estimée par la détermination de la teneur de ces produits en éléments fertilisants majeurs et par l'utilisation des coefficients équivalents engrais. Alors que la valeur amendante a été déterminée par le rapport C/N, la caractérisation biochimique de la matière organique (CBM), ainsi que, par le fractionnement des composés humiques. Les résultats obtenus montrent une nette richesse de fumier de volailles (FV) en éléments fertilisants par rapport aux autres produits. Les teneurs enregistrées par ce fumier sont de 2.9, 3.31, 3.48, 5.73 et 0.71% respectivement pour N_{total} , K_2O , P_2O_5 , CaO et MgO . Par ailleurs, l'innocuité des produits testés a été vérifiée, en terme de teneurs en éléments traces métalliques (ETM) qui sont pour l'ensemble des produits testés en dessous des limites admissibles par l'AFNOR (Norme NF U44-051). En revanche, les résultats issus de la caractérisation biochimique des produits organiques ont montré des teneurs en cellulose et en lignine quoique variables d'un produit à l'autre, mais nettement supérieures à celles enregistrées par le fumier de volailles (FV). Les teneurs obtenues pour ces deux composés sont (26.75 et 7.05%), (38.86 et 9.52%), (37.98 et 9.93%), (31.7 et 8.8%) et (46.32 et 14.12%) respectivement pour FV, FB, FC, FD et RPD. Par ailleurs, le degré de stabilité des produits testés a été appréciée par la détermination des rapports C/N et AH/AF. Les résultats obtenus pour ces deux ratios sont (10.16 et 0.54), (32.34 et 0.91), (34.19 et 0.92), (24.7 et 0.73) et (56.74 et 0.64) respectivement pour le FV, FB, FC, FD et les résidus de palmier dattier (RDP). En comparaison aux autres produits organiques, les résidus de palmier dattier (RDP) ont enregistré les plus faibles teneurs en éléments fertilisants, toutefois, ce produit semble être plus riche en MO. Les résultats obtenus montrent l'importance de fonder des recommandations agronomiques sur une analyse précise de la valeur fertilisante et amendante de chaque type de produit organique avant son épandage dans le sol.

Mots clés : Fumier, Résidus de palmier dattier, Valeur fertilisante, Valeur amendante, Coefficient équivalent engrais, C/N, AH/AF, Cellulose, Lignine.

I. Introduction

La baisse de la productivité des terres dans la plupart des sols dans les pays en voie de développement, notamment ceux situés en milieu aride est le résultat des mauvaises pratiques de gestion des terres entraînant l'épuisement des sols (FAO, 2009). Dans ces régions, les terres agricoles sont perdues en raison de leurs mauvaises exploitations engendrant des pertes

annuelles de la couche arable en N, P et K. Ces pratiques ont amené certains auteurs à qualifier l'agriculture de ces pays « d'agriculture minière » car dans ces systèmes d'exploitations, les sorties dépassent les entrées (Pieri, 1989 ; Halitim, 2011).

La FAO estime qu'il faut augmenter la production agricole pour parer à une crise alimentaire et à une famine dans ces régions. Néanmoins, l'augmentation de cette dernière passe obligatoirement par l'intensification des cultures, ce qui est généralement accompagnée par l'exportation d'énormes quantités en éléments nutritifs par les plantes. En revanche, le recours à la compensation des éléments exportés est faible, voire absente dans ces régions. Cette situation conduit à un appauvrissement continu des sols en éléments nutritifs affectant davantage la fertilité du sol (Cheverry, 1994).

Pour pallier à la dégradation de la fertilité des sols en matière de l'insuffisance des nutriments pour les plantes, les agriculteurs ont recours, de manière empirique, à des apports de fertilisants qui jouent un rôle important dans l'amélioration et le maintien de la fertilité des sols.

Dans ce cadre, la fumure minérale (Engrais) a été longtemps considérée comme la première solution à cette préoccupation. L'accès facile aux engrais de synthèse conduit à une diminution spectaculaire de l'utilisation des engrais de ferme. Toutefois, si l'usage des engrais minéraux est une pratique importante pour l'augmentation des rendements des cultures, leur coût élevé limite leur utilisation par les agriculteurs (Bockman *et al.*, 1990). En outre, l'utilisation quasi-exclusive des engrais minéraux dans la mise en culture des sols est suivie généralement par un processus de salinisation du sol, conduisant ainsi à une dégradation rapide de la fertilité (Zougmoré *et al.*, 2004).

Par ailleurs, les récentes préoccupations sur les effets néfastes des engrais sur l'environnement, ont rendu urgent le développement d'une approche rationnelle pour s'orienter vers d'autres sources d'éléments nutritifs pour les plantes. La méthode alternative largement acceptée par les agriculteurs est l'utilisation des apports organiques.

Comparés aux engrais chimiques, les fertilisants organiques sont des engrais complets. À la fois engrais et amendement, les produits organiques ont des effets bénéfiques sur la fertilité et l'équilibre des sols (Mustin, 1987). En plus, la fertilisation minérale à elle seule ne suffit pas. Elle ne fait que compenser les exportations en éléments. Son efficacité dépend de l'importance du complexe argilo-humique, d'où le rôle fondamental des apports organiques aux sols.

Les épandages réguliers en apports organiques améliorent la capacité de rétention du sol en eau et en éléments nutritifs et rendent les cultures moins vulnérables aux conditions extrêmes, comme le stress salin et hydrique (Rahmoune, 2008). En revanche, la suppression de ces apports occasionne des pertes significatives des stocks organiques des sols, accentuant de plus en plus, le processus de la détérioration de la qualité du sol, surtout si aucune mesure de substitution n'est prise (Vullioud *et al.*, 2006 ; Maltas *et al.*, 2011).

Par ailleurs, si la fertilisation minérale est de mieux en mieux connue, il n'en est pas de même concernant la fertilisation organique.

Les recherches entreprises sur ce thème sont peu nombreuses et encore insuffisantes pour pouvoir en tirer des conseils pratiques.

La valeur fertilisante des produits organiques a été longtemps négligée dans les calculs de fumure. Ils ont été souvent considérés exclusivement comme des amendements de qualité, dont l'apport en éléments fertilisants n'est pas bien mesuré, bien que leur utilité ait toujours été reconnue par les agriculteurs pour améliorer les sols (Gueydon, 1992). Parmi les raisons expliquant cette lacune, on invoque la composition très variable de ces produits, que ce soit pour les effluents d'élevage (Gros, 1997; Grissa *et al.*, 2000 ; Chadwick *et al.*, 2000 ; Azeez *et al.*, 2009) ou pour les résidus des végétaux (Jarrige *et al.*, 1995 ; Mafongoya *et al.*, 1997 ; Reyes *et al.*, 2003 ; Sall, 2004).

Il s'agit donc de mauvaises raisons qui encore trop souvent jusqu'à présent ont entraîné un manque de confiance vis-à-vis des engrais de ferme et ont conduit à une absence de comptabilisation de leur valeur fertilisante. Toutefois, les compositions moyennes sont connues (Chabalier *et al.*, 2006).

Pour tout produit organique apporté aux sols, les éléments nutritifs sont présents sous forme minérale et /ou organique. Seule une fraction est utilisable par les plantes et constitue l'effet direct de l'apport. Un arrière effet existe, il correspond à la fraction organique minéralisée de façon plus lente. Il est très dépendant de la qualité biochimique de l'apport organique, des caractéristiques du sol (Type de sol, facteurs physico-chimiques, facteurs biologiques, pratiques culturales) et de la fréquence des apports (Annabi, 2004).

Dans ce cadre, la connaissance de la composition physico-chimique et biochimique des produits organiques avant leur application aux sols semble être une étape obligatoire à la fois

pour optimiser la fertilisation organique et pour préserver la qualité de l'environnement. En effet, les produits organiques peuvent contenir des métaux toxiques qui, lorsqu'ils sont appliqués aux sols peuvent s'accumuler dans les plantes, produisant des effets nocifs, s'ils sont recyclés à travers la chaîne alimentaire (Bradford *et al.*, 1975). De ce fait, la connaissance de la valeur agronomique de ces produits et leur innocuité environnementale est d'autant plus importante lorsqu'il s'agit des sols des régions arides reconnus par la fragilité de leur écosystème, et par leur grande vulnérabilité à la dégradation.

Ces sols sont squelettiques et le stock organique est faiblement accumulé en raison de la forte minéralisation, qui n'est pas généralement compensée par des restitutions organiques adéquates et bien maîtrisées. D'où l'importance de la caractérisation des produits organiques. Ce genre d'information est nécessaire dans l'objectif de bien maîtriser la fertilisation organique des sols dans ces régions.

Devant la limitation des ressources organiques dans le contexte aride notamment saharien, et afin de répondre à la durabilité des systèmes de cultures dans ce milieu dégradé, les agriculteurs doivent développer diverses techniques pour augmenter la production agricole, y compris l'utilisation des ressources locales notamment les résidus de palmier dattier dans les programmes de fertilisation. L'utilisation de ces derniers s'intègre parfaitement dans une stratégie visant à améliorer le statut organique des sols sableux (Romani *et al.*, 2007 ; Oustani, 2011).

Par ailleurs, face à cette méconnaissance des facteurs de détermination de la valeur fertilisante et amendante des produits organiques susceptibles d'être utilisés comme fertilisants au sol, il nous a paru important de réaliser cette étude qui vise comme objectif principal d'apprécier la valeur agronomique (Valeur fertilisante et amendante) de cinq produits organiques : fumier de volailles, fumier caprin, fumier bovins, fumier dromadaire et les résidus du palmier dattier.

II. Matériel et méthodes

Pour pouvoir interpréter les effets des produits organiques utilisés sur les propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol, une caractérisation détaillée des produits organiques sélectionnés a été réalisée.

1. Produits organiques utilisés

Quatre types de fumier et un résidu végétal ont été caractérisés dans le cadre de cette étude (Photo 1) :

1.1.Fumier de volailles

Le fumier de volailles est issu d'un élevage de poulet de chair. Il est composé d'un mélange de fientes et de copeaux de bois.

1.2.Fumier de bovins

Le fumier bovin est composé d'un mélange de déjections et de paille, issu d'un élevage en semi intensif destiné à la production de viande. Ce fumier démunie de pailles se présente sous forme d'agglomérats.

1.3 Fumier de caprins

Il s'agit d'un fumier issu d'un élevage de caprins en semi intensif destiné à la production de viande. C'est un fumier composé d'un mélange de paille et de déjections de caprins.

1.4. Fumier de dromadaire

Il s'agit de crottes de dromadaire collectées à partir d'élevage camelin menu à l'extensif.

1.5. Résidus de palmier dattier

Ce sont des sous produits secs du palmier dattier « Variété Deglet noir » (Palmes sèches, rachis 'cornaf', fibrillum 'lif', régimes, etc.).

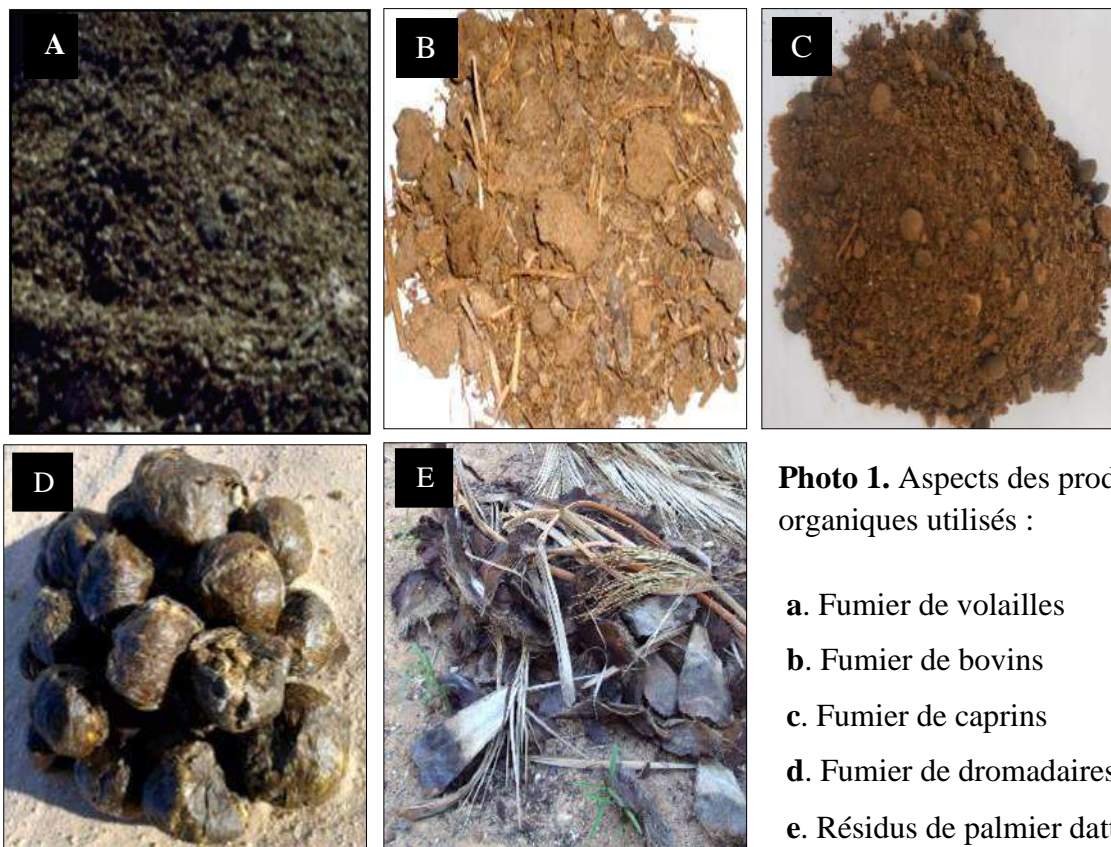


Photo 1. Aspects des produits organiques utilisés :

- a. Fumier de volailles
- b. Fumier de bovins
- c. Fumier de caprins
- d. Fumier de dromadaires
- e. Résidus de palmier dattier.

2. Protocole d'échantillonnage

2.1. Prélèvement des échantillons des produits organiques

Comme l'échantillon du produit organique à soumettre au laboratoire doit représenter celui qui sera épandu sur le champ, les prélèvements ont été effectués en prenant en considération toutes les mesures nécessaires pour avoir des échantillons représentatifs, à savoir l'âge et le régime alimentaire pour chaque catégorie de produit.

Ainsi, après avoir écarté les couches superficielles exposées aux aléas climatiques, des échantillons distincts ont été prélevés aléatoirement sur divers endroits et dans toute la profondeur de 10 tas de fumiers provenant de 10 élevages pour chaque type de fumier : FV, FB et FC. Les crottes de dromadaire (FD) ont été collectées de dix zones de parcours camelines dans

la région de Ouargla. Quant aux résidus de palmier dattier (RPD) ; ils ont été collectés de dix nouvelles palmeraies (destinés à la production de Deglet nour) dans la région d'étude.

Les échantillons organiques collectés (10 sous-échantillons pour chaque produit organique) ont été emballés dans des sacs en polyéthylène remplis à 2/3 de leur capacité afin de laisser de l'espace pour l'expansion des gaz. Une fois au laboratoire, ils ont été bien mélangés pour former à la fin des échantillons composites représentatifs pour chaque type de produit organique.

2.2. Entreposage des échantillons

La caractérisation analytique des produits organiques devrait être réalisée sur des échantillons séchés et broyés. Comme le séchage provoque une perte de l'azote par volatilisation (NH_3), et afin d'éviter ces pertes, les échantillons ont été préalablement acidifiés (Acide chlorhydrique 0.3 M jusqu'à imprégnation), avant le passage à l'étuve à 60°C jusqu'à un poids constant (24h à 48h). D'après Bastianelli *et al.* (2007), ce protocole limite largement les pertes de NH_3 sans affecter les autres composés.

Compte tenu de l'importance de la surface des débris organiques dans la vitesse de décomposition, les produits sélectionnés ont été broyés à 0.5 mm, puis stockés au frais à 4 °C dans des sacs en plastique tressés, perméables à l'air, en attendant d'être analysés. Les méthodes adoptées pour la caractérisation analytique sont les suivantes :

3. Méthodes d'analyse

3.1. Méthodes de caractérisation physico-chimique des produits organiques utilisés

La caractérisation et la comparaison des produits organiques testés dans le cadre de cette étude, visent à pointer l'intérêt agronomique de ces derniers, défini par leurs valeurs amendante et fertilisante en vue d'intégration dans une stratégie de fertilisation des sols salés des régions arides. La valeur amendante résulte de la capacité de ces produits à augmenter la teneur en matière organique du sol de façon à améliorer ses propriétés physiques, physicochimiques et biologiques. La valeur fertilisante correspond à la teneur en éléments nutritifs et leur disponibilité sous forme bioassimilable (Chabalier *et al.*, 2006).

La valeur agronomique et les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) pour l'ensemble des produits testés ont été déterminées par les méthodes recommandées pour

l'analyse du fumier (Peters *et al.*, 2003) et celles de l'analyse du végétal (Kalra, 1997 ; Motsara et Roy, 2008) respectivement pour les quatre types de fumier et les résidus de palmier dattier.

3.1.1. pH

La mesure du pH a été effectuée à l'aide d'un pH mètre sur un extrait 1/5 (fumier / eau), après 1 heure d'homogénéisation à température ambiante.

3.1. 2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique a été déterminée par un conductimètre à une température de 25°C sur un rapport (fumier /eau) de 1/5. La conductivité est en fonction de la concentration de sels dissous dans le mélange.

3.1.3. Taux d'humidité (Hu)

C'est la teneur en eau de l'échantillon après séchage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C :

$$\text{Humidité (\%)} = \frac{PE - (P_1 - P_0)}{PE} \times 100$$

- P_0 : Poids du creuset vide.
- P_1 : Masse totale du résidu sec et du creuset après le séchage.
- PE : Prise d'essai.

3.1.4. Matière sèche (MS)

La détermination de la matière sèche a été réalisée après avoir déterminé le pourcentage d'humidité dans les différents produits. La détermination de la teneur en eau conditionne la précision des divers résultats analytiques qui sont rapportés à la matière sèche :

$$\text{MS (\%)} = 100 - \text{Humidité (\%)}$$

3.1.5. Matière minérale (MM)

La teneur en matière minérale dans les différents produits organiques a été déterminée après calcination. La mesure de la différence entre le poids sec initial et le poids sec final de l'échantillon organique après calcination permet de déduire la teneur en matière minérale de l'échantillon.

Ainsi, le taux des cendres contenu dans l'échantillon se calcule suivant la formule suivante :

$$MM (\%) = (WC / WS) \times 100$$

- *WC* : Masse de l'échantillon après calcination
- *WS* : Masse de l'échantillon

3.1.6. Matière organique (MO) et carbone organique (CO)

Le taux de matière organique (MO) a été déterminé par la méthode de calcination (perte au feu) dont le principe se résume comme suit:

- On pèse 10g de broyats des différents types de fumier dans des capsules en porcelaine, que l'on fait passer par la suite au four à moufle à une température de 600 °C pendant 6 heures. La perte au feu représente grossièrement la masse de matière organique disparue par combustion et pyrolyse, mais l'attaque thermique donne des résultats par excès c'est à dire qu'il y a toujours départ simultané d'eau libre résiduelle.
- En évaluant la quantité d'eau perdue et en la soustrayant de la masse perdue au feu, on détermine le pourcentage de matière organique.

L'évaluation du taux de carbone organique à partir de la matière organique a été effectuée en adoptant le facteur 2 qui signifie que la matière organique contient 50 % du carbone au lieu du facteur 1.724. D'après l'étude menée par Giroux et Audesse (2004) sur 11 engrais et amendements organiques ; le facteur 2 est plus approprié que le facteur 1,724 pour évaluer le contenu en carbone des engrais et des amendements organiques à partir de leur teneur en MO.

3.2. Méthodes de détermination de la valeur agronomique des produits organiques testés

3.2.1. Valeur fertilisante (Composition en éléments nutritifs)

3.2.1.1. Dosage de l'azote total

Le dosage de l'azote a été effectué par la méthode de Kjeldahl. L'azote des composés organiques est transformé en azote ammoniacal sous l'action de l'acide sulfurique concentré porté à l'ébullition qui se comporte comme un oxydant. Les substances organiques sont décomposées : le carbone se dégage sous forme de gaz carbonique, l'hydrogène donne de l'eau

et l'azote est transformé en azote ammoniacal. Ce dernier est fixé immédiatement par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium.

Pour accentuer l'action oxydante de l'acide sulfurique, on élève la température d'ébullition, en ajoutant du sulfate de cuivre et du sulfate de potassium qui jouent le rôle de catalyseurs. La matière organique est totalement oxydée et la solution contenant du sulfate d'ammonium est récupérée. On procède ainsi à un dosage de l'azote ammoniacal par distillation après l'avoir déplacé de sa combinaison par une solution de soude en excès.

3.2.1.2. Dosage des ions ammonium et nitrate (NH_4^+ et NO_3^-)

Les ions ammonium NH_4^+ et nitrate NO_3^- ont été extraits à partir d'une solution de KCl (2M) (Keeny et Nelson, 1982).

3.2.1.3. Dosage des macroéléments cationiques et micro-éléments

L'analyse des macroéléments cationiques (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) et des micro-éléments (Fe^{++} , Cu^{++} , Mn^{++} , Zn^{++}) est effectuée par spectrométrie, suite à la minéralisation des échantillons par voie humide avec un mélange triacide (nitrique, perchlorure et sulfurique).

L'échantillon est vaporisé, par aspiration de la solution, dans une flamme produite par la combustion d'un mélange air-acétylène. L'échantillon nébulisé passe à l'état atomique. Le dosage des cations s'effectue soit en absorption (Spectrométrie d'absorption atomique) (Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} , Cu^{++} , Mn^{++} , Zn^{++}), soit en émission (K^+ , Na^+) (Photométrie à flamme).

3.2.1.4. Dosage du phosphore total

Le phosphore de l'échantillon organique est mis en solution en utilisant une solution d'acides nitrique sulfurique et perchlorique. Le dosage des ions P en solution s'effectue par spectrophotométrie (Longueur d'onde : 825 nm) d'un complexe phosphomolybdique selon la méthode Murphy-riley (Carter, 1993).

3.2.1.5. Dosage du chlore

Le chlore a été dosé par la méthode de Mohr. Elle consiste à doser les chlorures avec du nitrate d'argent en présence de chromate de potassium.

3.2.1.6. Méthode de détermination de l'équivalence engrais minéral

L'estimation de la valeur fertilisante d'un produit organique repose sur la détermination de sa composition en éléments fertilisants majeurs :N, P₂O₅ et en K₂O et des coefficients d'équivalence engrais minéral. Ces coefficients sont souvent utilisés pour interpréter les résultats des essais avec des engrais de ferme. Il s'agit des indicateurs directement utilisables en pratique pour estimer la valeur fertilisante des matières organiques (Long et Gracey, 1990). Pour un élément fertilisant contenu dans une matière organique, cette valeur correspond à la fraction de cet élément qui agit comme un engrais minéral, c'est à dire directement disponible pour la culture. Cette proportion assimilable, est calculée en % de la teneur totale de l'élément : c'est le coefficient d'équivalence en engrais, ou coefficient équivalent engrais (CE ou Keq) (Chabalier *et al.*, 2006).

Pour ce travail, nous avons adopté des coefficients équivalents engrais spécifiques pour les sols sableux, étant donné, que ces derniers représentent les sols les plus abondants dans la région d'étude (Tableau1). La démarche à suivre pour l'estimation de l'équivalence engrais minéral au niveau des produits organiques est présentée en annexe (II.1).

Étant donné que MgO et CaO se comportent comme des engrais minéraux quelle que soit la nature de la matière organique apportée au sol, leur Keq est considéré comme 100% (Chabalier *et al.*, 2006). En effet, ces éléments sont caractérisés par une forte solubilité qui leur permet de se retrouver rapidement dans la solution du sol.

Vu le manque des valeurs du coefficient équivalent-engrais relatif au fumier de dromadaire et des résidus d'origine végétale, on n'a pas pu apprécier leur valeur fertilisante.

Tableau 1. Coefficients équivalents engrais pour les trois éléments nutritifs majeurs (N, P, K) en fonction de type de produit organique

Type de produit	CE-N	CE-P	CE-K
Fumier de Bovins (FB)	55	65	90
Fumier de Dromadaire (FD)	nd	nd	Nd
Fumier de Caprins (FC)	25	100	100
Fumier de Volailles (FV)	75	65	90

nd : non déterminé

(Chabalier, 2006)

3.2.2.Valeur amendante des produits testés

L'évolution des matières organiques est essentiellement sous la dépendance de leurs constituants biochimiques. Ainsi, la valeur amendante des apports organiques testés dans le cadre de cette étude a été évaluée par plusieurs paramètres biochimiques :

3.2.2.1.Rapport C/N

La caractérisation analytique des matières fertilisantes utilisées indique leur teneur en carbone organique total (C_{Org}) et en azote total (N_{Total}). Ainsi, on déduit le rapport C/N qui indique la vitesse de décomposition de la matière organique.

3.2.2.2. Caractérisation biochimique de la matière organique(CBM)

Deux approches assez voisines ont été proposées pour la caractérisation biochimique de la matière organique : l'Indice de Stabilité Biologique (I.S.B.) de Lineres et Djakovitch (1993) et la Caractérisation Biochimique de la Matière organique (C.B.M.) de Robin (1997). Dans leurs principes, ces deux méthodes consistent à identifier différentes fractions de la matière organique par séparation biochimique, et en déduire la résistance à la biodégradation.

Pour notre étude, on a opté pour la caractérisation biochimique de la matière organique (CBM). Ce type de caractérisation permet de regrouper les produits par catégorie de biodégradabilité. Elle permet d'obtenir des informations complémentaires à celles du rapport C/N.

Le fractionnement biochimique de la matière organique inspiré du fractionnement Van Soest et *al.*(1967) consiste en un fractionnement de la matière organique en quatre familles biochimiques, sur la base de leur solubilisation successive dans des réactifs d'extraction : substances solubles (SOLU), Hémicellulose (HEMI), Cellulose (CELL) et Lignine (LIGN) par une succession d'attaques ménagées (Norme XPU 44-162) sur la base de leur solubilisation successive dans des réactifs d'extraction (Fig.1).Le protocole de ce fractionnement est donné en annexe (II.1).

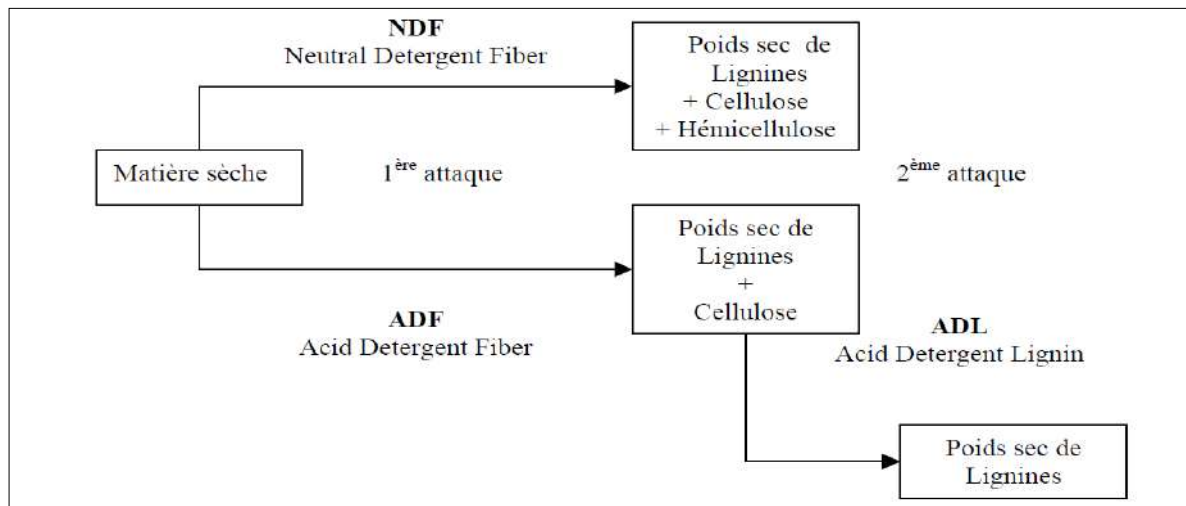


Figure 1. Fractionnement biochimique de la matière organique (Méthode inspirée du fractionnement de Van Soest *et al.* (1967))

3.2.2.3. Fractionnement des composés humiques

Le fractionnement humique réalisé a été adapté de celui utilisé par l'International Humic Substances Society (IHSS). Les acides humiques (AH) et fulviques (AF) sont extraits par agitation à l'aide d'un agitateur rotatif, durant 2 heures à partir de 10 g de produit organique, additionnés à 100 mL de NaOH 0,1 M dans des flacons Erlenmeyer de 250 mL. Cette fraction soluble en milieu alcalin (AH+AF) est récupérée par centrifugation à 2500 rpm durant 25min. La solution est alors acidifiée à pH 1 par ajout d'acide chlorhydrique HCl 6 M. Après une nuit à + 4 °C, la fraction soluble en milieu acide (AF) d'acides fulviques est séparée de la fraction insoluble d'acides humiques (AH) par centrifugation à 10000 rpm durant 10 min. Les deux fractions sont séchées dans une étuve à 105°C pendant 48 heures (Fig. 2).

Le dosage de différentes fractions humiques est effectué après oxydation du carbone par KMnO_4 en milieu alcalin (Annexe II .1).

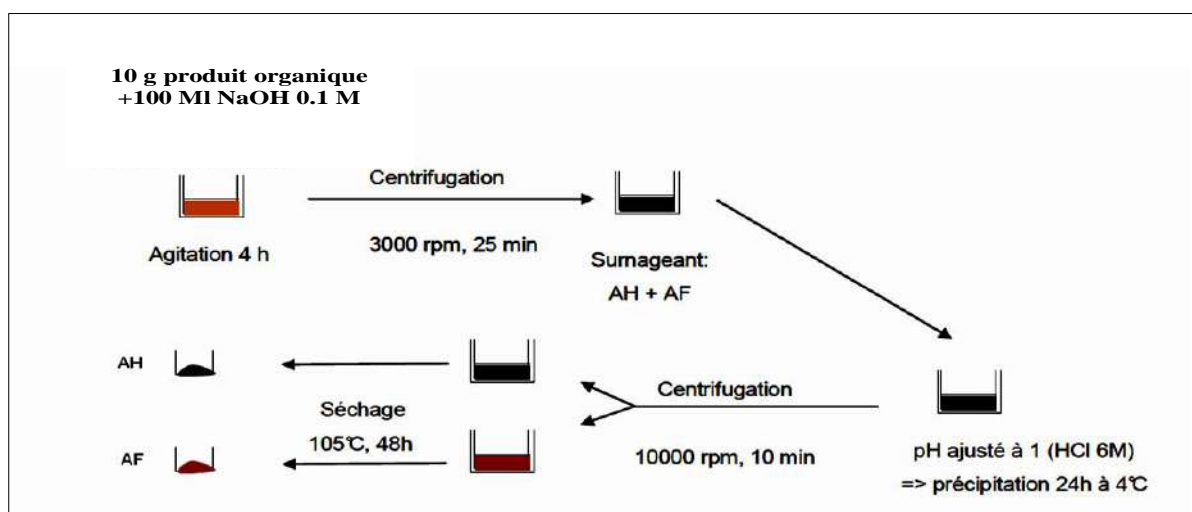


Figure 2.Extraction des acides humiques et fulviques par différence de solubilité en milieu basique et acide

III. Résultats et discussion

1. Caractérisation physique et physico-chimique des produits organiques testés

1.1. Teneur en MS, MO et MM en fonction du type de produit organique

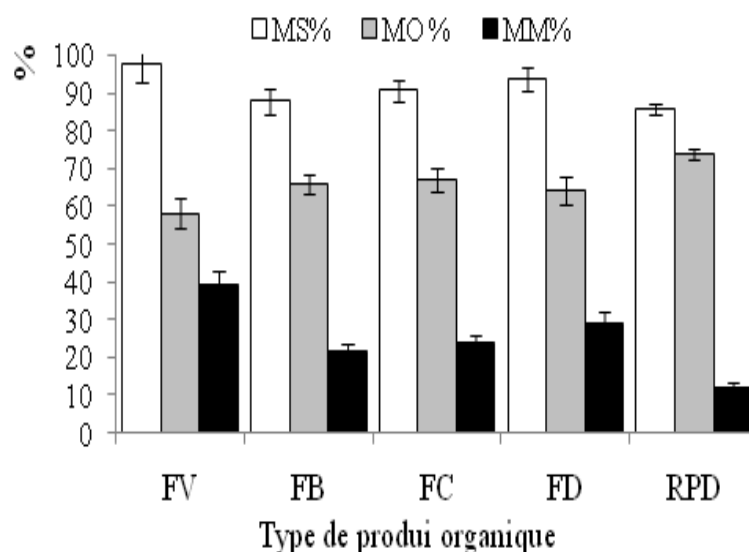
La caractérisation physique, physico-chimique des différents types de produits organiques étudiés, à savoir la matière sèche (MS), la matière minérale (MM), la matière organique (MO) est présentée sur la figure 3. Les résultats obtenus montrent que la teneur en matière sèche (MS) est élevée pour l'ensemble des produits organiques analysés. Les taux enregistrés sont de 97.48, 93.53, 90.78, 87.83 et 85.92 % respectivement pour le (FV), (FD), (FC), (FB) et les (RPD). Il est clair, d'après ces résultats que le taux le plus élevé en MS a été enregistré par le (FV).

La faible différence enregistrée pour le taux de matière sèche (MS) pourrait être expliquée par le fait, que ces produits ont été séchés avant d'être soumis à l'analyse. En effet, les différentes analyses ont été effectuées sur des produits séchés. Toutefois, même si cette différence n'a pas mis en évidence une variation dans le taux de MS entre les différents produits au laboratoire, elle peut avoir son importance au champ. D'après Collignon (2004), des différences importantes pourraient être décelées entre les produits organiques frais et les produits séchés. Notons également que la durée du stockage pourrait intervenir dans la détermination du taux de la matière sèche du fumier. Selon Chabalier *et al.* (2006), plus les teneurs en matières sèches sont élevées, plus le produit organique est concentré et donc riche en éléments fertilisants. Ces observations sont en concordance avec nos résultats, dans la mesure, où, nous avons enregistré une certaine proportionnalité entre la richesse en minéraux (MM) et le taux de (MS). Les teneurs en matière minérale varient entre un minimum de 12.15 % pour les résidus de palmier dattier et un maximum de 39.32 % pour le (FV). Alors que, les autres fumiers enregistrent des taux intermédiaires de 29.3, 23.76 et 21.85 % respectivement pour le (FD), (FC) et (FB).

Les teneurs en matière organique (MO) des différents échantillons de produits analysés varient entre une valeur minimale de 58.96 % enregistrée par le fumier de volailles (FV) et une valeur maximale de 73.77 % enregistrée par les (RPD). Les autres fumiers enregistrent des teneurs intermédiaires de 67.02, 65.98 et 64.23 % respectivement pour le (FD), (FB) et (FD).

Ces notables variations pourraient être attribuées à la nature des intrants et au degré de minéralisation du produit organique au moment de l'analyse. Le fumier de volailles (FV) grâce, à sa forte minéralisation a affiché la teneur en matière organique la plus basse, due à sa pauvreté en composés ligneux par rapport aux autres produits (Azeez et Van Averbek, 2010).

En revanche, la teneur la plus élevée enregistrée par les résidus de palmier dattier (RPD), serait due à leur richesse en cellulose et en lignine par rapport aux autres types de fumier (Al-Busaidi *et al.*, 2014). Il est notoire que la présence d'une quantité de terre dans le fumier contribuerait à réduire le taux de la matière organique (Oustani, 2006).



*FV: Fumier de Volailles ; FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).*

Figure 3. Variation des teneurs en MS, MO et MM en fonction du type de produit organique

1.2. Variation de pH en fonction du type de produit organique

Le pH des différents types de produits organiques étudiés est présenté sur la figure 4. Les valeurs oscillent entre la légère acidité et la basicité, avec des pH de 7.67 à 7.89 respectivement pour le (FV) et le (FD), et des pH basiques de 8.1 et 8.21 respectivement pour le fumier de bovins (FB) et le (FC). Les RPD enregistrent un pH légèrement acide de 5.74 (Fig 4).

D'après Larney et Angers (2012), la valeur de pH des produits organiques n'est pas stable. Elle dépend de la composition des intrants, de la teneur en azote et de l'intensité de nitrification pendant le stockage.

La faible valeur de pH enregistrée par le fumier de volailles (FV) par rapport aux autres fumiers peut être un reflet de la teneur relativement élevée en ammonium et en nitrates (2729 mg Kg⁻¹). L'ammonium (N-NH₄) pourrait se dissocier en solution lors du processus de la nitrification, ce qui libère les H⁺ qui provoquent l'abaissement du pH du fumier. Selon Dommergues et Mangenot (1970) et Davet (1996), la nitrification est un processus microbien générateur d'acidité.

En revanche, le pH relativement plus élevé et les faibles teneurs en azote nitrique dans les autres types de fumiers notamment le bovins et le caprins, n'ont pas pu stimuler la microflore nitrifiante en raison de sa neutrophilie (Soudi et Chian, 1990 ; Sall *et al.*, 2015). Quant au fumier de dromadaire (FD), il a enregistré une acidité intermédiaire, en occupant la deuxième position après le fumier de volailles (FV) par rapport à la gamme des produits testés. Ceci reflète une richesse relativement élevée en nitrates par rapport aux deux précédents fumiers. Par ailleurs, la légère acidité enregistrée par les résidus de palmier dattier (RPD) est due à l'acidité initiale de ce produit et à leur faible teneur en nitrates.

1.3. Variation de la conductivité électrique en fonction du type de produit organique

Le classement des produits organiques en fonction de leur conductivité électrique mesurée sur des extraits (1/5) est dans l'ordre croissant suivant : RPD (CE: 2.48 dS m⁻¹) < FD (CE: 7.74 dS m⁻¹) < FV (CE: 8.05 dS m⁻¹) < FB (CE: 8.55dSm⁻¹) < FC (CE: 8.58 dS m⁻¹) (Fig. 5). Ces résultats montrent clairement la forte salinité qui caractérise les différents fumiers par rapport aux résidus de palmier dattier.

Selon Peters *et al.*, (2003), le fumier peut avoir des conductivités électriques très élevées dues aux grandes quantités de sels minéraux ajoutés aux rations alimentaires des animaux.

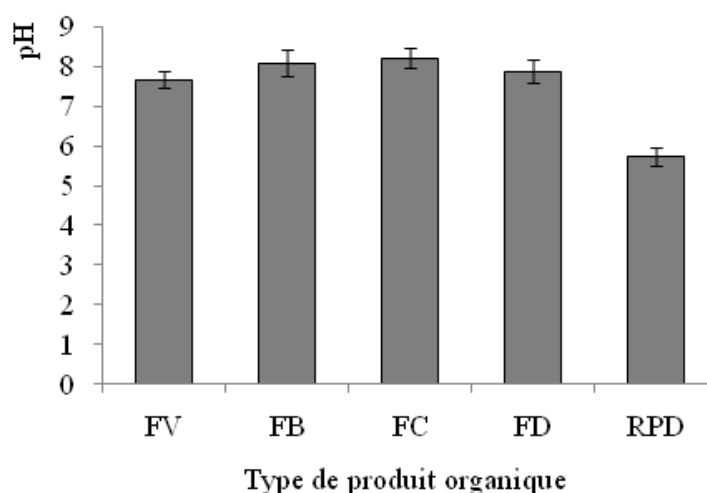
Ce sont principalement les cations Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ qui en sont responsables (Gottesman,1989).

La conductivité électrique relativement moins élevée observée chez le fumier de volailles par rapport à celle du fumier de bovins et de caprins peut être liée à la présence d'une quantité de matière ligneuse sous forme de copeaux de bois dans ce type de fumier.

Les valeurs de la conductivité électrique enregistrées sont faibles par rapport à celles obtenues par Fayed (2010), par une gamme équivalente de fumiers. Cependant, il est à noter

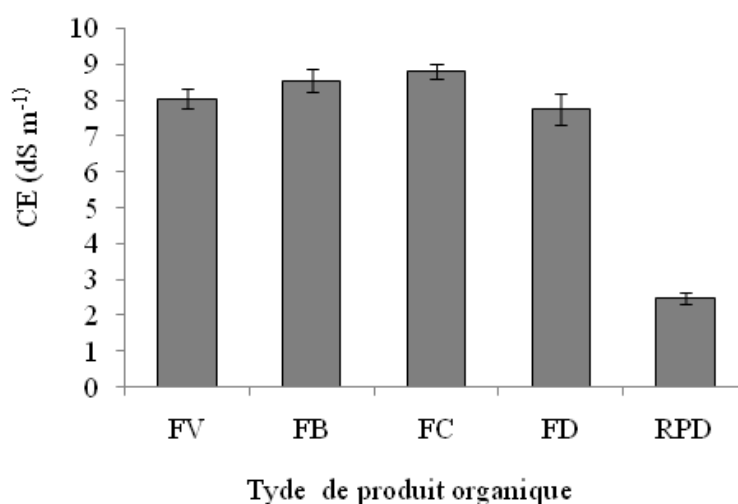
que ces auteurs n'ont pas mentionné dans leurs études le rapport d'extraction, et il se peut que la variation de la teneur en sel soit aussi due à des rapports d'extraction différents.

La faible conductivité électrique enregistrée par le fumier du dromadaire par rapport aux autres fumiers est probablement due à son régime alimentaire. En fait, l'alimentation du dromadaire conduite en extensif est basée sur la consommation des plantes naturelles, relativement pauvres en éléments nutritifs par rapport aux régimes alimentaires plus concentrés fournis aux animaux en élevage intensif (Azeez *et al.*, 2010 ; Azeez et Van Averbeke, 2010).



*FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)*

Figure 4. Variation du pH en fonction du type de produit organique



*FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)*

Figure 5. Variation de la conductivité électrique (dS m⁻¹) en fonction du type de produit organique

2. Valeur fertilisante en fonction du type de produit organique

2.1. Teneurs en macroéléments et en micro éléments

L'analyse comparative en éléments fertilisants des cinq produits organiques étudiés est illustrée dans le tableau 2.

2.1.1. Macroéléments

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en azote total (N), potassium total (K) et en phosphore total (P) sont nettement plus élevées dans le fumier de volailles par rapport aux autres produits organiques. Les valeurs obtenues sont 2,9, 2,76 et 1,52 % respectivement pour les trois éléments.

En revanche, les plus faibles teneurs ont été enregistrées par les résidus de palmier dattier (RPD), soient, des teneurs de 0,65, 0,51 et 0,05 % respectivement pour l'azote (N total), le potassium (K total) et le phosphore (P total). Le fumier du dromadaire est cependant plus riche en azote que les fumiers bovins et caprins.

Par ailleurs, le (FD), (FC) et le (FB) ont secondé le (FV) pour la teneur en azote (1,3 %), en phosphore (1,19 %) et en potassium (1,28 %) respectivement pour les trois fumiers.

Les résultats montrent que pour les cinq produits testés, l'azote est majoritairement sous forme organique. La forme ammoniacale étant cependant, la fraction minérale la plus présentée pour l'ensemble des produits. Les teneurs en ions ammonium des divers produits organiques testés varient dans l'ordre suivant : FV (4529 mg.Kg^{-1}) > FD (2116 mg.Kg^{-1}) > FC (1600 mg.Kg^{-1}) > FB (1565 mg.Kg^{-1}) > RPD (0.019 mg Kg^{-1}). Les teneurs en nitrates, quoique, sont beaucoup moins élevées que les précédentes, suivent toutefois, une tendance similaire : FV (2729 mg.Kg^{-1}) > FD (1895 mg Kg^{-1}) > FC (1425 mg.Kg^{-1}) > FB (1355 mg.Kg^{-1}) > RPD ($0.0043 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Concernant la teneur en calcium (Ca), la plus forte teneur a été enregistrée par le fumier de volailles. Les teneurs en calcium des différents produits organiques décroissent dans l'ordre suivant : FV (4,13%) > FB (2,76%) > FC (1,58%) > FD (1,93%) > (RPD) (1,27%).

Quant au magnésium (Mg), la teneur la plus élevée a été en faveur du fumier de caprins (FC) avec une teneur maximale de 0,74%. Les autres produits enregistrent des teneurs plus

faibles de l'ordre de 0.08, 0.4, 0.43 et 0.58 % respectivement pour (RPD), (FB), (FV) et le (FD).

2.1.2. Micro-éléments (Oligo-éléments et éléments traces métalliques)

Les teneurs des différents produits en certains oligo-éléments (Fe, Mn) et en éléments traces métalliques (Cu, Zn) sont présentées dans le tableau 2. Les résultats relatifs aux teneurs en micro-éléments révèlent une tendance similaire aux teneurs en macroéléments. En fait, les teneurs les plus élevées ont été enregistrées par le fumier de volailles, alors que les plus basses ont été observées par les résidus de palmier dattier.

La quantité d'éléments traces métalliques (ETM) étant souvent mise en cause lorsqu'il s'agit de l'apport des déchets organiques au sol en raison de leur effet toxique associé à leur application à fortes doses. Ces éléments ont été mesurés pour chacun des produits sélectionnés afin de s'assurer que ceux-ci répondaient bien aux normes en vigueur et présentaient des teneurs inférieures aux limites imposées.

Il est à mentionner que les teneurs totales en éléments traces (Zn, Cu) pour l'ensemble des produits testés, sont inférieures aux teneurs maximales autorisées, définies par la norme AFNOR U 44-051 (Annexe II.1).

2.1.3. Teneurs en chlorures et en sodium

Bien que ces deux éléments ne jouent pas un rôle nutritif bien précis, leur présence en faibles quantités est nécessaire pour certains processus physiologiques de la plante.

Les teneurs en chlorures (Cl⁻) varient entre une valeur minimale de 0.15 % enregistrée par les (RPD) et une valeur maximale 0.58 % enregistrée par le (FC). Le reste des produits organiques enregistrent des teneurs presque identiques avec une teneur moyenne de 0.53 % à la fois pour le (FD), (FV) et le (FB).

Quant aux teneurs en Na⁺, ces derniers oscillent entre une valeur minimale de 0.19% enregistrée par les résidus de palmier (RPD) et une valeur maximale de 0.52% enregistrée par le fumier caprin (FC).

Le reste des produits organiques enregistrent des teneurs intermédiaires de 0.37, 0.48 et 0.52%, respectivement pour le (FD), le (FV) et (FB).

Tableau 2. Composition en éléments fertilisants (macroéléments et en oligo-éléments en fonction du type de produit organique)

Produit organique	Fumier de Volailles (FV)	Fumier de Bovins (FB)	Fumier de Caprins (FC)	Fumier de Dromadaire (FD)	Résidus de P.Dattier (RPD)
C.Org %	29.48 ± 1.20	32.9 ± 1.18	33.5 ± 1.67	32.1 ± 1.42	36.8 ± 1.70
N Total	02.9 ± 0.20	1.02 ± 0.12	0.98 ± 0.12	1.3 ± 0.2	0.65 ± 0.10
K %	2.76 ± 0.20	1.07 ± 0.18	0.75 ± 0.11	0.97 ± 0.19	0.51 ± 0.16
K ₂ O%	3.31 ± 0.23	1.28 ± 0.21	0.9 ± 0.13	1.16 ± 0.22	0.61 ± 0.19
P total %	1.52 ± 0.04	0.38 ± 0.05	0.52 ± 0.04	0.40 ± 0.03	0.05 ± 0.01
P ₂ O ₅	3.48 ± 0.16	0.87 ± 0.12	1.19 ± 0.10	0.91 ± 0.08	0.11 ± 0.04
Mg%	0.43 ± 0.02	0.4 ± 0.01	0.74 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.08 ± 0.02
MgO%	0.71 ± 0.04	0.66 ± 0.02	1.22 ± 0.04	0.96 ± 0.15	0.13 ± 0.04
Ca %	4.13 ± 0.38	1.58 ± 0.17	2.76 ± 0.14	1.93 ± 0.12	1.27 ± 0.03
CaO	5.73 ± 0.25	2.19 ± 0.25	3.83 ± 0.21	2.68 ± 0.25	1.76 ± 0.05
Na %	00.4 ± 0.02	0.48 ± 0.04	0.52 ± 0.02	0.37 ± 0.03	0.19 ± 0.01
Cl %	0.53 ± 0.06	0.55 ± 0.06	0.58 ± 0.02	0.5 ± 0.07	0.15 ± 0.04
Fe (mg Kg ⁻¹)	1880 ± 43.7	1125 ± 49.0	104 ± 52.9	944 ± 51.4	70.4 ± 10.8
Cu (mg Kg ⁻¹)	102.3 ± 2.46	33.74 ± 3.35	37.8 ± 3.88	34.8 ± 3.13	9.78 ± 1.28
Mn (mg Kg ⁻¹)	320 ± 19.28	266 ± 20.2	308 ± 22.6	433 ± 28.6	15.02 ± 2.20
Zn (mg Kg ⁻¹)	295.5 ± 16.13	283 ± 19.76	190 ± 17.7	295 ± 21.04	12.86 ± 3.26
N-NH ₄ (mg Kg ⁻¹)	4529 ± 237	1565 ± 108	1600 ± 91.6	2116 ± 102	0.019 ± 0.01
N-NO ₃ (mg Kg ⁻¹)	2729 ± 99.7	1355 ± 111	1425 ± 112	1895 ± 104	0.0043 ± 0.0
N Min (mg Kg ⁻¹)	7258 ± 119	2920 ± 131	3025 ± 82.6	4011 ± 111	0.023 ± 0.01

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

La forte variation dans la composition chimique entre les différents produits organiques testés est due à leur hétérogénéité. En effet, la composition des déchets de ferme varie dans une large mesure en fonction de l'espèce animale, l'âge, le régime alimentaire, l'état sanitaire, la nature de la litière, les conditions de stockage et d'épandage, les soins d'entretien apportés de manière à éviter les pertes, le système de gestion, les dates de collecte et la forme physique (Pâteux, liquide, etc.) (Gros, 1997; Grissa *et al.*, 2000; Chadwick *et al.*, 2000 ; Nicolardot *et al.*, 2003 ; Azeez *et al.*, 2010). Tandis que, les résidus de culture, varient en fonction de l'âge et de l'espèce végétale (Jarrige *et al.*, 1995 ; Mafongoya *et al.*, 1997), de sa position dans le peuplement (Reyes *et al.*, 2003) et de l'organe considéré (Sall, 2004).

Par ailleurs, cette variabilité est liée aussi aux facteurs de dilution (Sable, litière). Le problème de dilution des éléments fertilisants par la litière, et à l'occasion du sable, est évident pour faire varier la teneur du fumier en plusieurs éléments tels que le N total, le P₂O₅, le K₂O, le Ca et le Mg.

Ces raisons peuvent avoir un effet significatif sur la composition des produits organiques et contribuer, ainsi, à des grandeurs variables dans la composition physico-chimique des produits organiques (Azeez et Van Averbek, 2010).

La composition des produits organiques présentée dans le tableau 2 montre que l'azote total (N), le phosphore total (P), le potassium (K) et les teneurs en micro-nutriments sont nettement plus élevés dans le fumier de volailles par rapport aux autres produits. Ces résultats confirment ceux de Adenawoola *et al.* (2005), Azeez *et al.* (2010), Demir *et al.* (2010) et Delago *et al.* (2012) qui ont montré que le fumier de volailles est un produit très concentré en éléments fertilisants (Azote, Potasse et Phosphore et en oligo-éléments).

Dans notre cas d'étude, cet effet s'explique par les additifs alimentaires ajoutés au régime alimentaire des volailles, riche en sels minéraux et en antibiotiques, pour stimuler la croissance, l'équilibre osmotique du corps, le renforcement des os et la production des œufs. La majorité des ces éléments est métabolisée dans l'organisme des volailles et l'excès est éliminé sous forme de déchets (Azeez *et al.*, 2010).

À titre confirmatif, en moyenne 70 % de l'azote, 80 à 85 % du phosphore et 95 % en potassium, ingérés par les volailles se trouvent dans leurs déjections, alors que, seulement 40 à 50 % de la matière organique et de l'azote ingéré, chez les monogastriques, se retrouvent dans leurs excréments (Figarol, 2001 ; Adden, 2004 ; Aubert, 2010).

Il est notoire que le (FV) utilisé dans cette étude provient d'un élevage intensif où tous les besoins nutritifs sont assurés, ce qui n'est pas le cas chez les ruminants élevés en système semi-intensif. Ce cas a été confirmé par Omeira *et al.* (2006).

La variation en éléments traces en fonction du type de fumier a été signalée par d'autres auteurs (Bolan *et al.*, 2004). Il est à mentionner que les teneurs totales en éléments traces (Zn, Cu) pour l'ensemble des produits testés sont inférieures aux normes limites fixées par AFNOR (Annexe II.1).

En effet, la comparaison entre les concentrations totales de ces produits en éléments traces (Zn, Cu), avec les valeurs de référence dans la norme AFNOR U 44-051 pour l'utilisation agricole des fumiers, montre qu'ils sont très loin d'être polluants. Quant à la teneur en azote minéral, les teneurs en nitrates et en ammonium semblent augmentées en fonction de la richesse de chaque produit en azote et de son degré de minéralisation. Ainsi, le fumier de volailles

affiche les teneurs le plus élevées en ammonium et en nitrates en raison de sa forte minéralisation par rapport aux autres produits ; tandis que, les plus faibles teneurs en azote ammoniacal et en azote nitrique ont été signalées dans les (RDP).

Le fumier de dromadaire est cependant plus riche en azote que le fumier de bovins et de caprins. Et contrairement aux résultats obtenus par Fayed (2010), indiquant que les excréments fécaux du dromadaire sont pauvres en azote, ce qui peut être expliqué par la variabilité de la teneur en azote des espèces végétales consommées au niveau des parcours camelins.

La richesse relativement élevée du (FC) en phosphore par rapport aux (FB) et (FD) peut être due au type d'alimentation des caprins, basé principalement sur le foin et l'ensilage, bien pourvus en phosphore (Agabriel, 2010).

La concentration en potassium dans le fumier de bovins revient à la présence de litière de paille riche en potassium. En revanche, les résidus de palmier dattier ont été classés en dernière position pour l'ensemble des éléments nutritifs majeurs et des micronutriments analysés.

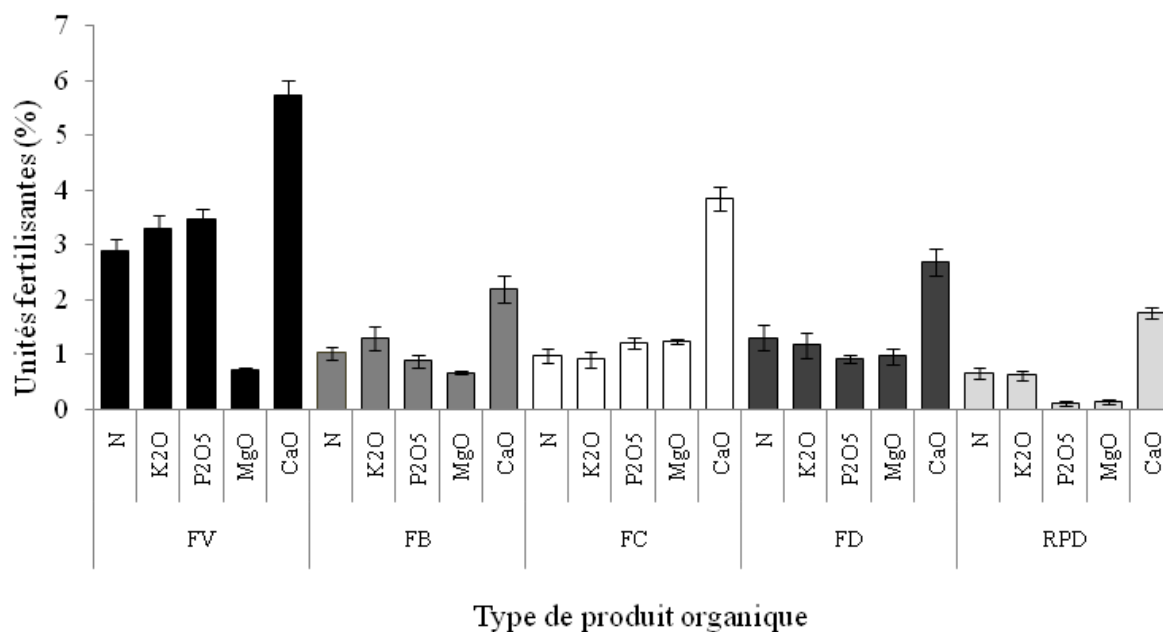
Les teneurs en chlorure et en sodium au niveau des différents produits organiques confirment les valeurs de la conductivité électrique enregistrées.

2.2. Variation de la teneur en unités fertilisantes en fonction du type de produit organique

La comparaison entre les différents produits organiques pour les teneurs en N, P₂O₅ et K₂O, MgO et CaO est présentée dans la figure 6. Les résultats obtenus ont révélé que les plus fortes teneurs ont été enregistrées par le fumier de volailles (FV) avec les valeurs, 2.9, 3.31, 3.48, 5.73 et 0.71 % respectivement pour N, P₂O₅ et K₂O, CaO et MgO.

Les plus faibles teneurs ont été marquées par les résidus de palmier dattier (RPD) avec les valeurs de 0.65, 0.11, 0.61, 1.76 et 0.13 % respectivement pour N, P₂O₅ et K₂O, CaO et MgO. Les autres produits enregistrent des teneurs intermédiaires.

En se basant sur les normes AFNOR de classement des produits organiques, les trois fumiers (FD, FC et FB), répondent aux critères généraux de définition d'un amendement organique présentés dans la norme AFNOR NFU44-051, tandis que le (FV) répond aux critères généraux de la norme NFU42-001(Annexe II.1).



*FV: Fumier de Volailles ; FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)*

Figure. 6. Variation de la composition en éléments fertilisants en fonction du type de produit organique

2. 3. Estimation de la teneur en éléments fertilisants disponibles à la plante

Les résultats de l'estimation et de la comparaison de la valeur fertilisante des trois types de fumiers en utilisant les coefficients équivalent-engrais (Keq) pour chaque type d'élément fertilisant sont illustrés par la figure 7.

Les résultats obtenus montrent que le fumier de volailles se classe en première position en ce qui concerne la teneur en N assimilable pendant la saison de culture avec, 2.17 %, soit 75% de l'azote total, secondé par le (FB) avec une teneur de 0.56%, soit 55% de l'azote total.

Le (FC) se classe en dernière position avec une teneur en N assimilable de 0.24%, soit 24.5 % de l'azote total.

Quant à la teneur en P₂O₅ disponible pendant la saison de culture, le fumier de volailles (FV) a enregistré la teneur la plus élevée avec 2.26 %, soit 65 % de P₂O₅ total, suivi par le (FC) avec une teneur de 1.19%, soit 100 % de P₂O₅ total.

Enfin, la dernière classe a été occupée par le (FB) avec la plus faible teneur, 0.56%, soit 64.36 % du P₂O₅ total.

Les résultats relatifs à la teneur en K_2O montrent que le (FV) enregistre la teneur la plus élevée en K_2O (2.97 %), soit 89.72 % de la teneur en K_2O total, suivi par le (FB) avec une teneur de 1.15%, soit 89.84 % de la teneur en K_2O total. En dernière position, se classe le (FC) avec une teneur de 0.9 %, soit 100 % de la teneur en K_2O total.

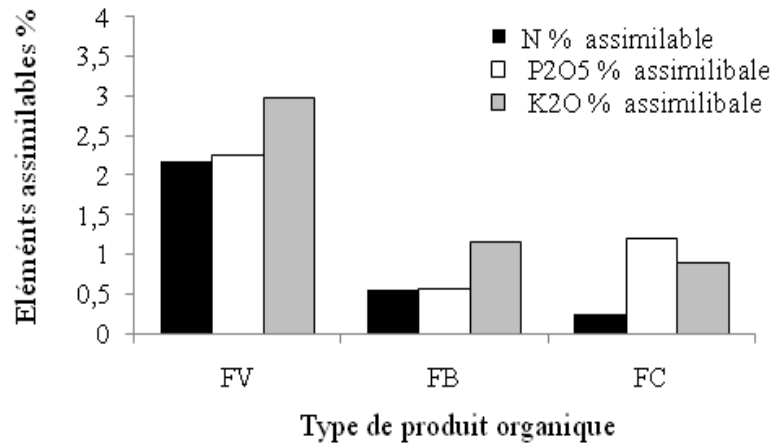
La comparaison entre la composition en éléments nutritifs majeurs et leurs valeurs fertilisantes correspondantes entre les trois fumiers montre une nette supériorité du (FV) par rapport aux deux autres fumiers. Alors que, le fumier de caprins et de bovins se classent respectivement en deuxième position pour le phosphore et le potassium (Fig 8).

3. Valeur amendante des produits organiques en fonction du type de produit organique

3.1. Rapport C/N

Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la matière organique (N'Dayegamiye et Isfan, 1991; Bernal *et al.*, 1998). Il peut être d'autre part, indirectement utilisé pour apprécier la stabilité d'un produit organique. À ce sujet, il est couramment admis que, plus le rapport C/N d'un produit est élevé, plus ce dernier se dégrade lentement dans le sol et fournit de l'humus stable (Mustin, 1987).

Les résultats obtenus montrent que le rapport C/N des différents fumiers suit l'ordre croissant suivant : FV (10.16) < FD (24.7) < FB (32.34) < FC (34.19) < RPD (56,74) (Fig 9). Ainsi, le plus bas rapport C/N a été enregistré par le fumier de volailles (FV).



FV: Fumier de Volailles; FB : Fumier Bovins ; FD : Fumier de Dromadaires

Figure 7. Teneurs en éléments fertilisants disponibles à la plante

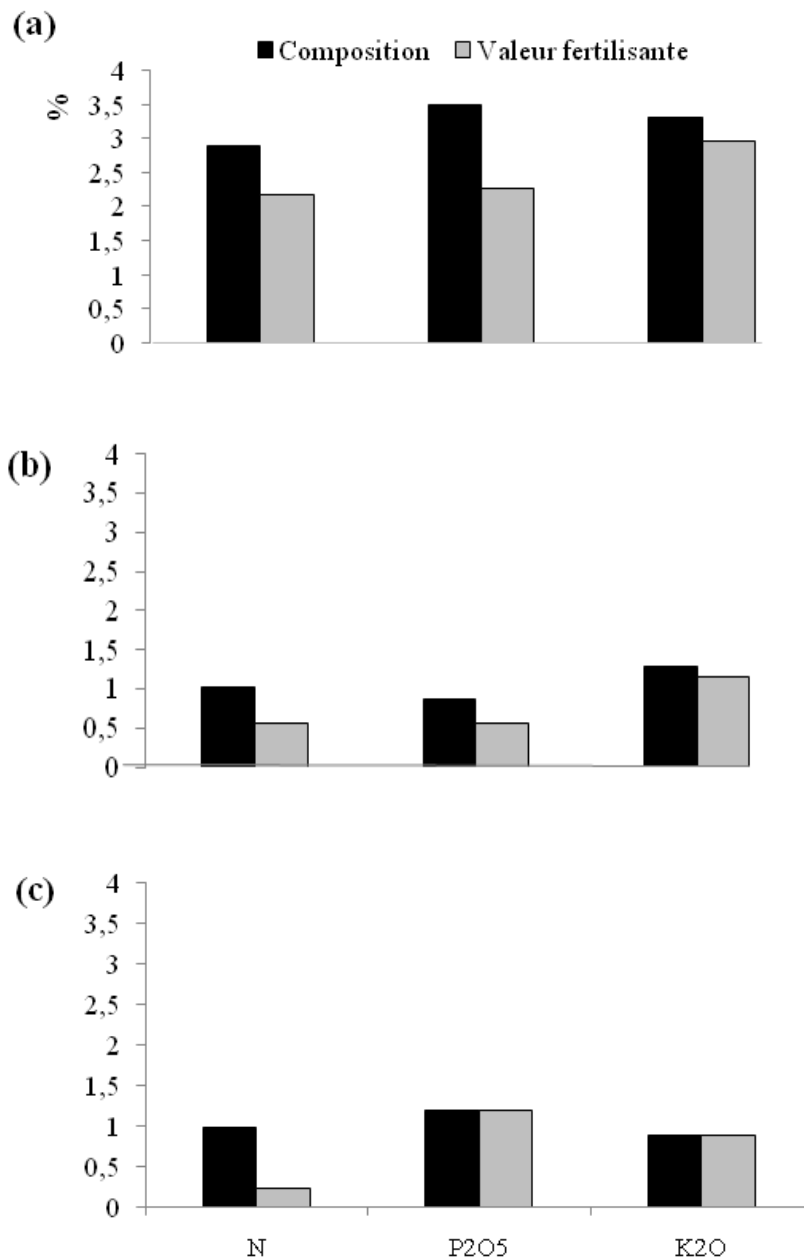


Figure 8 . Comparaison entre la composition et la valeur fertilisante des produits organiques : a. Fumier de volailles (FV), b. Fumier bovins (FB), c. Fumier de caprins(FC)

La variation du rapport C/N entre les différents produits organiques s'explique par la variabilité des intrants, par leur degré de minéralisation et surtout par leurs teneurs en azote. Le fumier de volailles se distingue nettement des autres types de produits organiques par un rapport C/N beaucoup plus bas 10.16. Ce qui est en relation avec sa teneur élevée en azote (2.9 %). Cependant, les quatre autres produits organiques à C/N plus élevé vont à l'inverse, provoquer l'immobilisation de l'azote par les microorganismes telluriques. Ces derniers ont besoin d'azote pour élaborer leurs propres molécules protéiques. L'azote ainsi réorganisé, est temporairement non disponible pour la plante, provoquant un risque de faim d'azote au niveau du sol. L'azote immobilisé n'est pas disponible immédiatement pour la plante. Il est progressivement libéré en petites quantités par minéralisation biologique (Chabalier *et al.*, 2006).

Nos résultats corroborent ceux de Azeez et Averbek (2010) et Fayed (2010), qui ont enregistré un rapport C/N bas pour le fumier de volailles (FV) en comparaison à ceux enregistrés par les fumiers de bovins et de caprins. Alors qu'il est inférieur au C/N obtenu par Al-Busaidi *et al.* (2014) pour les résidus de palmier dattier.

Sur l'aspect qualité agronomique du produit organique, Aleksander (1994) souligne qu'un rapport C/N entre 15-20 est considéré comme optimum. Au-delà de 25, des risques de faim d'azote peuvent apparaître surtout si le produit est apporté en quantité importante.

D'après Azam (2002) ; Azam et Ifzal (2006), les produits organiques avec des rapports C/N élevés sont signalés pour retarder la croissance des plantes en réduisant la disponibilité de l'azote dans le sol. Mais, en deçà de 10 la minéralisation est rapide et les risques de lessivage des éléments deviennent importants.

Par conséquent, le fumier de volailles en raison de son rapport C/N relativement bas (10.16) est prévu pour se minéraliser plus rapidement que les autres produits. En revanche, les résidus de palmier dattier (RPD) se distinguent nettement des autres produits organiques par un rapport C/N beaucoup plus élevé (56.74). Ces résidus présentent une faible sensibilité à la biodégradation. La forte teneur en matière organique de ces résidus et leur caractère « ligneux » conjugués à sa modeste teneur en azote pourraient induire des risques de faim d'azote (Alkoaik *et al.*, 2011; Al-Busaidi *et al.*, 2014).

3. 2. Caractérisation biochimique de la matière organique (CMB)

Les résultats du fractionnement biochimique des produits organiques basés sur la méthode de Van Soest enregistrent une variation notable entre les cinq produits organiques testés.

3. 2.1. Teneur en cellulose

La caractérisation biochimique de la matière organique (Fig.10) montre une nette richesse des résidus de palmier dattier en cellulose par rapport aux autres produits. Les teneurs obtenus sont de 46.32, 38.86, 37.98, 31.77 et 26.75 % respectivement pour les (RPD), (FC), (FB), (FD) et (FV).

3. 2. 2. Teneur en hémicellulose

Les analyses biochimiques réalisées mettent également en évidence des différences importantes entre les produits organiques étudiés en ce qui concerne la teneur en hémicellulose. Les taux obtenus sont de 30.11, 23.42, 22.95, 19.64 et 12.01 % respectivement pour les (RPD), (FB), (FC), (FD) et le (FV).

3. 2. 3. Teneur en lignine

Concernant la teneur en lignine, les résultats de la caractérisation biochimique des produits organiques sélectionnés montre des taux de lignine de l'ordre de 7.05, 9.52, 9.53, 8.8, et 14.12 % respectivement pour le (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD). D'après Robin (1997), dans ce compartiment, on trouve des composés très proches aux molécules organiques composant l'humus du sol. Ces molécules jouent un rôle positif sur le taux d'humification du produit organique dans le sol.

Sur le plan agronomique, la richesse relative du fumier (FB), (FD) et (FC) en composés difficilement biodégradables tels que, la cellulose et la lignine, suggère que leur action fertilisante s'étalera à long terme, et que ces matériaux seront donc sujets à une biodégradation plus lente. À ce niveau d'informations, les résultats obtenus, nous amènent à apprécier la valeur agronomique de ces fumiers (mise à part le fumier de volailles), surtout en fonction de leur valeur amendante. Ce qui a été confirmé par des rapports C/N plus élevés par rapport au (FV). En effet, leur intérêt agronomique porte essentiellement sur l'apport de matière organique

stable. L'épandage de ces produits peut donc permettre de combler un bilan organique déficitaire dans les régions sahariennes.

En revanche, les faibles teneurs en cellulose et en lignine enregistrées par le fumier de volailles (26.75 et 7.05%) par rapport aux autres produits nous amènent à apprécier sa valeur agronomique surtout en fonction de sa valeur fertilisante. Cette constatation a été confirmée par les résultats obtenus par la fraction hydrosoluble qui affiche des taux de 54.19, 39.79, 29.18, 28.2, et 9.45 % respectivement pour le (FV), (FD), (FC), (FB) et les (RPD). Ainsi, une part importante de la matière organique du fumier de volailles est présentée dans la fraction soluble (54.19 %).

Ces résultats indiquent que le (FV) ne contribue donc que faiblement à l'entretien de la matière organique du sol. Plusieurs auteurs témoignent de sa faible stabilité (Demir *et al.*, 2010 ; Azzez *et al.*, 2010 ; Delago *et al.*, 2012 ; Larney et Angers, 2012).

Les résultats obtenus montrent d'autre part, la richesse relativement élevée des RPD, FB, FC et FD en lignine et en cellulose au détriment de la fraction soluble.

Les résultats du fractionnement biochimique des produits organiques enregistrent une variation notable entre les cinq produits organiques testés.

La variabilité constatée entre les différents fumiers pour la teneur en cellulose, hémicellulose et lignine peut être expliquée par le type d'alimentation des ruminants qui est basée sur la consommation de végétaux riches en composés pariétaux, par rapport au fumier de volailles, d'où les faibles teneurs en ces composés enregistrées par ce dernier.

La différence enregistrée entre les fumiers des espèces appartenant à la classe des ruminants pour la teneur en cellulose, hémicellulose et lignine peut être liée à la faculté de chaque espèce animale à dégrader les glucides pariétaux notamment la cellulose. Les faibles teneurs en ces composés enregistrées dans le fumier de dromadaires montrent bien que cet animal métabolise mieux la cellulose et les autres glucides pariétaux par rapport autres ruminants (bovins et caprins), ce qui explique les faibles teneurs enregistrées dans son fumier par rapport aux deux autres fumiers.

D'après Chehema *et al.* (2004) et Longo-Hammouda *et al.* (2007), la digestibilité des parois cellulosiques est plus élevée chez le dromadaire que chez les autres ruminants

Les teneurs en lignine sont plutôt plus faibles que ceux obtenus par Yousif et Abdallah (2009) pour le (FD) et le (FV). Ces différences peuvent s'expliquer, d'une part par la variabilité qui peut exister dans les systèmes d'élevage et d'autre part, par les différences qui peuvent exister entre les techniques utilisées pour mesurer ces différentes fractions.

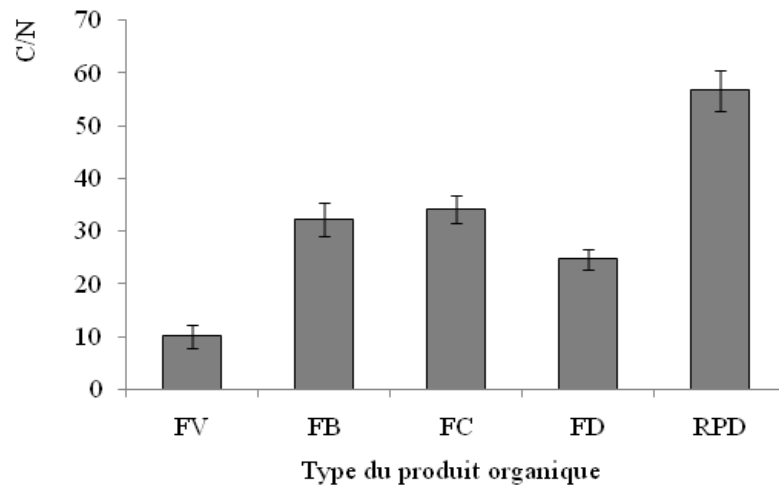
Par ailleurs, les teneurs enregistrées pour la Cellulose et lignine pour les résidus du palmier dattier sont supérieures à celles indiquées par Al-Busaidi *et al.* (2014). Ceci peut être expliqué par la richesse de notre produit en résidus ligneux (Petiole : 'cornafs', fibrillum 'lif'). En fait, la variabilité de la composition des résidus des végétaux est liée à l'organe utilisé Sall (2004).

3.3. Composition en acides humiques

Les substances humiques constituent la fraction principale de la matière organique en raison de leur effet sur l'écologie des sols, sur la structure, la fertilité, et la croissance de plantes (Huang *et al.*, 2006).

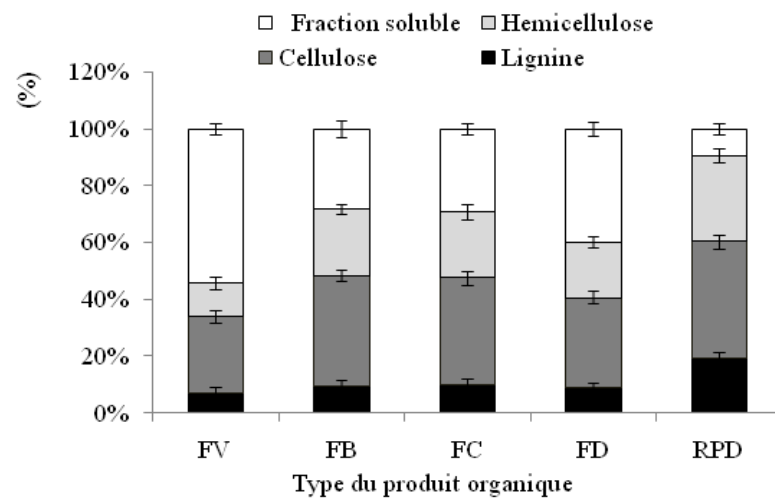
3.3.1. Acides humiques et fulviques

Les résultats du fractionnement chimique des acides humiques et fulviques des différents produits organiques sont illustrés par la figure 11. Les teneurs en acides fulviques constituent la fraction humique la plus représentée pour l'ensemble des produits organiques testés. Les valeurs enregistrées pour cette fraction sont dans l'ordre suivant : 3.72 > 1.89 > 1.53 > 1.46 > 0.62 % respectivement pour le (FV), (FD), (FC), (FB) et (RPD). À l'inverse, les teneurs en acides humiques sont moins élevées que les précédentes. Elles varient dans l'ordre suivant : 2.02 > 1.42 > 1.38 > 1.33 > 0.4 % respectivement pour le (FV), (FC), (FD), (FB) et (RPD). La conséquence de ces deux tendances est une forte diminution du rapport AH/AF pour l'ensemble des produits analysés.



*FV: Fumier de Volailles .FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaire ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)*

Figure 9. Variation du rapport C/N en fonction du type de produit organique



*FV: Fumier de Volailles .FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).*

Figure 10. Variation de la composition biochimique de la fraction organique en fonction du type de produit organique

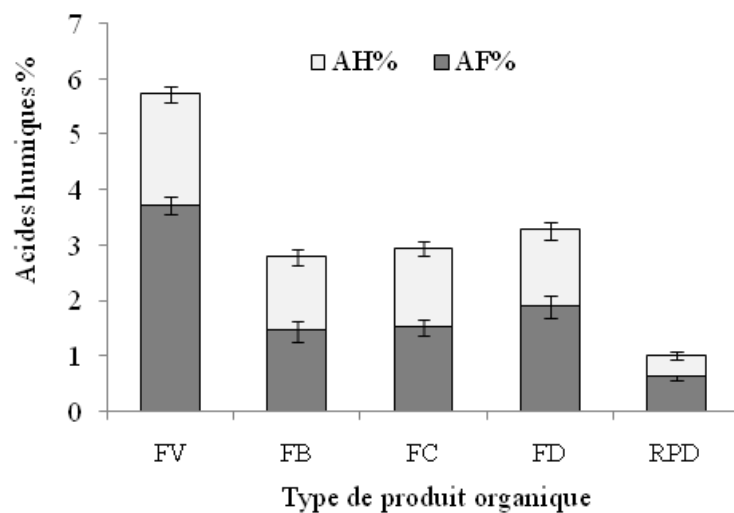
3.3.2. Rapport AH/AF

Plusieurs études ont montré que l'augmentation des acides humiques (AH) est un indicateur du degré d'humification des matières organiques et donc du degré de stabilité du produit organique (Veeken *et al.*, 2000). Huang *et al.* (2006) ont aussi signalé que l'humification des matières organiques se produit principalement à travers la fraction (AH) et peu à travers la fraction (AF). Ainsi, le rapport (AH/AF) a souvent été proposé comme indicateur des processus d'humification (Sanchez-Monedero *et al.*, 1999), et une augmentation de la teneur en acide humique par rapport à l'acide fulvique est vue comme un indicateur de la stabilité de la matière organique (Ji-ping *et al.*, 2002).

Selon Jouraiphy *et al.*(2005), l'augmentation du rapport (AH/AF) provient de la formation des acides humiques (AH) par la polymérisation des acides fulviques (AF) ou par la dégradation des substances non humiques de la fraction acides fulviques (AF), suivie par la formation de structures humiques plus polycondensées (acides humiques). Ainsi, en se basant sur les résultats obtenus, on constate que tous les produits organiques analysés sont encore en phase d'humification. Les valeurs relatives aux indices d'humification montrent la faible stabilisation des produits testés en raison de leurs faibles rapports AH/AF qui n'ont pas dépassé la valeur 1 pour l'ensemble des produits (Fig 12). Les rapports obtenus sont dans l'ordre décroissant suivant : FC = FB (0.91)>FD (0.73) >RPD (0.64) > FV (0.54).

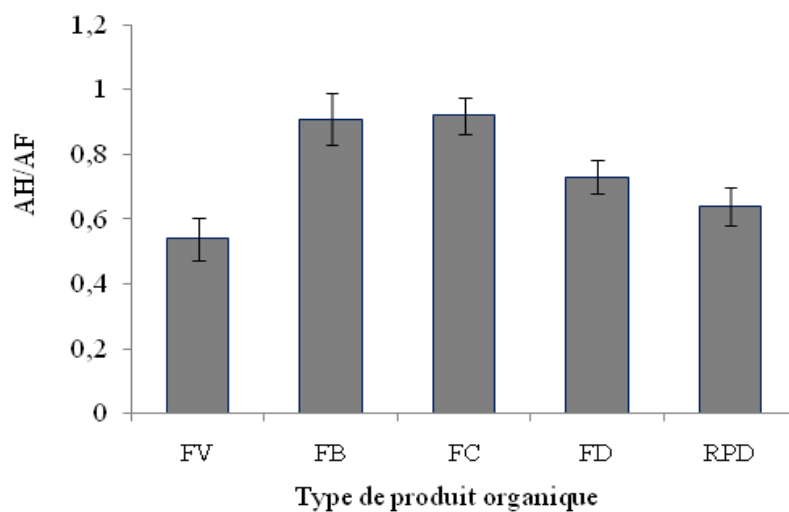
Ces résultats montrent par ailleurs, que la teneur en acides fulviques est plus élevée que la teneur en acides humiques pour tous les produits testés. Il faut toutefois, souligner que le plus faible indice d'humification a été enregistré par le fumier de volailles (FV) (0.54). Un ratio aussi faible révèle qu'une part importante de molécules organiques ne sont pas encore condensées, donc à fort potentiel de réactivité, ce qui est caractéristique d'un produit pas encore stabilisé. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Delago *et al.* (2012) qui indiquent que le fumier de volailles est un produit faiblement stabilisé. Toutefois, les autres fumiers semblent être plus stabilisés que le fumier de volailles (FV) malgré leurs faibles indices (AH/AF) enregistrés. Le faible indice d'humification (AH/AF) enregistré par les résidus de palmier dattier peut être dû à leur faible richesse en éléments nutritifs (notamment en azote) nécessaires aux microorganismes intervenant dans les processus de polymérisation et de polycondensation des composés humiques.

Ces résultats confirment la fiabilité du rapport (AH/AF) comme indicateur du degré de stabilité des produits organiques.



: FV: Fumier de Volailles ; FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
 FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)

Figure 11. Teneur en acides humiques en fonction du type de produit organique



FV: Fumier de Volailles .FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ;
 FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD)

Figure 12. Variation du rapport AH /AF en fonction du type de produit organique

IV. Conclusion du chapitre

La caractérisation analytique comparative des produits organiques testés dans le cadre de cette étude montre que la richesse du fumier de volailles en éléments majeurs et mineurs se remarque surtout au niveau N, P, K dont les teneurs sont nettement supérieures à celles des autres produits organiques. Par ailleurs, le fumier du dromadaire (FD), s'est montré plus riche en azote que les deux autres fumiers. Le fumier de bovins (FB) et de caprins (FC) ont été classés en deuxième position respectivement pour les teneurs en K et P.

La détermination des coefficients d'équivalence-engrais pour les trois produits nous a permis d'obtenir des informations utiles sur l'arrière effet de chaque produit. Ce genre d'informations paraît très intéressant pour le bon raisonnement de la fertilisation organique afin d'éviter une éventuelle sur-fertilisation.

Les résultats obtenus montrent que le fumier de volailles se classe en première position en ce qui concerne la teneur en N assimilable pendant la saison de croissance avec une teneur de 2.17 %, soit 75% de l'azote total, secondé par le fumier de bovins (FB) avec une teneur de 0.56%, soit 55% de l'azote total. Alors que, le fumier de caprins (FC), est classé en dernière position avec une teneur en N assimilable de 0.24%, soit 24.5 % de l'azote total.

Quant à la teneur en P_2O_5 disponible pendant la saison de culture, on remarque que le fumier de volailles (FV) enregistre la teneur la plus élevée en P_2O_5 avec 2.26 %, soit 65 % du P_2O_5 total, suivi par le fumier de caprins (FC) avec une teneur de 1.19%, soit 100 % de P_2O_5 total. Enfin, la dernière position a été occupée par le fumier de bovins (FB) en enregistrant ainsi, la plus faible teneur en P_2O_5 (0.56%), soit 64.36 % du P_2O_5 total.

Les résultats relatifs à la teneur en K_2O montrent que le fumier de volailles (FV) enregistre la plus grande teneur en K_2O avec 2.97 %, soit 89.72 % de la teneur en K_2O total, suivi par le fumier de bovins (FB) avec une teneur de 1.15%, soit 89.84 % de la teneur en K_2O total. En dernière position, se classe le fumier de caprins (FC) avec une teneur de 0.9 %, soit 100 % de la teneur en K_2O total.

Ces résultats montrent que, le fumier de volailles (FV) constitue un produit fertilisant efficace. Il se comporte beaucoup plus comme un engrais organique, que comme amendement organique. Ainsi, l'intérêt agronomique de ce type de fumier porte essentiellement sur les éléments fertilisants (Azote, potasse, phosphore et en micro-éléments).

Les résultats obtenus traduisent également une libération rapide de l'azote de ce fumier, ce qui implique une possibilité de lessivage des nitrates en particulier si elles ne coïncident pas avec une période de forte absorption de l'azote par les plantes. La fraction soluble est beaucoup plus importante pour ce type de fumier, au détriment de la fraction cellulosique et ligneuse, ce qui indique une faible stabilité de ce type de produit.

Pour les fumiers de caprins et de bovins, les résultats obtenus montrent qu'une bonne partie de l'azote ne sera pas immédiatement disponible pendant la saison de croissance. L'apport de la potasse est par ailleurs, très intéressant pour le fumier de bovins (FB), alors qu'un intérêt particulier a été noté pour l'apport du phosphore par le fumier de caprins (FC).

Le fumier de dromadaire (FD) présente des valeurs intermédiaires pour la majorité des caractéristiques étudiées par rapport à l'ensemble de la gamme.

Les résultats relatifs aux indices de stabilité biologique des produits testés montrent que le fumier de volailles est caractérisé par une faible stabilité en raison de ses ratios C/N et AH/AF plus faibles que les autres produits.

La richesse relative du fumier de bovins (FB), fumier de dromadaires (FD) et de caprins (FC) en composés difficilement biodégradables (Cellulose et lignine), suggère que leur action fertilisante s'étalera à long terme, et que ces matériaux seront donc sujets à une biodégradation plus lente. Les résidus de palmier dattier (RPD) sont caractérisés par une faible teneur en azote et en fraction soluble. En revanche, ils sont plus riches en lignine, hémicellulose et cellulose, les rendant relativement plus stables.

À ce niveau d'informations, les résultats obtenus, nous amènent à apprécier la valeur agronomique de ces fumiers, surtout en fonction de leur valeur amendante. Ce qui a été confirmé par des rapports de C/N et AH/AF relativement plus élevés par rapport au fumier de volailles (FV). En effet, leur intérêt agronomique porte essentiellement sur l'apport de la matière organique stable.

L'épandage de ces produits peut donc permettre de combler un bilan organique déficitaire dans les régions sahariennes.

En revanche, le manque d'informations sur la valeur fertilisante de fumier de dromadaire, impose la détermination des « coefficients équivalent engrais » spécifiques pour ce type de fumier.

Ceci nécessite de multiplier les essais d'incubation *in vitro* (Sous conditions contrôlées) et *in situ*, pour étudier le rythme de la biodégradation de ce type de fumier, tout en tenant compte des particularités édapho-climatiques de la région saharienne.

En comparaison avec les autres produits organiques, les résidus de palmier dattier (RPD) présentent des teneurs en N total, P₂O₅, MgO et en CaO beaucoup plus faibles. Par contre, ils sont plus riches en composés organiques difficilement biodégradables, ce qui, d'une part est fort intéressant dans les sols généralement pauvres et d'autre part, confère à ce produit un intérêt comparatif en tant qu'amendement organique. Ces résultats nous amènent à considérer les résidus du palmier dattier (RPD), malgré leur faible teneur en éléments fertilisants, comme susceptible de jouer un rôle important comme amendement organique.

Enfin, les résultats obtenus montrent l'importance de fonder des recommandations agronomiques sur une analyse précise et détaillée de la valeur fertilisante et amendante pour chaque type de produit organique avant son épandage au sol. Ceci est intéressant notamment dans les sols qui posent des contraintes de mise en valeur tels que les sols soumis au risque de salinisation secondaire.

Effets des produits organiques sur l'amélioration de certaines propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés

Résumé

L'efficacité de l'apport de cinq produits organiques : fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et résidus de palmier dattier (RPD) sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques d'un sol salé non cultivé a été étudiée au cours d'une période de 196 jours sous des conditions semi contrôlées. La mise en place de l'essai a été réalisée suivant un dispositif complètement aléatoire avec deux critères de classification « type de produit » et « temps d'échantillonnage ». Les produits organiques ont été appliqués à une dose de 3%. Le sol non soumis à l'apport organique a été utilisé comme témoin. Le pH, la conductivité électrique (CE), la capacité d'échange cationique (CEC) et la capacité de rétention en eau (CR) ont été mesurés à 10 temps de prélèvement (0, 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140, 168 et 196 jours). Les résultats enregistrés ont montré une amélioration significative de l'ensemble des propriétés étudiées suite à l'enrichissement du sol salé par les différents produits organiques par rapport au témoin. En effet, tous les traitements ont montré une réduction significative ($P < 0.001$) de la conductivité électrique (CE) au 56 jours de la période expérimentale, néanmoins, la réduction la plus prononcée a été enregistrée par le sol traité par (FV) avec un taux de réduction de 13.14% contre des taux de réduction de 9.96, 6.65 et 3.49 % respectivement pour (FD), (FC) et (FB) comparés à l'état initial (au temps 0 jour). Par ailleurs, une augmentation significative ($P < 0.001$) de la CEC a été enregistrée au début de la période expérimentale pour tous les traitements par rapport au sol non traité, à l'exception des résidus de palmier dattier (RPD). Toutefois, l'augmentation la plus importante de ce paramètre a été également enregistrée par (FV) au 7^{ème} jour de la période expérimentale, soit des taux d'augmentation de 106.27, 34.29, 33.05 et 22.7% respectivement par rapport au témoin, (FC), (FB) et (FD) pour la même période de prélèvement. En revanche, l'apport des résidus du palmier dattier, bien qu'il n'ait pas produit un changement notable dans les propriétés étudiées (en particulier la CE et CEC), il est clair d'après les résultats obtenus que la plus forte augmentation de la capacité de rétention en eau (CR) a été enregistrée en faveur de ce type de produit avec des taux d'augmentation de 14.35, 22.67, 23 et 63.84 % respectivement par rapport au (FD), (FB), (FC) et au témoin. Ces résultats indiquent que l'apport organique joue un rôle très important dans l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques du sol sableux salé.

Mots Clés : Salinité, Fumier, Résidus de palmier dattier, pH, Conductivité électrique (CE), Capacité d'échange cationique (CEC), Capacité de rétention en eau (CR), Zones arides.

I. Introduction

La dégradation de la qualité des sols est un problème couramment rencontré dans les agro systèmes arides (Qadir *et al.*, 2001 ; Halitim, 2011). Les caractéristiques aussi bien physiques que physico-chimiques de ces agro systèmes sont très particulières et posent d'énormes problèmes agronomiques. En plus, des problèmes de la fertilité naturelle liées aux

manque des colloïdes minéraux et organiques ; ces sols sous soumis à des fortes concentrations en sels et à une salinisation secondaire se traduisant par une sensibilité accrue à la dégradation et par des troubles d'alimentation minérale et hydrique des plantes (Rahmoune, 2008).

Quelle que soit son origine naturelle ou anthropique, la salinité dans ces régions, modifie les propriétés physiques et physico-chimiques du sol. Tejada et Gonzalez (2005) et Clark *et al.* (2007) ont montré que l'augmentation de la salinité affecte négativement la porosité totale, la densité apparente et la stabilité structurale. Par ailleurs, elle affecte également le pH, la capacité d'échange cationique (CEC) et la disponibilité des éléments nutritifs (Choudhary, 2004 ; Wichern *et al.*, 2006).

Ainsi, pour ces sols salés, soumis généralement à de faibles pluviométries, et dont l'irrigation est majoritairement effectuée par des eaux fortement minéralisées, toutes les techniques visant à leur conservation et à leur amélioration devront par conséquent se soucier de leur pouvoir de rétention en eau et en éléments nutritifs.

Dans ce cadre, une méthode possible de remediation et d'amélioration des situations dégradées est d'utiliser des produits organiques comme matières fertilisantes et amendantes aux sols. L'apport des produits organiques est devenu une pratique agronomique adéquate et indispensable pour la restauration des propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés (Hayes et Naida, 1998; Martin et Stephens, 2001; Veeresh *et al.*, 2003; Soumar *et al.*, 2003; Garcia-Gil *et al.*, 2004; Celik *et al.*, 2004; Melero *et al.*, 2007; Dridi *et al.*, 2007).

En effet, les matières organiques confèrent au sol des propriétés chimiques et physiques qui définissent son niveau de fertilité. D'après Hassine *et al.* (2008), la matière organique avec ses propriétés colloïdales, son effet acidifiant, son caractère de substance fixatrice d'éléments et son pouvoir de chélation, joue un rôle physique et chimique très important dans les sols salés.

L'augmentation de la teneur des sols salés en matière organique accélère le lessivage du Na^+ , diminue le pH, la conductivité électrique, augmente la capacité de rétention d'eau et la stabilité des agrégats (Lax *et al.*, 1994; El-Shakweer *et al.*, 1998; Tejada et Gonzalez, 2005 ; Chowdhury, 2011). En outre, dans les sols salsodiques, les apports organiques aboutissent à une plus grande adsorption de Ca^{2+} , Mg^{2+} K^+ et Na^+ conduisant à l'abaissement du sodium échangeable (ESP) du sol et du sodium adsorption ration (SAR) de la solution du sol (Murtaza *et al.*, 2009).

Par ailleurs, si l'apport organique est très préconisé pour la restauration de ces sols dégradés, cet effet est variable suivant la nature biochimique du produit organique apporté au sol (Azeez *et al.*, 2010). L'effet spécifique de l'apport organique en fonction de ses caractéristiques initiales est encore mal connu notamment dans les sols salés.

Au sujet de l'amélioration des sols salés, de nombreuses études ont été effectuées sur l'effet des amendements organiques sur leurs propriétés physiques et chimiques, à la fois au laboratoire (Tejada et Gonzalez, 2005) et dans des conditions de terrain (Delas, 1971 ; García-Gil *et al.*, 2000 ; Lakhdhar *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014). Toutefois, rares sont les recherches qui ont été menées en conditions semi contrôlées sur un sol salé non soumis à l'effet interactif de la plante.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce chapitre qui vise à comparer l'effet de cinq produits organiques : fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et des résidus de palmier dattier (RPD) sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques d'un sol sableux salé dans la région de Ouargla.

II. Matériel et méthodes

Ce chapitre se propose à évaluer l'effet de cinq produits organiques (quatre types de fumier et un résidu végétal) sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques du sol salé pendant une période de six mois (196 jours).

1. Sol utilisé

Le sol utilisé est représentatif des sols salés du Sud -est de l'Algérie. Il est classé comme sol Halomorphe à structure non dégradée salin, Hydromorphe, à amas et encroûtement gypseux de nappe, limono sableux fortement alcalin , Solontchak Gypsic Aridique et Aridisol Typic Gypsiorith Hyperthermique Laomy Sandy, respectivement pour les systèmes de classification suivants : Classification française CPCS (1967), Classification FAO (1998) et Classification Américaine (1985).

2. Produits organiques testés

Les produits organiques utilisés sont le fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et les résidus de palmier dattier (RPD). Le protocole d'échantillonnage, les méthodes adoptées pour la caractérisation analytique, les

résultats d'analyse de ces produits sont décrits en détaille dans le premier chapitre de cette partie (Chapitre 1. Caractérisation des produits organiques).

3. Dispositif expérimental et conduite de l'essai

La mise en place de l'essai a été réalisée en Mars 2009, suivant un dispositif complètement aléatoire. Il s'agit d'un essai factoriel comportant deux facteurs : le premier porte sur le type de produit organique, le second sur le temps d'échantillonnage. L'essai a été conduit sous des conditions semi-contrôlées dans des pots en PVC d'un volume de 2.5 litres, troués à la base pour faciliter l'écoulement de l'eau en excès. Le fond des pots est préalablement garni d'une couche de 3 cm de graviers pour faciliter la lixiviation des sels. Avant d'être mélangés au sol, les produits organiques sélectionnés : fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et les résidus de palmier dattier (RPD) ont été broyés à 2 mm pour homogénéiser la taille des particules, ensuite, ils ont été mélangés à l'état sec au volume de terre des pots à raison de 3 % pour chaque produit. Les mélanges obtenus ont été transférés dans les pots et humectés à la capacité au champ et maintenus à cette humidité durant toute la période expérimentale en irriguant les pots deux fois par semaine. L'eau utilisée à cet effet provient d'un forage creusé dans les couches de miopliocène (CT) au niveau de l'exploitation de l'université de Kasddi Merbah. Elle est caractérisée par une conductivité électrique de 7.32 dS m^{-1} et un pH de 8.4. Les anions sont représentés par l'ion Cl^- et SO_4^- , avec des teneurs de 40.25 et 32.08 meq L^{-1} respectivement. Alors que, les cations sont dominés par l'ion Na^+ et Ca^{++} , soient des teneurs de 30.22 et 13.45 meq L^{-1} . Selon la classification établie par Durand pour l'Algérie (1983), l'eau utilisée est inadéquate pour l'irrigation dans les conditions ordinaires, mais elle peut l'être lorsque les sols sont perméables avec un bon drainage.

Les pots ainsi préparés ont été déposés dans une serre semi-contrôlée, au niveau de l'exploitation du Département des Sciences Agronomiques de l'université de Ouargla. Chaque traitement a été répété trois fois.

L'expérience en pot nous a permis de contrôler notre essai d'éliminer l'effet de la nappe et l'effet de la culture (Effet rhizosphérique et celui des résidus des végétaux).

3.1. Traitements

Les traitements correspondent à cinq types de produits organiques et à un traitement (Témoin) sans aucun apport pendant toute la durée de l'expérience. Les traitements sont donc :

- Sol non enrichi (Témoïn) (NE) ;
- Sol enrichi en fumier de volailles (FV) ;
- Sol enrichi en fumier de bovins (FB) ;
- Sol enrichi en fumier de caprins (FC) ;
- Sol enrichi en fumier de dromadaire (FD) ;
- Sol enrichi en résidus de P. dattier (RPD).

3.2. Dates et modalités de prélèvement des échantillons

Au cours de la période expérimentale qui s'est échelonnée sur une durée de 6 mois, à compter de la date d'épandage des produits organiques, des échantillons de sols ont été collectés à 10 temps : un état initial au moment de l'apport des différents produits organiques (0 jours : 1 Avril 2009), une semaine après l'apport (2^{ème} prélèvement : 8 Avril 2009), deux semaines après l'apport (3^{ème} prélèvement : 15 Avril 2009), quatre semaines après l'apport (4^{ème} prélèvement : 30 Avril 2009). Ensuite, l'intervalle des prélèvements a été prolongé à un laps de temps de 1 mois jusqu'à la fin de la période expérimentale.

Ainsi, à chaque date, des échantillons représentatifs prélevés de chaque type de traitement ont été acheminés au laboratoire dans des sacs en papier kraft, séchés à l'air libre et soumis aux analyses.

3.3. Données mesurées (analyses effectuées sur les mélanges)

Les mesures sont portées sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques les plus liées à l'effet positif de la matière organique en tenant compte des particularités pédologiques qui caractérisent notre sol à savoir la forte salinité et la texture sableuse. Ces propriétés sont la conductivité électrique (CE), le pH, la capacité d'échange cationique (CEC) et la capacité de rétention en eau (CR).

4. Méthodes d'analyse

4.1. Méthodes d'analyse du sol

La validité des méthodes internationales utilisées est surtout remise en question lorsqu'il s'agit des sols des zones arides et plus particulièrement ceux où le pourcentage des sels à faible solubilité est élevé, tel est le cas de gypse (sulfate de calcium) et les carbonates de calcium. Ainsi la présence de gypse dans le sol peut conduire à des résultats erronés sur de multiples niveaux.

L'analyse granulométrique peut être erronée, par suite de la floculation, de perte de poids au séchage et d'inadéquation de paramètres de prélèvement (Viellefon, 1979).

Le dosage du gypse par suite de la présence éventuelle de fractions plus ou moins déshydratées qui ne sont pas diversifiées par le dosage chimique qui porte les ions SO_4^{--} (Viellefon, 1979).

La détermination de la CEC et l'explication des résultats, par suite de la dissolution des sels solubles de calcium empêchent la saturation des sites d'échange par le cation utilisé (Baise, 2000).

En fait, ces sels libèrent par dissolution du Ca^{++} qui entre en compétition avec l'ion saturant. Il s'avère ainsi que l'utilisation habituelle de l'acétate d'ammonium à pouvoir dissolvant élevé (méthode de Metson) pour extraire les bases échangeables serait très sujet aux erreurs d'analyse.

De même, la présence de calcaire concourt à fausser les résultats analytiques notamment la détermination de la CEC où il est délicat de distinguer le calcium échangeable, du calcium provenant de la dissolution des carbonates de calcium.

Compte tenu de toutes ces considérations, pour ce travail on a essayé de faire adapter les méthodes analytiques aux particularités édaphiques de notre région d'étude, tout en adoptant dans la mesure de possible des méthodes spécifiques aux sols salés.

*** Granulométrie**

La méthode utilisée est basée sur la loi de STOCKES. Différents traitements chimiques préalables servent à obtenir une bonne dispersion des particules élémentaires. Un premier traitement assure la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée, un deuxième assure la destruction du calcaire par HCl, ensuite une longue agitation dans l'eau suffit en présence d'un sel dispersant (hexaméta-phosphate de sodium). Après une sédimentation libre sous l'action de la gravité, les particules tombent avec des vitesses constantes, d'autant plus grandes qu'elles sont plus grosses. Ainsi la fraction fine (argile : 0-2 μm et les limons fins : 2-20 μm) a été prélevée par la pipette de ROBINSON et la fraction grossière (sable grossier : 200-2000 μm , sable fins : 50-200 μm , limons grossiers : 20-50 μm) a été obtenus par tamisages successifs.

* **Densité apparente**

La densité apparente a été estimée par la méthode du cylindre. Elle représente le rapport entre la masse sèche du sol et le volume apparent. L'échantillon est prélevé à l'aide d'un cylindre à bout tranchant, taré préalablement. Il s'agit d'enfoncer verticalement le cylindre dans le sol. Le prélèvement doit être fait avec précaution pour que le volume soit exact sans qu'il ait de rajouts ni tassement. Une fois l'échantillon prélevé, on le fait passer à l'étuve à 105°C pendant une nuit au moins.

* **Humidité**

L'humidité du sol a été mesurée parallèlement à la densité apparente par séchage des échantillons du sol à l'étuve à 70°C. Cette température de séchage a été choisie en raison de la richesse des sols de Ouargla en gypse (Hamdi Aïssa, 2001). En fait, le séchage à 105 °C, permet l'extraction de l'eau de constitution du gypse (Viellefon, 1979). Les échantillons du sol ont été tarés puis séchés dans l'étuve à 70 °C pendant 48 heures. Ensuite, ils ont été refroidis puis pesés. La teneur en eau a été calculée suivant la relation suivante :

$$\text{Hu (\%)} = \frac{PF - PS}{PS} \times 100$$

- *PF : Poids frais*
- *PS : Poids sec*

* **Capacité de rétention**

La capacité de rétention en eau a été déterminée par la presse à membrane de Richards (1965). Les échantillons ont été introduits dans des anneaux placés sur la membrane. L'humectation par capillarité assure la saturation de l'échantillon pendant 24 heures. Les membranes sont introduites dans des marmites de Papin et soumises aux pressions 0.3 bars. Une heure après les échantillons sont pesés, mis à l'étuve pendant 24 heures à 105 C°, puis pesés à l'état sec. La capacité de rétention est exprimée selon la formule suivante :

$$\text{CR (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100$$

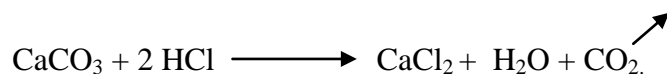
- *P₁ : Poids de l'échantillon humide*
- *P₂ : Poids de l'échantillon sec*

* **Gypse**

Le taux de Gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) a été déterminé par la méthode de Coutinet (1965). Elle a comme principe l'extraction des sulfates par une eau chaude acidulée après précipitation du calcium par les carbonates d'ammonium, et la précipitation des sulfates sous forme de sulfate de baryum, en présence de BaCl_2 .

***Calcaire total**

Il a été déterminé par la méthode volumétrique à l'aide du calcimètre de BERNARD, c'est à dire par la mesure du volume de CO_2 dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) en excès sur un poids connu de sol :



Le CO_2 dégagé est comparé à celui obtenu par un poids connu de carbonate de calcium pur.

***Réaction du sol**

Le pH a été mesuré avec un pH mètre à électrode en verre, avec un rapport sol/eau (1/2.5).

***Conductivité électrique**

La C.E du sol (25°C) a été mesurée par un conductimètre d'une suspension d'un rapport : sol/eau de 1/5 (Aubert, 1978).

***Détermination de la capacité d'échange cationique**

La détermination de la capacité d'échange cationique (CEC ou T) a été effectuée par une méthode spéciale mise en point par Orsine et Rémy (1976), dont le principe se base sur la mise en contact l'échantillon du terre par une solution de chlorure de cobaltihexammine $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ de concentration connue. Les ions $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ vont déplacer les cations du complexe adsorbant et se fixer sur celui-ci. Dans la solution recueillie lors de la saturation, on retrouve les cations échangeables et les ions obtenue par différence entre, la quantité d'ions dans la solution initiale et celle restante après la mise en contact avec le sol. Les cations échangeables ont été déterminés dans le même extrait que la capacité d'échange cationique. La solution d'extraction n'étant pas tamponnée, le pH de l'échange est proche des conditions du sol en place.

***Bilan ionique**

Le bilan ionique est effectué sur des extraits aqueux : terre /solution eau 1/5. Il consiste à analyser les anions SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- et CO_3^{--} et les cations Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ (Aubert, 1978).

Dosage des anions solubles :

- Carbonates et bicarbonates (CO_3^- et HCO_3^{--}) : Les carbonates et bicarbonates ont été dosés sur l'extrait 1/5 par acidimétrie avec H_2SO_4 en présence d'un indicateur phénophtaléine pour les carbonates et le méthylorange pour les bicarbonates.
- Sulfates (SO_4^-) : Les sulfates ont été déterminés par la méthode gravimétrique qui se base sur la précipitation des sulfates par BaCl_2 dans un milieu acide.
- Chlorures (Cl^-) : Le chlore a été déterminé par la méthode de MOHR. Dans cette méthode le chlore est précipité par du nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition d'un précipité rouge de chromate d'argent.

Dosage des cations solubles:

- Na^+ et K^+ : ont été dosés au spectrophotomètre à flamme.
- Ca^{++} et Mg^{++} : ont été dosés au spectrophotomètre d'adsorption atomique.

*** Dosage du carbone organique et détermination de la matière organique**

Le dosage du carbone organique a été effectuée par la méthode Anne (1945), dont le principe consiste à oxyder la matière par un oxydant puissant (le bichromate de potassium) à chaud et en présence d'acide sulfurique, l'excès de bichromates est dosé par une solution titrée de sel de Mohr (sulfate ferreux), en présence d'indicateur coloré (diphénylamine). La teneur en matière organique est obtenue par la formule :

$$\text{MO (\%)} = \text{Carbone (\%)} \times 1.72$$

*** Dosage de l'azote total**

Le dosage de l'azote total est effectué par la méthode de KJELDAHL qui comprend deux étapes. La digestion du sol par acide concentré et des catalyseurs mixtes. En fin la distillation de solution digérée et l'estimation de l'azote.

*** Dosage de phosphore assimilable**

Le dosage du phosphore assimilable est réalisé selon la méthode d'Olsen (Olsen *et al.*, 1954) qui extrait les orthophosphates par une solution de bicarbonate de sodium. Le dosage du phosphore est réalisé par colorimétrie basée sur la formation et la réduction d'un complexe phosphomolybdique qui s'accompagne d'une coloration bleue mesurée au spectrophotomètre à 820 nm.

4.2. Méthodes d'analyse des produits organiques

La caractérisation analytique (physique, physico-chimique et biochimique) des produits organiques testés, ainsi que, les méthodes utilisées sont présentées dans le chapitre 1 de cette partie.

4.3. Méthode de traitements des données

Les résultats obtenus sont soumis à l'analyse de la variance à deux facteurs (type de produit organique et temps de prélèvement) en utilisant le R-commander (Rcmdr) (R Développent Core Team, 2013) comme logiciel statistique pour les calculs. Lorsque le test de Fisher est significatif à un coefficient de sécurité de 95 %, les différences des moyennes entre les traitements sont testées selon la distribution de groupes homogènes de Newman-Keuls au seuil de 5%. Des coefficients de corrélations de Pearson entre les variables étudiés ont été également déterminés.

III. Résultats et Discussion

1. Caractérisation initiale du sol avant l'apport organique

Les caractéristiques physiques et physico-chimiques initiales du sol avant l'apport organique sont résumées dans le tableau 1. Le sol utilisé dans le présent essai est caractérisé par une texture sableuse, un faible taux d'argile (7.1 %), une faible teneur en matière organique (0.63 %), un pH alcalin (8.46) et une conductivité électrique élevée (CE) (2.35 dS m⁻¹). Les teneurs en éléments nutritifs majeurs sont très faibles avec des teneurs de 0.0061%, 0.48 cmol⁺ Kg⁻¹ et 25.32 mg kg⁻¹ respectivement pour l'azote, le potassium et le phosphore assimilable. Les résultats analytiques ont montré également que ce sol est caractérisé par une faible capacité d'échange cationique (CEC) (7.37 cmol kg⁻¹), alors qu'on note qu'il est bien pourvu en calcium.

2. Caractérisation des produits organiques (avant apport au sol)

Les caractéristiques physiques, physico-chimique et biochimiques des produits organiques sélectionnées avant leur emploi au sol sont présentées et discutées dans le premier chapitre de cette partie (Chapitre 1. Caractérisation des produits organiques).

Tableau 1. Caractéristiques physiques et physico – chimiques initiales du sol avant l’apport organique (30 cm)

Paramètre		Sol Salé (SS)
Granulométrie	Argile (%)	07.11 ± 0.51
	Limon fin (%)	08.69 ± 0.17
	Limon grossier (%)	17.10 ± 0.27
	Sable fin (%)	32.65 ± 2.10
	Sable grossier (%)	34.45 ± 2.36
Densité apparente (%)		01.36 ± 0.27
Capacité rétention de l'eau (%)		20.84 ± 1.78
Gypse (%)		20.02 ± 2.01
Calcaire (%)		2.57 ± 0.40
Salinité globale CE _{1/5} (dS m ⁻¹)		2.35 ± 0.32
Réaction du sol (pH eau _{1/2.5})		8.46 ± 0.46
P _{assi} (mg kg ⁻¹)		25.32 ± 1.66
Caractéristiques Biochimiques	C.Org (%)	00.36 ± 0.05
	N (%)	0.0061 ± 0.01
	MO (%)	00.63 ± 0.05
Complexe adsorbant. (cmol ⁺ Kg ⁻¹)	Mg ⁺⁺	1.01 ± 0.12
	Ca ⁺⁺	4.33 ± 0.57
	Na ⁺	1.55 ± 0.03
	K ⁺	0.48 ± 0.03
	CEC (T)	7.37 ± 0.62
Bilan anionique de l'extrait _{1/5} (meq l ⁻¹) (Solution du sol)	Cl ⁻	12.80 ± 0.9
	SO ₄ ⁻⁻	13.67 ± 0.7
	HCO ₃ ⁻	00.70 ± 0.1
	CO ₃ ⁻⁻	-

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

3. Effet du type de produits organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur les propriétés du sol (Après mélange)

3.1. Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) est une propriété physique du sol qui affecte directement la productivité des cultures.

Elle exprime la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon du sol, c'est-à-dire son degré de salinité (Kalyani *et al.*, 2013). En effet, tous les éléments majeurs et mineurs essentiels à la croissance de la plante sont absorbés sous forme de cations ou d'anions. Ainsi, la valeur de la CE du sol indique le degré de disponibilité des nutriments pour augmenter ou pour abaisser le rendement des plantes.

Les résultats de l'analyse statistique relatifs à la conductivité électrique ont montré des différences significatives pour les deux facteurs étudiés, ainsi que de leur interaction.

Les résultats de l'analyse statistique relatifs à la conductivité électrique ont montré des différences significatives pour les deux facteurs étudiés, ainsi que de leur interaction.

3.1.1. Effet du type du produit organique sur conductivité électrique (CE)

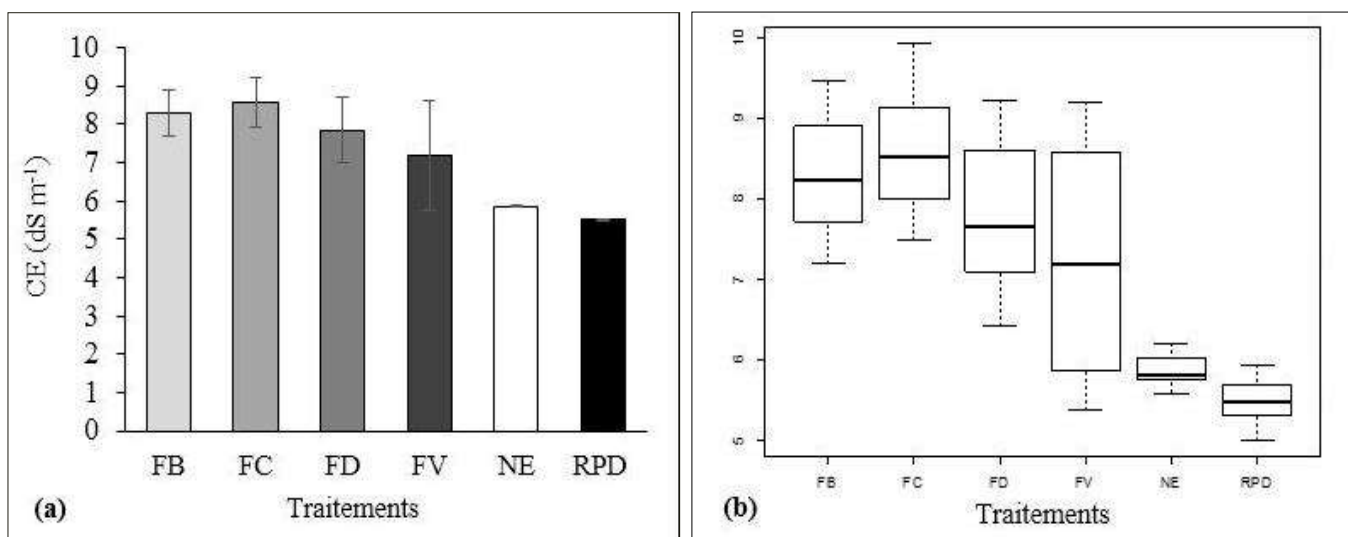
L'analyse de la variance a stipulé un effet significatif ($P < 0.001$) du type de produit organique sur la conductivité électrique (Tableau 1, Annexe II.2). Les moyennes obtenus sont de 8.58, 8.29, 7.84, 7.19, 5.86 et 5.5 dS m⁻¹ respectivement pour le (FC), (FB), (FC), (FV), (Témoin) et les (RPD) (Fig 1.a). Ces moyennes sont classées d'après le test de Newman Keuls (TNK) en cinq groupes homogènes bien distincts où chaque produit organique a formé un groupe homogène à part. Le premier groupe (**a**) présenté par le sol traité par (FC), le deuxième groupe (**b**) présenté par le sol traité par le (FB), le troisième groupe (**c**) correspond au sol traité le (FD), le quatrième groupe (**d**) présenté par le sol traité par le (FV), le sixième groupe (**e**) présenté par le sol non traité (témoin) et le dernier groupe (**f**) présenté par le sol traité par les (RPD) (Annexe II.2). L'effet significatif du type de produit organique sur la conductivité électrique est bien illustré dans les boîtes à moustaches (Fig 1.b).

Il est clair d'après les résultats obtenus que l'apport des différents produits organiques (à l'exception des (RPD) au sol salé a fait augmenter la conductivité électrique de 22.7, 33.78, 41.46 et 46.41 % respectivement pour le sol traité par le (FV), (FD), (FB) et (FC) par rapport au témoin. En revanche, les (RPD) ont au contraire réduit la CE de 6.54 % par rapport au témoin. L'augmentation des valeurs de la conductivité électrique (CE) observées en réponse à l'apport organique sont dues à la forte libération des éléments minéraux suite au processus de la biodégradation des produits organiques apportés au sol.

Des résultats analogues ont été obtenus par plusieurs auteurs Stamatiadis *et al.* (1999) et Ahmed *et al.* (2010), qui ont indiqué que l'apport organique fait hausser la conductivité électrique du sol.

Ces résultats vont à l'encontre de l'idée communément admise que le fumier de volailles est caractérisé par un effet salinisant du sol plus élevé par rapport aux autres fumiers. En fait, contrairement aux travaux de plusieurs auteurs Walker et Bernard (2008), Li-Xian *et al.* (2007), Demir *et al.* (2010), Oagile et Namasiku (2010), Ahmed *et al.*, (2010) et Delago *et al.* (2012) qui ont rapporté que le fumier de volailles augmente la salinité du sol par rapport aux autres fumiers, c'est au niveau du sol traité par ce type de fumier de volailles (FV) qu'on a enregistré le plus faible taux d'augmentation de la CE par rapport au témoin 22.7 % contre des taux de 33.78, 41.46 et 46.41 % respectivement pour le (FD), (FB) et le (FC).

La faible augmentation de la CE du sol en présence de fumier de volailles (FV), peut être expliquée par la présence des déchets ligneux sous forme de copeaux de bois dans le fumier de volailles et qui sont en mesure de réduire sa conductivité électrique (Oustani, 2006).



FB : Fumier de bovins ; FC : Fumier de caprins ; FD : Fumier de dromadaires ; FV: fumier de volailles ; RPD : Résidus de palmier dattier ; NE :Sol non enrichi (Témoin)

Figure 1. a. Variation de la conductivité électrique (CE) en fonction du type de produit organique ; **b.** Effet du facteur temps sur l'homogénéité de la variance

3.1.2. Effet du temps de prélèvement sur la conductivité électrique (CE)

L'évolution de la conductivité électrique (CE) au cours de l'essai n'a enregistré aucune différence significative entre les temps de prélèvement de zéro jour à 28^{ème} jour. Toutefois, la comparaison entre les temps de prélèvements a révélé des différences significatives ($P < 0.001$) entre 28, 56, 84 et 112^{ème} jours de l'expérience (Annexe II.2).

En général, les valeurs de la CE enregistrent une notable augmentation aux premières semaines (de 7^{ème} jour jusqu'à 28^{ème} jour) par rapport au temps zéro. Après cette initiale

augmentation, ce paramètre montre une diminution progressive jusqu'à la fin de la période expérimentale (Fig 2.a). Les moyennes enregistrées pour ce paramètre au cours de l'essai sont de 7.74 dS m⁻¹ (0 jour), 7.87 dS m⁻¹ (7 j^{ème}), 7.91 dS m⁻¹ (14 j^{ème}), 7.85 dS m⁻¹ (28 j^{ème}), 7.27 dS m⁻¹ (56 j^{ème}), 6.98 dS m⁻¹ (84 j^{ème}), 6.77 dS m⁻¹ (112 j^{ème}), 6.61 dS m⁻¹ (140 j^{ème}) et 6.54 dS m⁻¹ (168 j^{ème} et 196 j^{ème}). Le test de Newman-Keuls (TNK) effectué sur le facteur temps a permis d'identifier quatre groupes homogènes : le premier groupe **(a)** rassemble (0, 7, 14 et 28^{ème} jours) > le deuxième groupe **(b)** correspond au (56^{ème} jour) > le troisième groupe **(c)** correspond au (84^{ème} jour) > le quatrième groupe **(d)** regroupe (112, 140, 164 et 196 jours de l'essai) (Annexe II.2).

L'effet significatif du temps de prélèvement sur la conductivité électrique est bien illustré dans boîtes à moustaches (Fig 2.b).

Ces tendances d'évolution des valeurs de la conductivité électrique (CE) montrent que la conductivité électrique (CE) est négativement corrélée avec le temps, Ainsi, les valeurs de ce paramètre diminuent au cours de l'essai (Fig 3).

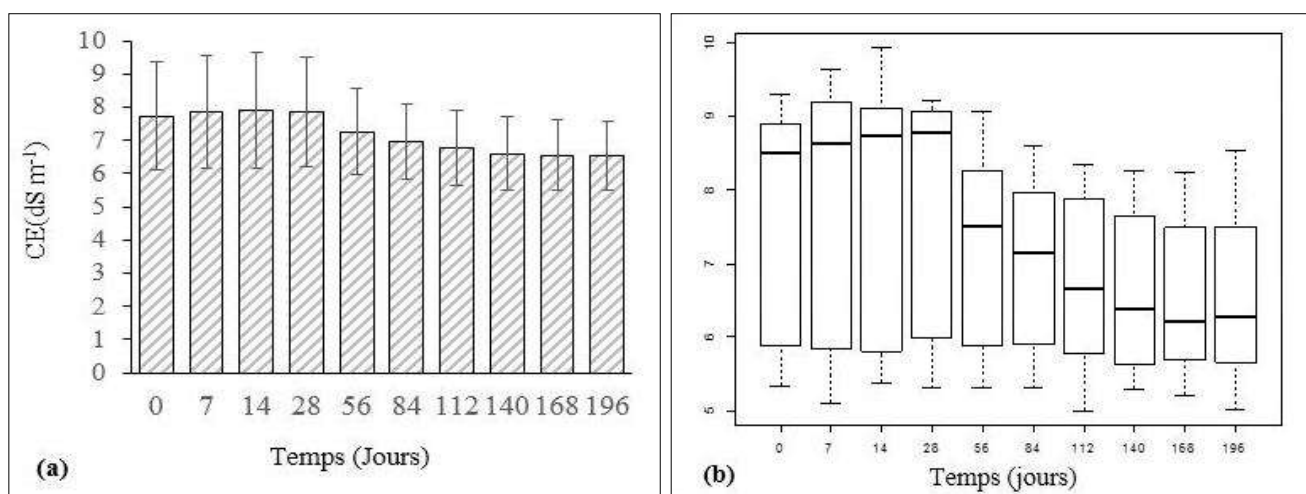


Figure 2.a. Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction du temps ; **b.** Effet du facteur temps sur l'homogénéité de la variance

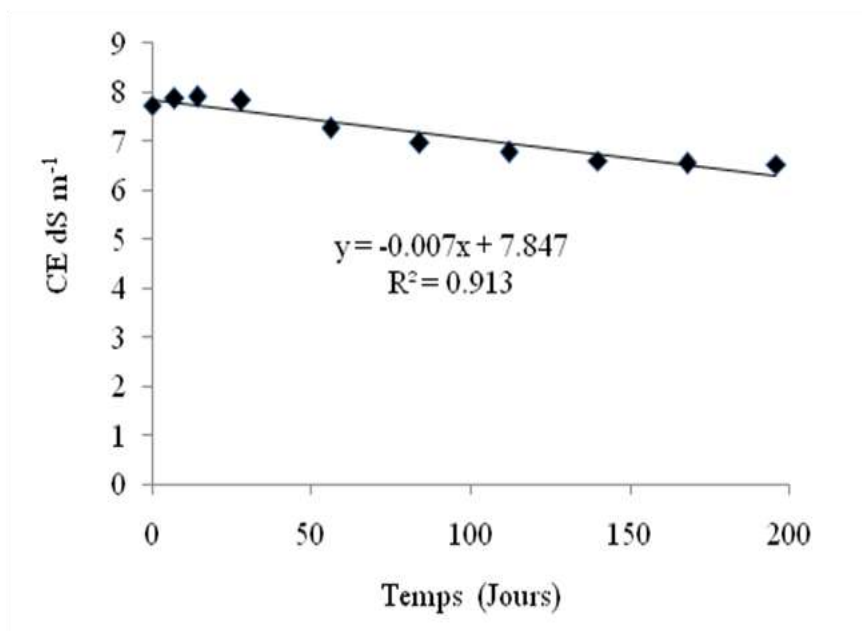


Figure 3. Relation entre la conductivité électrique (CE) et le temps de prélèvement

3.1.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur le conductivité électrique (CE)

L'interaction entre le type de produit organique et le temps de prélèvement montre des différences significatives pour la conductivité électrique (CE) ($P < 0.001$) (Annexe II.2).

Les résultats obtenus ont montré une augmentation significative des valeurs moyennes de la CE au début de l'expérience (quatre premières semaines de la période expérimentale) pour tous les traitements par rapport au sol non traité à l'exception des résidus de palmier dattier (RPD). Toutefois, l'augmentation la plus importante a été enregistré par le (FC) au 14^{ème} jour (3^{ème} prélèvement), avec un taux d'augmentation de 60 % par rapport au témoin au temps zéro. Après cette initiale augmentation, ce paramètre enregistre une diminution significative jusqu'à la fin de l'expérience (Fig. 4).

Ainsi, la conductivité électrique enregistre une réduction significative pour tous les traitements à l'exception des (RPD) à partir du 56^{ème} jour (5^{ème} prélèvement) de l'essai. Néanmoins, la réduction la plus prononcée à ce temps de prélèvement a été enregistrée par le (FV). Soit un taux de réduction de 13.14%, contre des taux de 9.96, 6.65 et 3.49 % respectivement pour le (FD), (FC) et (FB) comparé à l'état initial. Cette réduction se poursuit jusqu'à la fin de l'expérience.

Alors qu'à la fin de la période expérimentale (après 196 jours), la plus forte réduction de la CE a été enregistrée par le sol traité avec le (FV) avec un taux de réduction de 34.50 % par rapport à l'état initial (sol traité par FV au zéro jour). Tandis que, les autres traitements enregistrent des taux de réduction beaucoup plus faibles de 0, 14.99, 13.84 et 19.10 % respectivement pour (RPD et Témoin), FB, FC et FD par rapport à leurs états initiaux pour la même période de prélèvement (au zéro jour).

Quant à la comparaison des valeurs de la conductivité électrique (CE) des différents produits organiques à la fin de la période expérimentale par rapport au témoin pour la même période de prélèvement montre que seulement le (FV) a réduit la conductivité électrique du sol avec un taux de réduction de 4.45%. Tandis que, les trois produits restants ont augmenté ce paramètre de 29.10, 35.27 et 18.15% respectivement pour le FB, FC et FD.

Par ailleurs, les résultats obtenus ont permis de constater que la conductivité électrique (CE) du sol témoin et du sol traité par les (RPD) suivent presque la même tendance. Ces deux traitements n'ont subi qu'une légère variation tout au long de la période expérimentale, par contre, celle des sols enrichis par les autres produits a diminué significativement au cours de l'essai. Le décroissement de la CE a dépassé 2.9 unités pour le (FV), ce qui témoigne bien le rôle bénéfique de ce type de fumier dans la réduction de la salinité du sol.

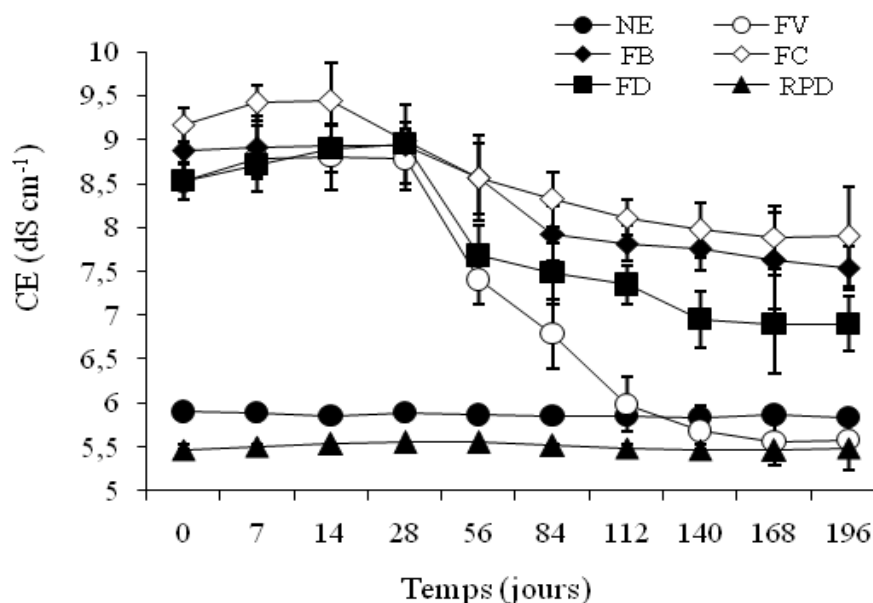
Ce taux de réduction de la CE enregistrée par la présente étude est plus élevé à ce obtenu par Mallouhi (1982), qui a enregistré (dans un essai similaire réalisé sur un sol argileux) un abaissement de la conductivité électrique d'une unité et demie, suite à l'enrichissement d'un sol salé par un fumier de ferme.

L'augmentation de la salinité observée aux premières semaines de l'essai est corrélée avec la minéralisation des produits organiques apportés au sol, surtout que les conditions édapho-climatiques de notre région d'étude y sont favorables. D'après Birch (1958), Totain (1979), Oustani (2006), la matière organique est rapidement minéralisée dans les sols sableux sous climat chaud et sous irrigation.

A ce titre, une étroite corrélation a été observée entre la CE et les composés issus de la biodégradation de la matière organique dans le sol (Eigenberg *et al.*, 2002; Gulser *et al.*, 2010).

Quant à la diminution de la CE aux dernières semaines de l'essai, elle peut être due à l'arrêt de la minéralisation des composés organiques facilement biodégradables qui ont été probablement libérés au cours de la première phase.

Par ailleurs, la lixiviation des ions inorganiques peut également expliquer l'abaissement de la CE vers la fin de l'essai. En fait, l'irrigation continue des pots a probablement augmenté la lixiviation des sels. D'après, Jalali et Ranjbar (2009), Kahlon *et al.*, (2012), la matière organique s'avère d'une grande efficacité dans l'inhibition des effets de la salinité en favorisant le lessivage des sels en excès.



EN : sol non enrichi FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).

Figure 4. Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction du type de produit organique au cours de la période expérimentale

3.2 Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur le pH du sol

Le pH, est l'une des propriétés chimiques du sol la plus couramment mesurée. Il influence directement la croissance des plantes étant un facteur majeur affectant la disponibilité des éléments nutritifs. En fait, un pH trop basique ou trop acide peut provoquer une carence en éléments nutritifs (Lakhdhar *et al.*, 2008 ; Lakhdhar *et al.*, 2009 ; Kalyani *et al.*, 2013). Dans les sols salés, les pH élevés diminuent la disponibilité des éléments nutritifs. Alors que, l'enrichissement de ces sols en matières organiques abaisse leur pH et augmente la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Walker *et al.*, 2004).

Les résultats obtenus montrent que le pH du sol est influencé à la fois par le type du produit organique et par le temps de prélèvement, néanmoins, il est clair d'après l'analyse

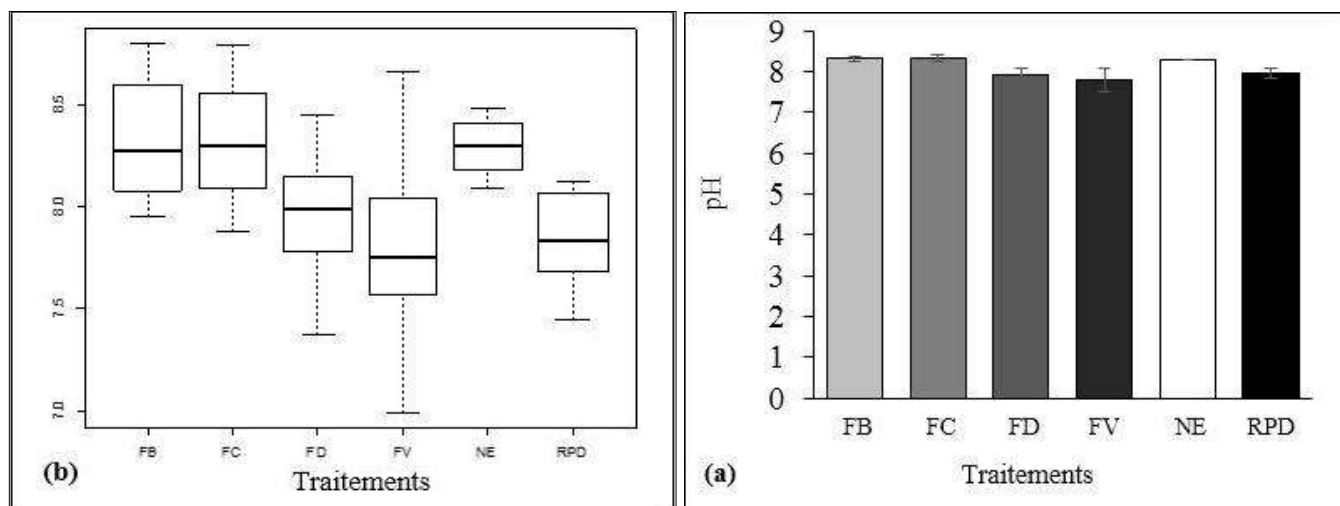
statistique que ce paramètre est significativement plus influencé par le type de produit organique, que par le temps de prélèvement (Annexe II.2).

3.2.1. Effet du type de produit organique sur le pH du sol

Les résultats obtenus montrent que le pH varie significativement en fonction du type de produit organique apporté au sol. L'analyse de la variance a mis en évidence des différences significatives ($P < 0.001$) entre les différents produits organiques et le témoin (sans apport) d'une part, et entre eux d'autre part. Les moyennes obtenues sont de 8.33, 8.31, 8.29, 7.94, 7.78 et 7.83 respectivement pour le (FC), (FB) et le témoin (sans apport), (FD), (FV) et les (RPD) (Fig 5.a).

Le test de Newman Keuls (TNK) (Annexe II.2) a fait ressortir quatre groupes homogènes. Le premier groupe **(a)** rassemble le traitement du sol par le (FC), (FB) et le sol non traité, secondé par le groupe **(b)** où figure le sol traité par le (FD), le troisième groupe **(c)** présenté par le sol traité par les (RPD) et le quatrième groupe **(d)** présenté par le sol traité par le (FV).

Les boîtes à moustache représentent bien ces différences (Fig 5.b). Le pH le plus bas a été enregistré par le traitement du sol par (FV), alors que, le pH le plus élevé a été enregistré par le sol traité par le (FC).



B : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; FV: Fumier de Volailles ; RPD : Résidus de Palmier Dattier ; NE :Sol Non enrichi (Témoin)

Figure 5. a. Variation du pH en fonction du type de produit organique ; **b.** Effet du type de produit organique sur l'homogénéité de la variance

La variation des valeurs de pH observée entre les différents types de produits organiques peut être expliquée par la différence dans leur composition biochimique, de leur acidité initiale et de leur rapport C/N. Par ailleurs, les résultats obtenus ont montré que le (FV), le (FD) et les (RDP) ont significativement réduit le pH du sol salé de 6.15, 5.54 et 4.22 %, tandis que, le (FC) et le (FB) ont légèrement augmenté ce paramètre de 0.48 et 0.24 % respectivement par rapport au sol témoin.

Théoriquement, il est bien connu que l'apport de la matière organique fait diminuer le pH des sols salés (Choudhary *et al.*, 2004; Li et Keren, 2009; Ouni *et al.*, 2013). Toutefois, dans la présente étude, ce constat n'était clair que pour le fumier de volailles (FV), le fumier de dromadaire (FD) et les résidus de palmier dattier (RPD), dans la mesure où le fumier de caprins (FC) et le fumier de bovins (FB) ont au contraire augmenté le pH par rapport à l'état initial.

D'après Larney et Angers (2012), les amendements organiques peuvent avoir des effets variables sur le pH du sol dépendant de leur origine et de leur composition initiale.

De ce fait, ces constatations doivent être prises en considération dans les programmes de fertilisation des sols notamment ceux exposés aux fortes concentrations en sels. Des observations similaires ont été obtenues par d'autres auteurs Mokolabate et Haynes (2002) et Wang *et al.* (2014) qui ont également noté une variation notable du pH du sol en réponse à l'apport organique et qui semble être liée à la composition biochimique et au pH initial de chaque produit apporté au sol.

L'abaissement du pH observé après l'apport de certains produits est lié aux acides organiques et minéraux, tels que, l'acide lactique, l'acide acétique, les acides aminés, l'acide phosphorique et l'acide sulfurique, libérés lors de la décomposition des produits organiques apportés au sol (Sommers *et al.*, 1984).

La comparaison des valeurs de pH entre les différents produits organiques testés a montré que le pH du sol traité avec le fumier de volailles (FV) est significativement plus faible que tous les autres produits (exception faite au sol traité par les résidus de palmier dattier). La réduction du pH suite à l'application de fumier de volailles (FV) au sol salé a été rapportée par plusieurs auteurs (Choudhary *et al.*, 2004).

En effet, l'aptitude de ce fumier à abaisser le pH du sol est lié à sa richesse en composés azotés par rapport aux autres produits (Azzez *et al.*, 2010), intensifiant ainsi le processus de nitrification.

Dans le même ordre d'idée, le pH relativement moins élevé enregistré par le fumier de dromadaire (FD) par rapport au fumier de bovins (FB) et de caprins (FC) est due à sa teneur relativement plus élevée en azote nitrique.

En revanche, contrairement aux produits précédemment cités, le fumier de bovins (FB) et de caprins (FC) ont légèrement augmenté le pH du sol par rapport au témoin, ce qui peut être lié à leur teneurs élevées en cations basiques (tel que K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}), à la production d'ions OH^- et à leur faibles teneurs en nitrates par rapport au fumier de volailles (FV) (Azeez *et al.*, 2010 ; Mahapatra *et al.*, 2013).

Le faible pH enregistré par le sol traité par les résidus de palmier dattier (RPD) peut être lié à la faible acidité caractérisant ce produit par rapport au pH du sol témoin et ce des autres produits.

Contrairement à nos résultats, Turies *et al.* (2000) n'a signalé aucune variation significative du pH du sol salé suite à son enrichissement en produits organiques.

3.2.2. Effet du temps de prélèvement sur le pH

Les résultats relatifs à l'évolution du pH en fonction du temps sont présentés dans la figure 6 (a). Une variation significative du pH a été mise en évidence tout au long de la période expérimentale ($P < 0.05$) (Annexe II.2). Néanmoins, la comparaison des temps de prélèvements entre eux (Temps d'échantillonnage) montre une forte réduction dans les valeurs du pH aux premières semaines de l'essai et qui se poursuit par une légère variation pour le reste de la période expérimentale. Ce paramètre enregistre une diminution significative aux premières semaines de l'essai (7, 14 et 28^{ème} jours) par rapport à l'état initial (0 jours), puis après cette initiale acidification, une augmentation du pH à partir du 5^{ème} prélèvement (56^{ème} jour) s'étalant jusqu'à la fin de l'expérience est observée.

Les moyennes obtenues sont dans l'ordre décroissant suivant : 8.29 (0 j) > 8.13 (196 j^{ème}) > 8.12 (168^{ème} j) > 8.11 (112^{ème} j) > 8.10 (140^{ème} j) > 8.08 (84^{ème} j) > 8.03 (56^{ème} j) > 7.98 (28^{ème} j) > 7.97 (7^{ème} j) > 7.95 (14^{ème} j).

Le TNK a révélé trois groupes homogènes bien distincts (Annexe II.2) : le groupe (a) correspond au jour (0 j) de la période expérimentale, le groupe (ab) où figurent (56, 84, 112, 140, 168, 196^{ème} jours) de la période expérimentale et le groupe (b) où figurent (7, 14 et 28^{ème}

jours) de la période expérimentale. Ces différences sont bien mentionnées dans les boîtes à moustache présentées dans la figure 6 (b).

L'abaissement des valeurs du pH du sol traité par les différents produits organiques au début de la période expérimentale (Premières semaines) est dû à la libération des acides organiques à chaîne courte, principalement de l'acide lactique et de l'acide acétique et des acides organiques et des acides issus de la biodégradation de ces produits (Sommers *et al.*, 1984; Chamoun et Legros, 1989; Eklind *et al.*, 1997 ; Chlaoldahy *et al.*, 2011).

Lorsque les microorganismes digèrent la matière organique, ils libèrent des acides organiques. Dans les premiers stades de la biodégradation, ces acides sont souvent accumulés, ce qui justifie l'abaissement du pH. Cette diminution stimule la croissance des microorganismes notamment des champignons qui vont attaquer la lignine et la cellulose. En général, ces acides organiques sont soumis à une dégradation supplémentaire au cours de l'essai, ce qui explique l'augmentation du pH pour le reste de l'essai.

Cette élévation pourrait être également attribuée à la libération des quantités de NH_3 générées par les réactions biochimiques des matériaux azotés contenus dans les produits organiques (Tai et He, 2007).

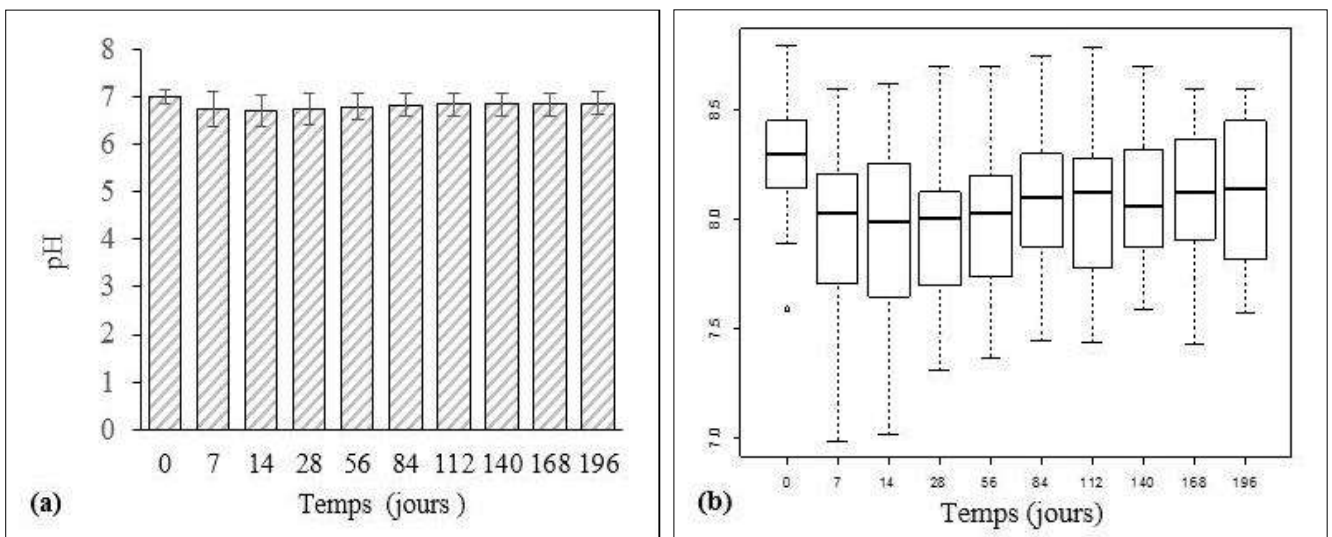


Figure 6. a. Variation du pH en fonction du temps ; **b.** Effet du facteur temps sur l'homogénéité de la variance

3.2.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur le pH du sol

L'interaction des deux facteurs (Type de produit organique et temps) n'a montré aucune différence significative sur le pH. Néanmoins, il est clair qu'au début de l'expérience, les valeurs de celui-ci ont diminué dans tous les traitements (premières semaines de l'essai). Cependant, après cette acidification initiale, le pH a enregistré une augmentation à partir du 5^{ème} prélèvement (56^{ème} jour) notamment pour le FC et le FB. Par ailleurs, le sol traité par les RPD et le sol témoin n'ont montré aucun changement notable du pH tout au long de la période expérimentale (Fig. 7).

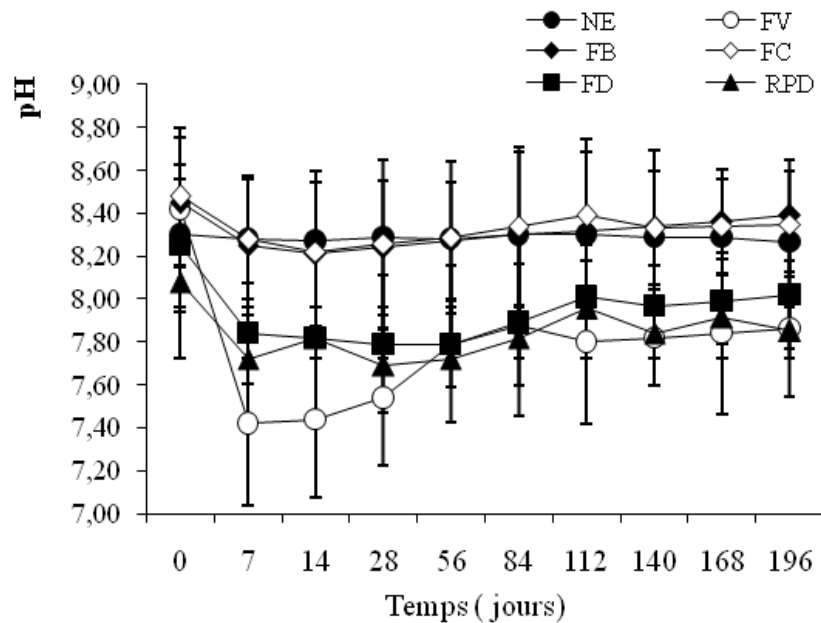
Toutefois, malgré l'absence de l'effet significatif pour l'interaction des deux facteurs étudiés, il est possible d'observer que le pH le plus bas (7.42) a été enregistré par le traitement du sol avec le FV, après une semaine de la période expérimentale, soit un taux de réduction de 10.60 % par rapport au témoin, tandis que le pH le plus élevé a été enregistré par le traitement du sol par le FC au départ de l'expérience (0 jours de la période expérimentale) avec un pH de 8.48.

À la fin de la période expérimentale (au 10^{ème} prélèvement), le FV a abaissé le pH du sol par 0.52 unités par rapport au sol témoin. Cet abaissement est plus élevé que ce qui a été enregistré par Horswill *et al.* (2007) dans un essai de longue durée, au cours duquel, ils ont rapporté un abaissement de pH de 0.2 - 0.4 unités suite à l'apport organique.

L'abaissement des valeurs de pH du sol traité par les différents produits organiques au début de la période expérimentale (premières semaines) est dû à la libération des acides organiques produits par la biodégradation de ces produits. Ces acides sont ensuite soit dégradés ou volatilisés. Ces deux processus combinés conduisent à une élévation du pH pour le reste de l'expérience. Cette élévation de pH peut atteindre des valeurs proches aux premiers jours notamment pour le (FB) et le (FC).

Le faible changement de pH des résidus de palmier dattier (RPD) au cours de l'essai peut être expliqué par la présence des quantités plus élevées en composés difficilement biodégradables (lignine et cellulose) par rapport aux autres produits.

Dans le sol témoin, aucun changement significatif dans les valeurs de pH n'a été observé tout au long de la période expérimentale.



EN : sol non enrichi FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).

Figure 7. Evolution du pH en fonction de type de produit organique au cours de la période expérimentale

3.3.3. Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la capacité de rétention en eau (CR)

La capacité de rétention en eau constituée un important facteur abiotique affectant le rendement des plantes dans les régions arides et semi-arides (Lakhdhar *et al.*, 2008 ; Mylavarapu et Zinati, 2009). D'après Balesdent (1996), dans certains agro systèmes arides, la réserve en eau du sol est peut être insuffisante pour alimenter la production jusqu'à maturité et seuls les amendements organiques permettent d'augmenter la réserve en eau au-delà du seuil nécessaire à une production acceptable.

Grâce à son caractère hydrophile, la matière organique contribue à enrichir le sol en eau et par la suite à augmenter sa résistance à la sécheresse (Demolon, 1968 ; Chareau, 1975).

Selon Mustin (1987), l'humus absorbe très facilement l'humidité et ne la perd que lentement de sorte que le sol reste humide longtemps pendant la période sèche.

La capacité de rétention en eau est influencée d'une manière significative par le type d'apport organique et par le temps de prélèvement. Toutefois, l'interaction des deux facteurs n'a montré aucune différence significative entre les différents traitements pour ce paramètre.

3.3.3.1. Effet du type de produit organique sur la capacité de rétention en eau (CR)

L'apport organique au sol provoque une augmentation significative ($P < 0.001$) de la capacité de rétention de l'eau par le sol allant de 19.06 à 63.84 % par rapport au sol non enrichi (Annexe II.2). Les moyennes obtenues sont de 20.77, 24.73, 27.67, 27.74, 29,76 et 34.03 % respectivement pour le témoin, (FV), (FC), (FB), (FD) et les (RPD) (Fig 8.a).

Il est clair d'après les résultats obtenus que la capacité de rétention en eau la plus élevée par rapport au témoin a été enregistrée par les (RPD). Ces derniers enregistrent des taux d'augmentations de 14.35, 22.67, 23, 37.6 et 63.84 % respectivement par rapport au (FD), (FC), (FB), (FV) et au témoin. Alors que, le plus faible taux d'augmentation par rapport au témoin a été enregistré par le fumier (FV) (19.06 %). Quant au fumier de (FD), il a été classé en deuxième position en augmentant la CR de 43.28 % par rapport au témoin. Le (FC) et le (FB) enregistrent des taux d'augmentations de la CR presque similaires de l'ordre de 33.22 et 33.55% par rapport au sol témoin.

Le TNK a permis de classer ces moyennes en cinq groupes suivant l'ordre croissant suivant : le premier groupe **(a)** présenté par les (RPD) > le groupe **(b)** correspond au (FD) > **(c)** présenté à la fois par le (FB et FC) > **(d)** présenté par le (FV) > le groupe **(e)** présenté par le témoin (Annexe II.2).

L'effet significatif du type de produit organique sur la capacité de rétention en eau est bien illustré dans les boîtes à moustaches (Fig 8.b).

Ces résultats sont en concordance avec ceux de Ahmed *et al.* (2007) qui ont montré que l'apport de matière organique au sol sableux à forte perméabilité fait augmenter la capacité de rétention en eau. Cette hausse serait de 10 à 30 % (Henin, 1969 ; Delas, 1971).

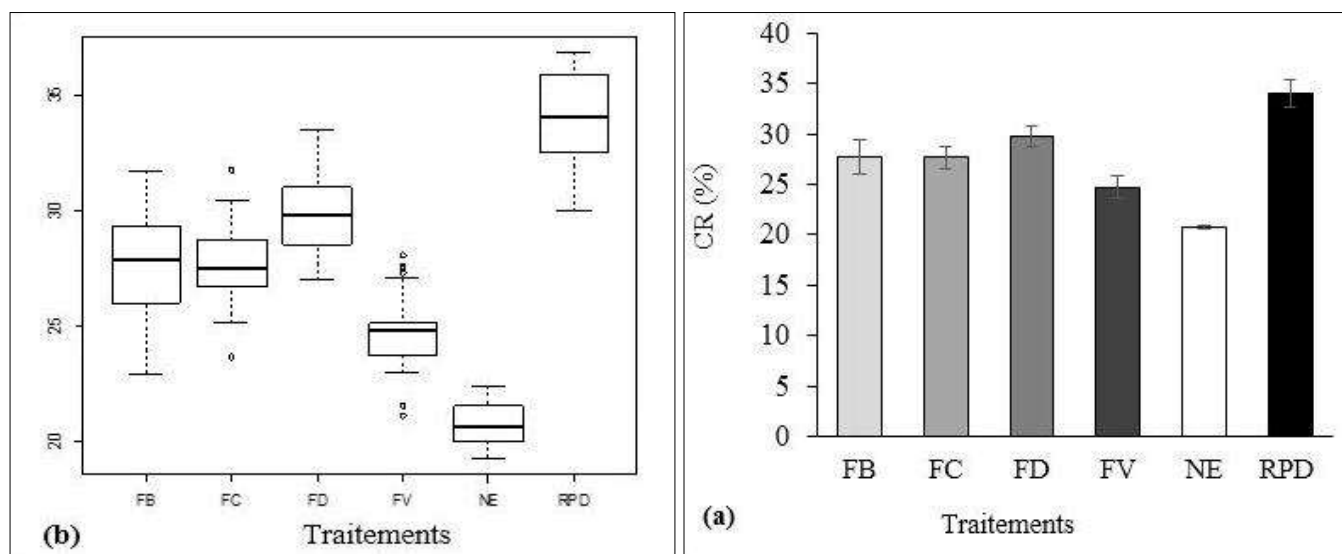
Les résultats obtenus par la présente étude indiquent bien l'effet spécifique de type de produit organique sur la de rétention en eau (CR). D'après Larney et Angers (2012), l'impact des apports organiques sur la teneur en eau est susceptible d'avoir plus d'importance dans les sols sableux dégradés que dans les sols à texture fine. Par conséquent, l'apport de la matière organique est très justifié pour les sols des zones arides où le sable constitue la majeure partie de la fraction minérale. Important à rappeler aussi, que notre sol est caractérisé par une forte concentration en sels, ce qui a probablement contribué à augmenté la capacité de rétention en eau (CR) du sol.

L'augmentation de la capacité de rétention en eau (CR) en réponse aux apports organiques peut être expliquée par l'affinité de la matière organique à l'eau, en raison de la grande surface d'absorption de ses charges électriques internes.

Les substances humiques présentent une grande affinité vis-à-vis les molécules de l'eau. Elles se comportent comme des éponges en vers elles (Annabi, 2004). A l'état d'humus, la matière organique peut retenir 15 fois son poids d'eau (Mustin, 1987).

Par ailleurs, les polysaccharides probablement synthétisés par les microorganismes, en particulier au début de la décomposition de la matière organique peuvent jouer un rôle important comme agent de liaisons biologiques responsables de l'agrégation et de la stabilité structurale (Khaleel *et al.*, 1981; Grandy *et al.*, 2002). Ce qui améliore par conséquent la capacité de rétention en eau.

Les différences significatives enregistrées pour les valeurs de la capacité de rétention en eau (CR) entre les différents types de produits peuvent être expliquées par la variabilité dans leur composition biochimique.



FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; FV: Fumier de Volailles ; RPD : Résidus de Palmier Dattier ; NE :Sol Non enrichi (Témoin)

Figure 8. a. Variation de la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du type de produit organique ; **b.** Effet du type de produit organique sur l'homogénéité de la variance

3.3.2. Effet du temps de prélèvement sur la capacité de rétention en eau (CR)

La capacité de rétention en eau présente des différences significatives entre les temps de prélèvements ($P < 0.001$) (Annexe II.2). Les moyennes correspondantes sont de 27.94, 28.23,

28.35, 28.40, 28.29, 27.90, 27.00, 26.32, 26.04 et 25.99 % respectivement pour 0, 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140, 168 et 196^{ème} jours de la période expérimentale (Fig. 9 a.b). Le test TNK a illustré trois groupes homogènes : le groupe (a) rassemble (0, 7, 14, 28, 56 et 84^{ème} jours) > le groupe (ab) correspond au (112 jour) > le groupe (b) regroupe (140, 168 et 196^{ème} jours) (Annexe II.2).

Ces résultats montrent que la capacité de rétention en eau la plus élevée a été enregistrée aux trois premiers mois de l'expérience, puis plusieurs diminutions significatives de la CR ont été observées qui débutent après le 84^{ème} jour (6^{ème} prélèvement), suivies par une stabilisation relativement sensible des valeurs de ce paramètre vers la fin de la période expérimentale. Nos résultats ne corroborent pas ceux de Demolon (1968), Chareau (1975) et Tejada *et al.* (2006), où il a été signalé que la capacité de rétention en eau (CR) augmente avec la stabilisation de la matière organique (Autrement dit avec la synthèse de l'humus).

Ceci nous laisse supposer que l'origine de l'augmentation de ce paramètre dans notre sol est liée aux composés hydrocarbonés contenus dans la matière organique fraîche (MOF) et aux substances humiques, initialement présentes dans les différents produits organiques. Donc, il ne peut s'agir d'une éventuelle stabilisation de la matière organique au cours de l'essai, puisqu'il n'a duré que 6 mois, durée bien insuffisante pour une stabilisation des produits organiques apportés.

En fait, la conjugaison de la forte salinité, la nature sableuse de notre sol et les conditions climatiques ont probablement entravé les processus de la synthèse de l'humus notamment les processus de polycondensation et de polymérisation des produits organiques (Mallouhi, 1982 ; Oustani, 2006).

Les résultats obtenus montrent d'autre part, que la capacité de rétention en eau (CR) est négativement corrélée avec le temps. Ainsi, les valeurs de ce paramètre diminuent au cours de l'essai comme il est illustré dans la figure 10.

Ceci appuie une fois de plus, que la hausse de la CR est liée à la matière organique fraîche et non pas à la stabilisation de cette dernière au cours du temps

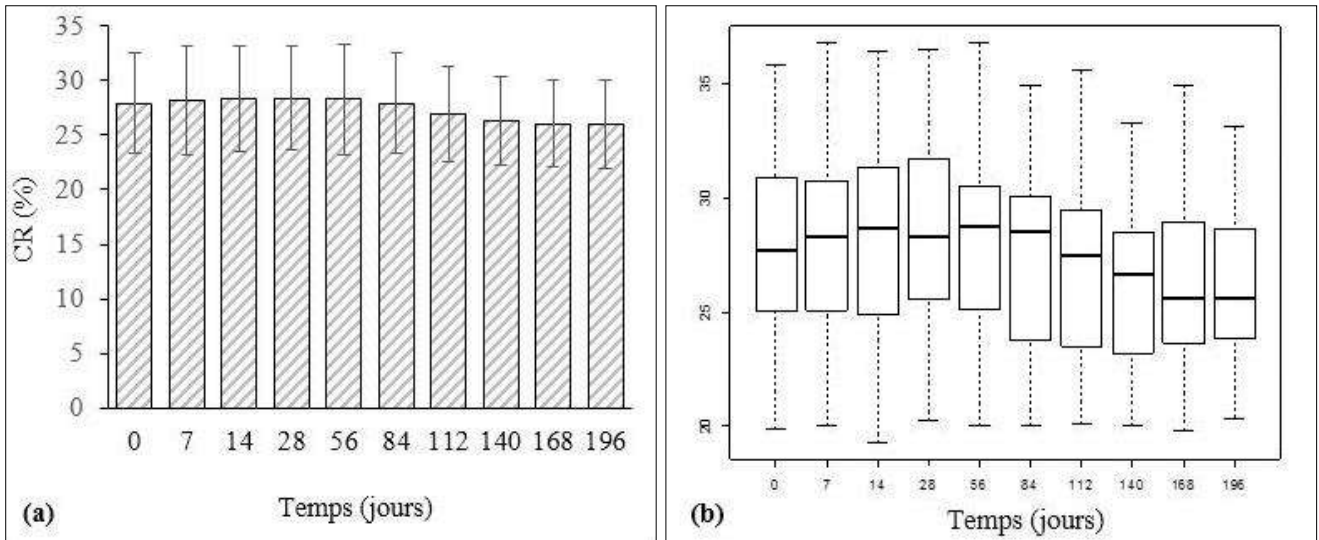


Figure 9.a. Evolution de la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du temps ; **b.** Effet de du temps sur l'homogénéité de la variance

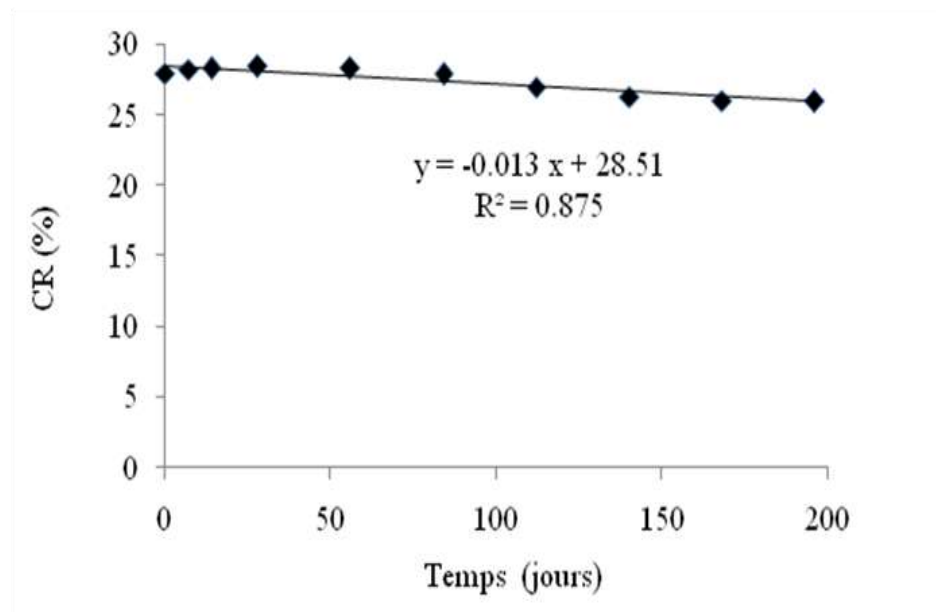
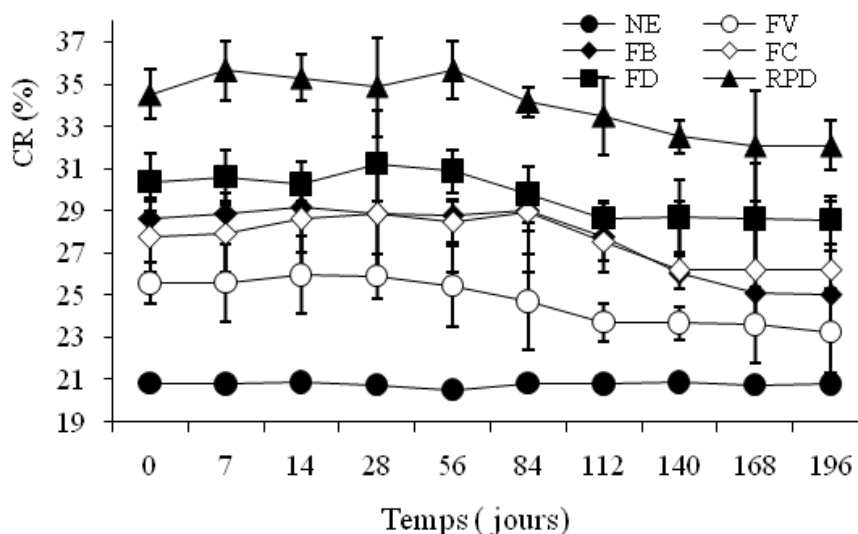


Figure 10. Relation entre la capacité de rétention en eau (CR) et le temps de prélèvement

3.3.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps sur la capacité de rétention en eau (CR)

L'analyse statistique n'a montré aucun effet significatif pour la capacité de rétention en eau pour l'interaction (Type de produit organique \times temps de prélèvement), toutefois, l'évolution de ce paramètre au cours du temps a montré que la CR la plus élevée a été enregistrée par les résidus de palmier dattier au premiers mois de l'essai, alors que la plus faible a été observée au niveau du sol non soumis à l'apport organique (Témoin) tout au long de l'expérience (Fig.11).



EN : sol non enrichi FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).

Figure 11. Evolution de la capacité de rétention en eau (CR) en fonction du type de produit organique au cours du période expérimentale

3.4. Effet du type de produit organique, temps de prélèvement et de leur interaction sur la capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) décrit la capacité d'un sol à retenir des cations sur les colloïdes du sol en raison de charges négatives. Elle peut être définie comme le nombre de cations adsorbés par unité de poids de cent gramme de sol sec. L'augmentation de la matière organique du sol est susceptible d'augmenter la CEC. Selon Vaughan *et al.* (1985) et Brady et Weil (2008), grâce à ses propriétés chélatrices, la matière organique augmente la capacité d'échange cationique des sols, limite le lessivage de certains éléments et permet la détoxification, en complexant les métaux lourds. Les matières organiques sont, dans beaucoup de sols pauvres (Cas des sols sableux), la principale composante du complexe adsorbant, c'est à dire la seule

source des charges retenant les cations, d'où l'intérêt des apports organiques dans ce type de sols.

Les résultats de l'analyse statistique relatifs à la capacité d'échange cationique montrent des différences significatives pour les deux facteurs étudiés et de leur interaction.

3.4.1. Effet type du produit organique sur la capacité d'échange cationique (CEC)

Les effets des produits organiques sur la CEC sont présentés dans la figure 12 (a). La CEC augmente significativement avec l'apport organique ($P < 0.001$) (Annexe II.2). Toutefois, la tendance de cette augmentation en fonction du type de produit suit l'ordre décroissant suivant : fumier de volailles ($13.94 \text{ cmol kg}^{-1}$) > fumier de dromadaire ($11.54 \text{ cmol kg}^{-1}$) > fumier de caprins ($10.58 \text{ cmol kg}^{-1}$) > fumier de bovins ($10.41 \text{ cmol kg}^{-1}$) > résidus de palmier dattier ($7.61 \text{ cmol kg}^{-1}$) > T ($7.59 \text{ cmol kg}^{-1}$). Les taux d'augmentation correspondants par rapport au témoin sont de 83.66, 52.04, 39.39 et 37.15 et 0.26 % respectivement pour FV, FD, FC, FB et les RPD.

Des résultats similaires ont été obtenus par Kasongo *et al.* (2011), qui ont montré que l'application de la matière organique augmente la capacité d'échange cationique du sol, en particulier dans le cas des sols sableux.

Il est évident d'après les résultats obtenus, que la CEC la plus élevée a été enregistrée par le FV, alors que la plus faible a été enregistrée à la fois par les RPD et le témoin. Ces résultats sont confirmés par le test de classement des moyennes qui a mis en évidence quatre groupes homogènes : le groupe (a) présenté par le FV, le groupe (b) présenté par le FD, le groupe (c) regroupe le FC et le FB et enfin le groupe (d) qui rassemble les RPD et le témoin (Annexe II.2). L'effet significatif du type de produit organique sur la capacité d'échange cationique est bien illustré dans les boîtes à moustaches (Fig 12.b).

L'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) en réponse à l'apport organique est due à la forte charge négative de la matière organique. Ceci est très important pour retenir les éléments nutritifs et de les rendre disponibles pour les plantes (García-Gil *et al.* 2004; Diacono et Montemurro, 2010).

La capacité d'échange de la matière organique est plus élevée que celle des argiles (Gobat *et al.*, 1998 ; Baize, 2000; Pedra *et al.*, 2008). Les chiffres obtenus varient de 100 à 500 cmol Kg^{-1} de sol pour la matière organique contre 100 à 150 $\text{cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ de sol pour les argiles

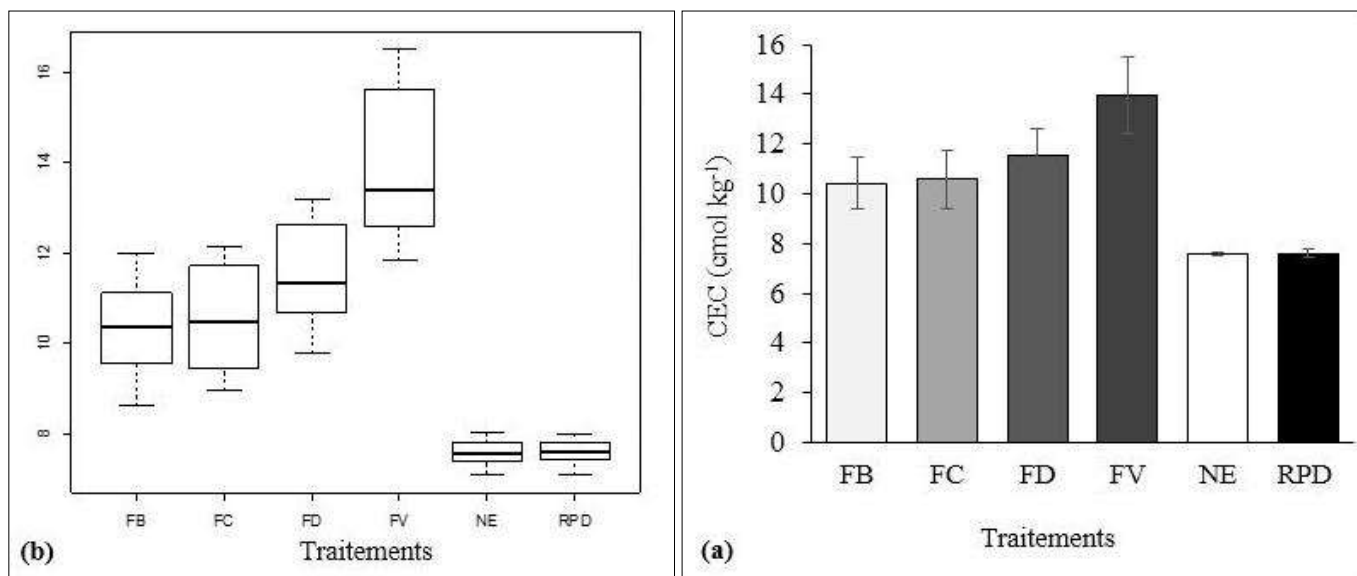
(Mustin, 1987; Baize, 2000). La grande dispersion des résultats s'explique par le fait que la capacité d'échange dépend du degré d'oxydation de la matière organique apportée au sol. Plus il est fort, plus il y a de groupes carboxyles acides.

La CEC est également variable suivant la nature de la matière organique apportée au sol (Hahn et Quideau, 2013).

Les résultats obtenus du présent essai montrent que la CEC est significativement plus élevée dans le sol traité par le fumier de volailles par rapport aux autres produits. Des résultats similaires ont été obtenus par Lax (1991), Bernal *et al.* (1992), Walker et Bernal (2004) et Clark *et al.* (2007).

La forte échangeabilité liée au fumier de volailles est due à sa teneur relativement élevée en substances humiques par rapport aux autres produits.

La faible CEC enregistrée dans le sol traité par les RPD et qui semble être similaire à celle du sol témoin, peut être expliquée par la faible réactivité de ce produit organique, suite à sa faible teneur en substances humiques, ainsi qu'à sa faible conductivité électrique par rapport aux autres produits.



FB : Fumier de bovins ; FC : Fumier de caprins ; FD : Fumier de dromadaire ; FV : Fumier de volailles ; RPD : Résidus de palmier dattier ; NE : Sol non enrichi (Témoin)

Figure. 12.a Variation de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction du type de produit organique ; **b.** Effet du type de produit organique sur l'homogénéité de la variance

3.4.2. Effet du temps de prélèvement sur la capacité d'échange cationique (CEC)

Les valeurs moyennes de la capacité d'échange cationique (CEC) présentent des différences significatives entre les différents temps de prélèvement ($P < 0.001$) (Annexe II.2).

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la CEC au cours du temps paraît suivre presque la même tendance que celle de la conductivité électrique (Fig13. a). La comparaison des valeurs moyennes de ce paramètre n'a montré aucune différence significative entre les traitements de zéro jour à 28^{ème} jour de l'essai, mais au 56 jour (5^{ème} prélèvement), la CEC enregistre une diminution significative qui se poursuit jusqu'aux dernières semaines de la période expérimentale, durant les quelles une deuxième diminution significative a été signalée à partir du 84^{ème} jour et qui s'étale jusqu'au dernier prélèvement.

Cependant, la comparaison entre les dix temps de prélèvements montre que la valeur la plus élevée de la CEC a été enregistrée durant la première semaine de la période expérimentale ($11.22 \text{ cmol kg}^{-1}$), avec un taux d'augmentation de 19 % par rapport à la valeur enregistrée au dernier prélèvement 196^{ème} jour ($9.43 \text{ cmol kg}^{-1}$). Ces observations ont été confirmées par l'analyse statistique qui a distingué trois groupes homogènes pour le facteur temps : le groupe (a) regroupe (0, 7, 14 et 28^{ème} jours), le groupe (b) correspond au 56 jour et le groupe (c) regroupe 84, 112, 140, 164 et 196^{ème} jours) de la période expérimentale (Annexe II.2). L'effet significatif du temps de prélèvement sur la CEC est bien illustré par les boîtes à moustaches (Fig. 13. b).

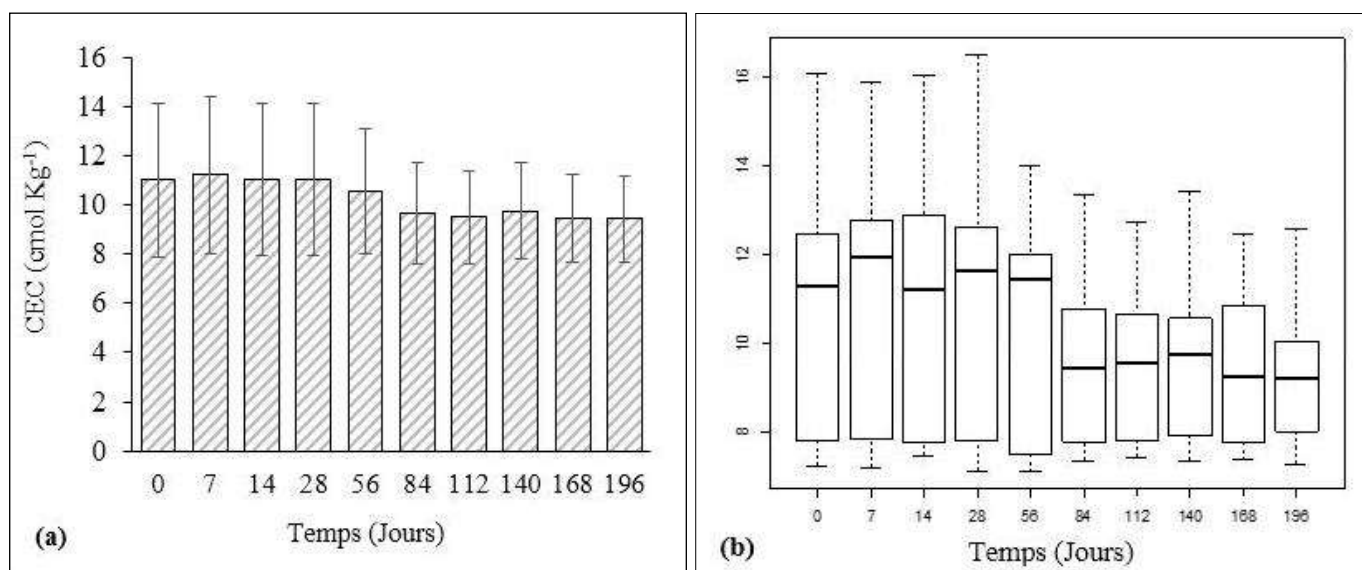


Figure 13. a. Evolution de la capacité d'échange cationique (CEC) au cours de la période expérimentale ; **b .** Effet du temps de prélèvement sur l'homogénéité de la variance

Les résultats obtenus de ce travail ne supportent pas l'hypothèse de l'augmentation de la CEC du sol traité par les différents produits organiques avec la stabilisation de ces derniers au cours du temps, comme il a été rapporté par Mustin (1987) et Larney et Angers (2012). À l'opposé de ces auteurs, les valeurs de la CEC obtenues semblent diminuer parallèlement avec le passage du temps. A ce titre, une corrélation négative a été observée entre le temps et la CEC (Fig. 14).

Ces résultats nous permettent d'écarter la possibilité de la contribution des substances humiques synthétisées au cours de l'essai dans les phénomènes d'échange. En fait, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées au début de l'essai et ne peuvent être expliquées que, si on se réfère aux composés humiques initialement présents dans les produits organiques et non pas à ceux issues d'un processus de stabilisation des produits organiques apportés au sol au cours de l'essai.

Le manque de la stabilisation des produits organiques peut être expliqué par la courte durée de notre essai (6 mois), comparativement aux essais de longue durée (Essais de plusieurs années), ce qui n'a pas pu mettre en évidence une possible stabilisation de la matière organique. Par ailleurs, les facteurs pédoclimatiques de notre région d'étude ont également contribué au ralentissement du processus de stabilisation de la matière organique.

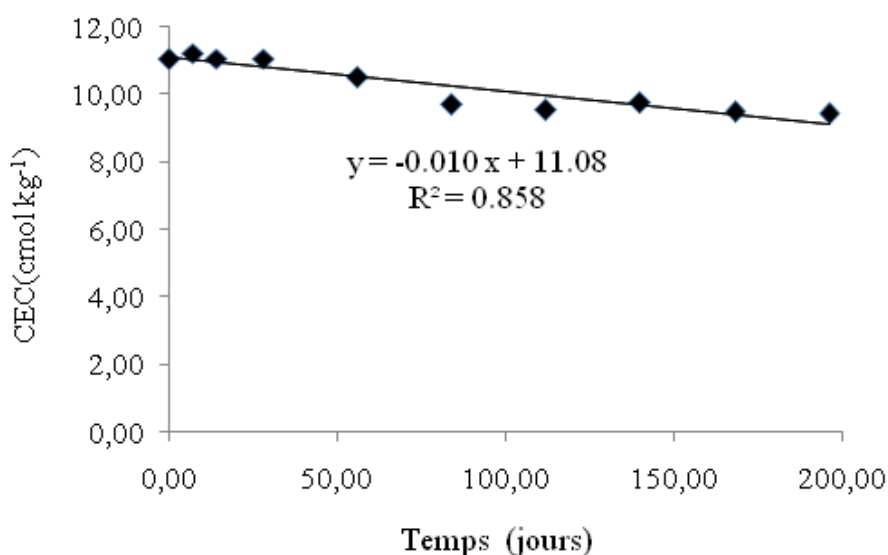


Figure 14 . Relation entre la capacité d'échange cationique (CEC) et le temps de prélèvement

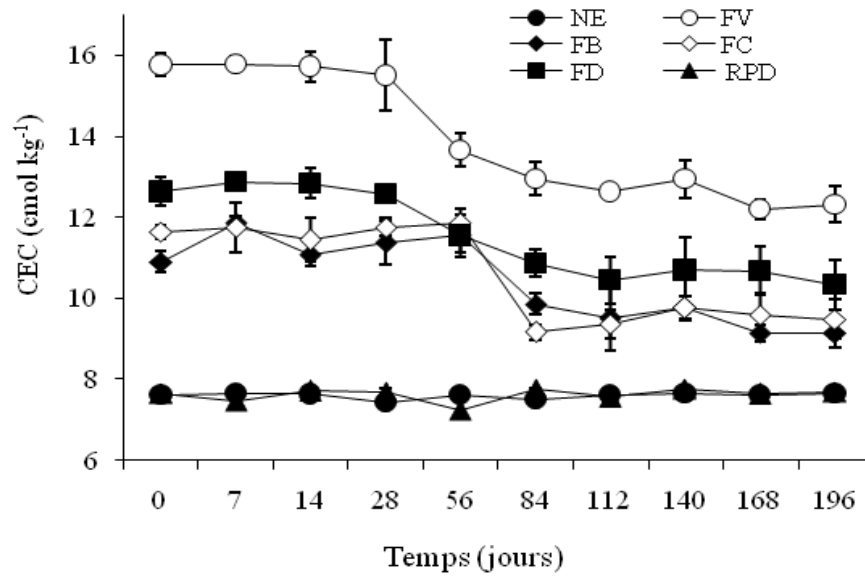
3.3.4.3. Effet de l'interaction du type de produit organique et du temps de prélèvement sur la capacité d'échange cationique (CEC)

L'évolution de la CEC dans le sol traité par les différents produits organiques et dans le témoin au cours de la période expérimentale est présenté dans la figure 15. La CEC est plus élevée dans le sol traité par les produits organiques que dans le sol témoin. La tendance de l'évolution de ce paramètre dans le sol traité par les produits organiques semble diminuée au cours du temps. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent une augmentation significative ($P < 0.001$) (Annexe II.2) de la CEC au début de la période expérimentale pour tous les traitements par rapport au sol non traité à l'exception des RPD. L'augmentation la plus importante de la CEC a été enregistrée par le fumier de volailles (FV) au 7^{ème} jour, soit, des taux d'augmentation de 106.27, 33.05, 34.29, 22.7% respectivement par rapport au témoin, FB, FC et FD pour la même période de prélèvement. Après cette initiale augmentation, ce paramètre enregistre une diminution significative jusqu'à la fin de l'essai.

La comparaison entre les 10 temps de prélèvements a montré que ce paramètre enregistre une forte réduction significative pour tous les traitements (mis à part les RPD) au 6^{ème} prélèvement (84^{ème} jour) et qui dure jusqu'à la fin de la période expérimentale. Les taux de réduction enregistrés à la fin de la période expérimentale pour tous les traitements par rapport à leurs valeurs initiales sont 21.82, 23.04, 18.55, 19.48 % respectivement pour FV, FB, FC et FD.

L'augmentation de la CEC a été particulièrement évidente dans le traitement du sol par le fumier de volailles (FV) aux premières semaines de l'essai, ce qui est probablement dû à la composition chimique différente de ce type de fumier par rapport aux autres produits. Cette différence ressort clairement de différentes concentrations en substances humiques entre les différents produits.

Par ailleurs, d'après la figure 15, on constate que la CEC du sol témoin et du sol traité par les résidus de palmier dattier (RPD) ne subit qu'une faible évolution au cours de l'essai. Ces deux traitements présentent presque la même allure et n'ont subit qu'une légère variation tout au long de l'essai.



EN : sol non enrichi FV: Fumier de Volailles ;FB : Fumier de Bovins ; FC : Fumier de Caprins ; FD : Fumier de Dromadaires ; Résidus de Palmier Dattier (RPD).

Figure 15 . Evolution de la CEC en fonction du type de produit organique au cours de la période expérimentale

3.4. Etude de quelques corrélations entre les variables étudiées

Les coefficients de corrélation entre les différentes variables étudiées sont présentés dans la matrice de corrélation (Tableau 2, Figure 16).

Les résultats obtenus ont montré que la CEC du sol est fortement liée à la conductivité électrique (CE). Une relation étroite a été révélée entre ces deux paramètres ($r = 0.648$, $P < 0.001^{***}$). L'évolution de la conductivité électrique au cours de l'essai semble suivre presque la même tendance que celle de la CEC.

En revanche, aucune corrélation n'a été mise en évidence entre la capacité de rétention en eau et la conductivité électrique. La CR ne tend pas à accroître avec l'augmentation de la salinité. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Mallouhi (1982) qui a montré dans un essai analogue sur sol argileux que la salinité augmente la capacité de rétention du sol en eau. La nature sableuse du sol utilisé dans la présente étude a probablement favorisé le lessivage des sels en excès.

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les différents variables

r	CE	CEC	CR	pH
CE	1.0000			
CEC	0.6478***	1.0000		
CR	0.0945	-0.0424	1.0000	
pH	0.3404***	0.0250	-0.4313***	1.0000

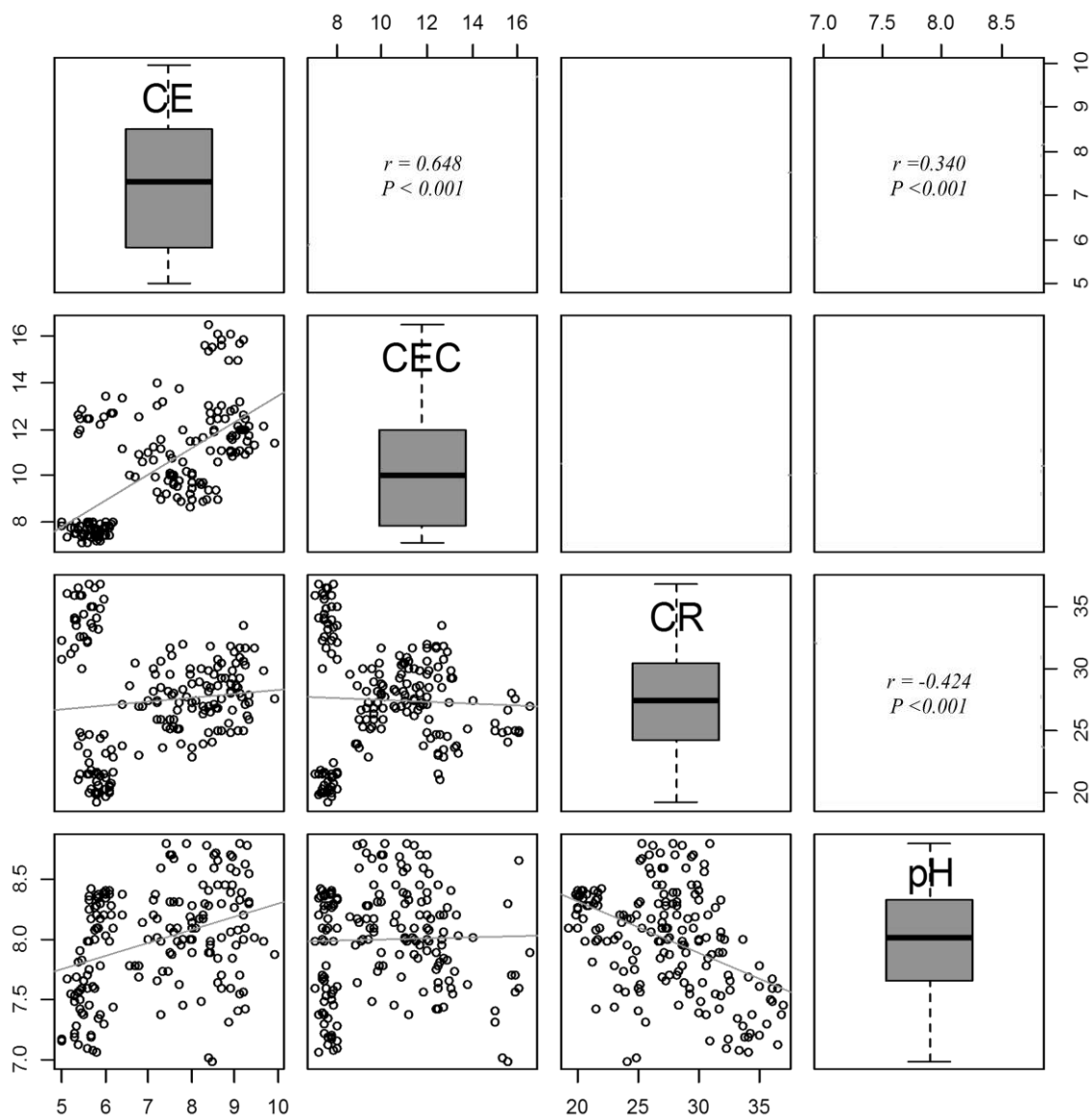


Figure 16. Corrélations entre les variables étudiées

IV .Conclusion du chapitre

Au terme des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les propriétés physiques et physico-chimiques du sol salé dans les régions arides peuvent être améliorées par une fertilisation organique raisonnée et bien conduite. L'enrichissement du sol salé en matière organique entraîne des modifications significatives des propriétés physiques et physico-chimiques de ce sol à savoir : la conductivité électrique (CE), le pH, la capacité de rétention en eau (CR) et la capacité d'échange cationique (CEC).

Ainsi, des changements profonds de l'ensemble des propriétés du sol ont été mis en évidence en réponse à l'apport organique au sol salé. Toutefois, la tendance de différenciation qui a été observée entre les différents traitements semble être en relation directe avec la nature biochimique de la matière organique apportée au sol et en fonction du temps de prélèvement.

Alors que, les quatre types de fumier ont montré des effets plus importants sur le pH, la CEC et la CE, les résidus de palmier (RDP) ont essentiellement augmenté la capacité de rétention en eau du sol (CR).

Les résultats obtenus révèlent que les valeurs les plus élevées de la CEC et la CE ont été enregistrées aux premières semaines de l'essai, ce qui coïncide avec la forte minéralisation des produits organiques apportés au sol, tandis qu'ils diminuent au cours du temps.

En revanche, l'effet inverse a été observé pour le pH. Ce dernier a montré une diminution au début de l'essai pour l'ensemble des traitements par suite de la libération des acides organiques et la production des nitrates issues de la biodégradation des matières organiques apportés au sol, pour augmenter pour le reste de la période expérimentale.

Les résultats obtenus ont montré une réduction significative de la conductivité électrique au 56^{ème} jour de la période expérimentale pour tous les traitements. Néanmoins, la réduction la plus prononcée a été enregistrée par le sol traité par le fumier de volailles (FV) , soit un taux de réduction de 13.14% contre des taux de réduction de 9.96, 6.65 et 3.49 % respectivement pour FD, FC et FB, comparés à l'état initial.

Les résultats relatifs à la CEC ont montré que l'apport organique améliore de façon significative ce paramètre en libérant des composés organiques générateurs d'électronégativité, permettant de fixer les cations.

Toutefois, cet effet améliorant est variable en fonction du type de produit apporté au sol. C'est ainsi, que la meilleure CEC a été enregistrée par le FV au 7^{ème} jour de la période expérimentale, soit, des taux d'augmentation de 106.27, 34.29, 33.05, 22.7% respectivement par rapport au témoin, FC, FB et FD pour la même période de prélèvement.

Les valeurs du pH ont indiqué que le FC et le FB ont un effet basique sur la réaction du sol, alors que le FV et le FD ont montré un effet légèrement acidifiant. Toutefois, quelque soit le type de produit organique appliqué au sol, tous les traitements ont enregistré des augmentations de pH vers la fin de l'essai.

L'apport des résidus de palmier dattier bien qu'il n'a pas produit un changement notable dans les propriétés étudiées (en particulier CE et la CEC), il est clair d'après les résultats obtenus qu'une augmentation significative de la capacité de rétention en eau a été enregistrée en réponse à l'apport de ces résidus.

Toutefois, la plus forte augmentation de la capacité de rétention en eau (CR) a été enregistrée au 56^{ème} jour de la l'essai, soient des d'augmentation de 74.07, 40.07, 23.78, 25 et 15.52 % respectivement par rapport au témoin, FB , FC et FD pour la même période de prélèvement.

Les faibles modifications des autres propriétés du sol enregistrées par les résidus de palmier dattier peuvent être expliquées par leur faible biodégradation au cours de l'essai. En effet, la richesse de ces résidus en cellulose et en lignine traduite par un rapport C/N élevé explique bien leurs faibles biodégradations par rapport aux autres produits.

Effets des produits organiques sur l'amélioration du fonctionnement microbiologique des sols salés

(Impact sur la minéralisation du carbone et de l'azote)

Résumé

Cette étude a été conduite sur des sols à caractères contrastés et représentatifs de la région aride. Elle consiste à étudier l'effet comparé de cinq produits organiques : volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et de résidus de palmier dattier (RPD) sur l'amélioration du fonctionnement microbiologique d'un sol non salé (NS) et un sol salé (SS), en particulier, le processus de minéralisation de l'azote et du carbone. L'activité microbiologique a été estimée par le test respirométrique (émissions de CO_2) et de l'extraction des deux formes de l'azote minéral (N-NH_4^+ et N-NO_3^-). Ainsi, après 56 jours d'incubation dans des conditions contrôlées (28 °C et 80% de CR), les différents produits organiques ont montré que l'activité de minéralisation varie significativement en fonction du type de sol et de produit organique apporté ($P < 0.001$). Toutefois, les plus fortes quantités cumulatives de CO_2 , N-NH_4^+ et N-NO_3^- à la fin de l'incubation ont été enregistrées par le sol non salé (NS) enrichi en fumier de volailles (FV) avec 1173.26, 7.26 et 14.91 mg 100^{-1} g de sol sec respectivement. Les taux de réduction de dégagement de CO_2 , N-NH_4^+ et de N-NO_3^- sous les conditions salines sont de 16, 3.26 et 18% respectivement. L'ensemble des résultats obtenus montrent l'intérêt des différents produits organiques sur l'amélioration du fonctionnement microbiologique des sols salés des régions arides.

Mots clés: Salinité, Produits organiques, Microorganismes, Minéralisation, Carbone, Azote, Zones Arides.

I. Introduction

La biomasse microbienne du sol joue un rôle essentiel dans le turnover de la matière organique, le recyclage des nutriments et le maintien de la productivité des plantes (Chowdhury *et al.*, 2011 ; Leff *et al.*, 2012 ; Rath et Rousk, 2015).

Les micro-organismes sont les principaux agents de la biodégradation de la matière organique du sol ; ils constituent un facteur clé dans les cycles biogéochimiques terrestres en régénérant des éléments nutritifs directement utilisables par les plantes. Par conséquent, tout effet affectant négativement les processus microbiens au niveau du sol, aura une grande influence sur la dynamique de la matière organique et sur les cycles biogéochimiques, ce qui influe indirectement sur la nutrition des plantes (Setia *et al.*, 2012).

A ce sujet, la salinité des sols couplée à leurs faibles teneurs en matière organique constituées les facteurs de stress les plus importants pour les communautés microbiennes dans les régions arides (Batra et Manna, 1997 ; Rietz et Hayezs, 2003 ; Yuan *et al.*, 2007 ; Asmaholi *et al.*, 2009 ; El majdoub et Marschner, 2013).

Les faibles niveaux de matières organiques et la faible activité biologique, caractérisant les sols salés dans les régions arides ne sont favorables ni pour l'accumulation de matière organique, ni pour sa minéralisation. En conséquence, ces sols sont déficients en nombreux éléments nutritifs tels que, le N, le Cu, le Mn, le Mo, le Zn, le P et le S (Mafongoya *et al.*, 2000).

En conditions salines, se développent au sein de la microflore tellurique, des particularités qui affectent l'activité microbiologique dont dépend la nutrition des plantes à savoir : une baisse notable du potentiel osmotique de la solution du sol, des pH très basiques, la présence des ions toxiques, des déséquilibres nutritionnels et une structure asphyxiante (Harris, 1980 ; Keren, 2000 ; Munnes, 2002; Walker et Bernal, 2008). Conséquemment, ces problèmes physiologiques, non seulement réduisent l'abondance des microorganismes, mais peuvent aussi avoir une influence négative sur leur activité et les processus biochimiques nécessaires au recyclage des éléments nutritifs.

Ces changements en réponse aux fortes concentrations en sels ont des répercussions directes sur la décomposition de la matière organique, notamment sur la minéralisation du carbone, de l'azote et d'autres cycles biogéochimiques (P, S et d'autres nutriments), dont la libération est intimement liée à la minéralisation du carbone (McClung et Frankenberger, 1985 ; Pathak et Rao, 1997; Mafongoya *et al.*, 2000 ; Rietz et Haynes, 2003; Sardinha *et al.*, 2003 ; Wichern *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007; Nakhone et Tabatabai, 2008; Setia *et al.*, 2011; Chowdhury *et al.*, 2011; Baumann et Marschner, 2011 ; Andronov *et al.*, 2012; El-majdoub et Marschner, 2013 ; Rath et Rousk , 2015).

En matière de l'évolution de la matière organique dans les sols salés, de nombreux auteurs, Gallali (1980), Soudi (1990), Halitim et Dellal (1992) et Drahorád *et al.* (2013) ont signalé l'existence d'une interaction entre la salinité et la biodégradation de la matière organique. La salinité inhibe aussi bien les activités microbiologiques de minéralisation du carbone (Processus de dégagement de CO₂), que celles de l'azote notamment, la nitrification (McCormick et Wolf, 1980; Rietz et Haynes, 2003; Tejada *et al.*, 2006; Nakhone et Tabatabai, 2008; Setia *et al.*, 2011).

Néanmoins, la sensibilité des micro-organismes à l'égard de la salinité paraît différentielle suivant le degré de la salure et l'espèce microbienne (Halitim et Dellal, 1992; Batra et Manna, 1998).

Dans le cadre de la mise en valeur des sols salés, de nombreuses études ont été réalisées sur l'amélioration de leurs propriétés physiques et chimiques, par l'apport de la matière organique (Qadir *et al.*, 2007; Walker et Bernal, 2008; Jalali et Ranjbar, 2009), toutefois, peu de travaux se sont intéressés à l'amélioration des activités microbiologiques de ces sols par des apports organiques exogènes, plus particulièrement dans les milieux arides (Rao et Pathak, 1997; Liang *et al.*, 2005; Nourbakhsh et Sheikh-Hosseini, 2011).

Selon Garcia *et al.* (2004) et Tejada *et al.* (2006), l'effet de la salinité sur les processus biologiques peut être atténué par l'apport de la matière organique. Ceci est attribuable à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du milieu salé et à l'augmentation de la disponibilité des sources énergétiques et nutritives aux microorganismes (Tejada, 2006; Lakhthar *et al.*, 2008). Mais, l'action améliorante de la matière organique diffère selon la nature biochimique des substrats utilisés notamment, de leur biodégradabilité (Thuies *et al.*, 2002; Ha *et al.*, 2008; Jorge-Mardomingo *et al.*, 2013).

Dans ces milieux, l'apport de matière organique exogène aux sols est considéré comme un outil adéquat non seulement pour l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols salés, mais également pour la restauration de la qualité biologique de ces sols.

Afin de préciser l'impact des apports organiques sur certaines activités microbiologiques des sols salés des zones arides, une étude comparative a été entreprise sur la dynamique d'évolution de différents produits organiques (Fumier de volailles, fumier de bovins, fumier de caprins, fumier de dromadaire et résidus de palmier dattier) dans des sols contrastés. Il s'agit d'un sol sableux non salé et salé dans la région de Ouargla. Le choix a porté sur deux indicateurs de l'activité microbienne : le dégagement de CO₂ et la libération des deux formes de l'azote minéral (N-NH₄ et N-NO₃).

II. Matériel et méthodes

1. Sites de prélèvement des échantillons du sol

Les prélèvements du sol ont été réalisés durant le mois de Février de l'année 2009 à partir de deux sites différents sur le plan de la salinité dans la région de Ouargla. Il s'agit d'un sol

sableux salé (SS) prélevé de l'exploitation de l'université Kasdi Merbah où de graves problèmes de salinisation primaire et secondaire se posent, et un sol non salé (NS) prélevé d'une ferme privée dans le secteur agricole de Hassi Ben Abdalah. Selon le système de classification du sol CPCS (1967), les deux sols appartiennent respectivement aux classes du sol halomorphe à structure non dégradée et au sol peu évolué d'apport éolien. Alors que, selon le système de classification du sol de la FAO (1998), les deux sols appartiennent au sol Solontchaks gypsic Aridique et Arérosols sols Aridique, respectivement. Les données analytiques des profils des deux types de sol sont présentées dans l'annexe (II.3).

2. Pédoclimat

Le Pédoclimat de la région d'étude est caractérisé par un régime hydrique de type «**Aridique**» où la section de contrôle de l'humidité du sol est entièrement sèche plus de la moitié du temps (cumulé) au cours duquel la température du sol à 50 cm, est supérieure à 5 degrés. Le sol n'est jamais entièrement ou partiellement humide pendant 90 jours consécutifs lorsque la température du sol, à 50 cm, est supérieure à 8 degrés. Dans ce régime, il n'y a que peu ou pas de lixiviation des sels solubles, qui s'accumulent dans le sol, si une source de sels est présente.

Quant au régime thermique le Soil Taxonomy (USDA, 1975 clés 1998) prend en compte pour caractériser le régime thermique des sols, la moyenne annuelle de température du sol à 50 cm de profondeur, ainsi que la différence de moyennes de température de l'été et de l'hiver. Selon Tavennier (1976), la température du sol à 50 cm de profondeur est estimée en ajoutant 1.5 °C à la température de l'air. Les températures des sols de Ouargla pour la période 2002-2012 sont les suivantes :

- Moyenne annuelle d'hiver : $12.87 + 1.5 = 14.37$ °C
- Moyenne annuelle de l'été : $34.57 + 1.5 = 36.07$ °C
- Moyenne annuelle : $23.58 + 1.5 = 25.08$ °C > 22°C
- Moyenne annuelle été - Moyenne annuelle d'hiver = $21.7 > 5$ °C à 50 cm.

Selon ces données on est bien en présence d'un régime thermique «**Hyper thermique**». Ces conditions pédoclimatiques extrêmes influent négativement sur l'abondance et l'activité des microorganismes telluriques intervenant dans la biodégradation de la matière organique dans le sol, notamment sur le processus de minéralisation du carbone et de l'azote du sol.

3. Méthode de conditionnement des échantillons du sol

Vu l'aspect microbiologique de ce volet de notre étude, l'échantillonnage a été réalisé, dans des conditions d'asepsie rigoureuses. Les échantillons moyens obtenus à partir de mélange de plusieurs sous échantillons, ont été prélevés jusqu'à 30 cm de profondeur. Après avoir écarté les trois premiers centimètres de sol et déposé à l'aide d'une spatule stérile sur des feuilles d'aluminium stériles, les échantillons sont récupérés dans des flacons stériles et transportés au laboratoire. Une aliquote de ces échantillons a été séchée aux conditions de laboratoire et réservée pour la caractérisation physico-chimique du sol, alors que celle réservée pour les mesures microbiologiques, a été conservée avec son humidité initiale à 4 °C jusqu'au moment de l'analyse.

4. Méthodes de caractérisation des échantillons du sol

Les méthodes de la caractérisation analytique adoptées pour les analyses des deux sols sont décrites dans le deuxième chapitre de cette partie (Chapitre 2).

5. Echantillonnage et conditionnement des produits organiques

Les produits organiques utilisés pour les expériences d'incubation en conditions contrôlées sont les mêmes que ceux qui ont été utilisés dans le cadre de l'essai en conditions semi contrôlées (Chapitre 2 de cette partie) à savoir : le fumier de volailles (FV), fumier de bovins (FB), fumier de caprins (FC), fumier de dromadaire (FD) et les résidus palmier dattier (RPD). Le protocole d'échantillonnage et d'entreposage de ces produits est décrit dans le premier chapitre de cette partie (Chapitre 1 : Caractérisation des produits organiques).

6. Méthodes de caractérisation des produits organiques

Les échantillons représentatifs des différents produits organiques ont été emballés dans des sacs en polyéthylène et transportés au laboratoire. Avant analyse, les échantillons composites de chaque produit ont été séchés et broyés à 0.5 mm et soumis à une caractérisation physique, physico-chimique et biochimique suivant les méthodes analytiques adoptées pour l'analyse de fumier (Peters *et al.*, 2003) et des résidus de végétaux (Kalra, 1997; Motsara et Roy, 2008) (Partie II, Chapitre 1).

7. Traitements et incubation

La minéralisation du carbone et de l'azote des différents mélanges (sol/produit organique) a été déterminée en conditions d'incubation contrôlées (28 °C et 80 % de la capacité de rétention en eau (CR)). Ainsi, les deux sols ont été enrichis séparément par les différents produits organiques : FV, FB, FC, FD et RPD à raison de 3% de leur contenu initial en matière organique. L'expérience contient au total six traitements pour chaque type de sol :

- Sol sableux non salé et salé non enrichis (sols témoins) : (NSNE) et (SSNE)
- Sol sableux non salé et salé enrichis par le fumier de volailles : (NSEFV) et (SSEFV)
- Sol sableux non salé et salé enrichis par le fumier de bovins : (NSEFB) et (SSEFB)
- Sol sableux non salé et salé enrichis par le fumier de caprins : (NSEFC) et (SSEFC)
- Sol sableux non salé et salé enrichis par le fumier dromadaire : (NSEFD) et (SSEFD)
- Sol sableux non salé et salé enrichis par les résidus de P. dattier : (NSERPD) et (SSRPD).

8. Méthodes d'étude de la dynamique de la minéralisation du carbone et de l'azote des différents produits organiques

L'activité microbienne impliquée dans la biodégradation des différents produits organiques appliqués aux deux sols : sableux non salé (NS) et salé (SS) a été déterminée par la mesure de la minéralisation du carbone et de l'azote dans des conditions contrôlées.

La cinétique de minéralisation des deux éléments permet de déterminer le rythme de la biodégradation de la matière organique, et d'estimer le comportement de chaque produit dans le sol.

La minéralisation de carbone sous forme de dégagement de CO₂ et la quantité de l'azote minéralisée sous forme de N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ ont été suivies au laboratoire au cours de 56 jours. Ainsi, deux types d'incubation ont été réalisés dans les mêmes conditions d'humidité (80 % de la capacité de rétention en eau) et de température (28 °C) avec les opérations suivantes :

8.1. Méthode de la minéralisation du carbone organique (mesure de dégagement de CO₂ (technique de respirométrie)

Dans la présente étude, la respiration microbienne a été utilisée comme indicateur de la minéralisation de la matière organique. En fait, le dégagement de CO₂ est un reflet du métabolisme du sol. C'est un indice global de l'activité microbienne qui permet d'apprécier l'intensité de l'activité des microorganismes dans le sol. Ainsi, la respiration microbienne

(mesure de dégagement de CO_2) a été suivie dans des conditions optimales de laboratoire pendant une période de 56 jours. Le protocole a été adapté de la norme française XPU 44-163 (AFNOR, 2005). L'équivalent de 25 g de sol sec de chaque type de sol ont été enrichis séparément par l'un des cinq produits organiques à raison de 3% de sa teneur initiale en matière organique, puis, ils ont été incubés à $28 \pm 1^\circ\text{C}$ dans des bocaux en verre de 250 ml de volume, hermétiquement fermés (Photo 1). La teneur en eau du sol a été ajustée à 80 % de la CR. Le CO_2 dégagé au cours de l'incubation est piégé dans 20 ml de soude (NaOH 0.1 N) contenu dans des coupelles en plastique mis avec le sol dans les bocaux. A chaque mesure, les coupelles de soude sont sacrifiées pour la mesure de la quantité de CO_2 dégagé à l'intérieur des bocaux. Ainsi, les coupelles sont prélevés à date régulière et renouvelés par la suite avec de la soude fraîche.

Pour évaluer la carbonatation initiale de la soude et celle du CO_2 de l'air ambiant, des coupelles de soude sont placées dans des bocaux vides sans sol (Photo 1.a) mis en incubation. La soude ayant réagi avec le CO_2 et se précipite en présence de 5 ml d'une solution de chlorure de baryum (BaCl_2 à 20 %). La soude restante est titrée avec de l'acide chlorhydrique HCl (0.2N) jusqu'au virage de l'indicateur coloré (phénolphtaléine) du rose au blanc laiteux. La minéralisation du carbone est exprimée par différence à la minéralisation d'un sol n'ayant pas reçu d'apport organique (contrôle). Le taux de respiration a été calculé en fonction de l'évolution de CO_2 cumulé pendant une période de 56 jours.

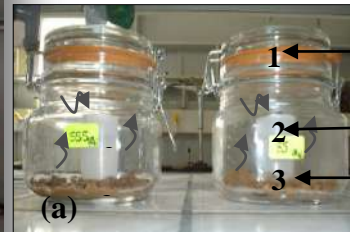
8. 2. Méthode de la minéralisation de l'azote organique (mesure de N-NH_4^+ et N-NO_3^-)

Les quantités de l'azote ammoniacal et nitrique provenant de la minéralisation de l'azote organique des différents types de produits organiques ont été analysées périodiquement par la méthode de Keeny et Nelson (1982). Les incubations ont été menées dans les mêmes conditions que celles de dégagement de CO_2 (Photo 2). Ainsi, le dosage l'azote minéral a été exécuté après déplacement des ions N-NH_4^+ et N-NO_3^- par une solution de KCl (2M) (d'une suspension de 25 g de sol enrichi ou non enrichi en produit organique et 250 ml de KCl). Après filtration de l'extrait, une première distillation sur MgO calciné et titrage de NH_3 , déplacé après son adsorption dans l'acide borique, est suivie d'une distillation sur alliage de « Dewarda » qui réduit l'azote nitrique à l'état ammoniacal. Le titrage est réalisé par l'acide sulfurique (H_2SO_4 N/10) en présence d'un indicatif coloré le rouge de méthyle. La minéralisation de l'azote est calculée en soustrayant à chaque date la quantité d'azote minéral du sol témoin.

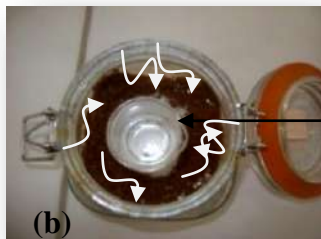
Pour les deux types d'incubation, l'humidité du sol a été maintenue constante à 80% de la capacité de rétention d'eau avec de l'eau distillée. Ceci est obtenu par la pesée régulière des flacons (tous les 3 jours). Le sol non enrichi a été utilisé comme témoin. La mesure de CO₂ dégagé a été effectuée tous les jours pendant la première semaine de l'incubation, puis tous les deux jours, jusqu'à la fin de l'incubation (56 jours). Les dates cumulatives de mesure sont : 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 48 et 56 jours d'incubation pour la mesure de CO₂, alors que, l'extraction et le dosage de l'azote minéral (NH₄⁺ et NO₃⁻) a été effectué après 0, 3, 7, 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49 et 56 jours. Tous les traitements ont été effectués en trois répétitions pour chaque temps d'échantillonnage et les valeurs exprimées sont la moyenne de trois répétitions.

9. Méthode de traitement des données

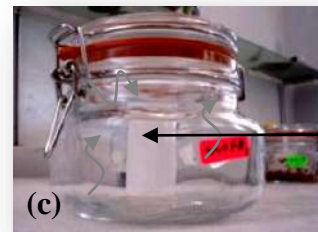
Toutes les données ont été analysées en utilisant un logiciel (SAS , 2001. SAS ® 9.1 Qualification Tools User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC). Une analyse de la variance ANOVA à deux critères de classification avec des mesures répétées a été utilisée pour analyser l'effet de la salinité et le type de produit organique sur le dégagement de CO₂, l'ammonification (N-NH₄⁺), la nitrification (N-NO₃⁻) et l'azote minéral (N-NH₄⁺+N-NO₃⁻), où le temps d'échantillonnage (re-échantillonnage des mêmes échantillons) sur 9 dates pour le dégagement CO₂ et 11 dates pour l'extraction des deux formes minérales de l'azote (N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ et N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) a été traité comme des mesures répétées . La plus petite différence significative (LSD) a été utilisée pour déterminer la signification des différences entre les moyennes.



- 1: Bocal de minéralisation hermétiquement fermé;
- 2: Coupelle contenant du NaOH;
- 3: Sol enrichi par le produit organique



Dégagement de CO₂



Récepteur vide (carbonatation de l'air ambiant)

Photo 1. Dispositif d'incubation de la minéralisation de carbone (incubation des échantillons du sol à 28°C et à 80 % de CR) : **a.** bocaux de minéralisation de carbone ; **b.** Position de la coupelle de soude dans le bocal de respiration; **c.** Témoin sans sol (récepteur vide ne contenant pas du sol, servant comme témoin pour déterminer le CO₂ fixé par l'atmosphère)



- 1 : Ouverture bouchée au coton
- 2 : Sol enrichi par le produit organique

Photo 2. Dispositif d'incubation de la minéralisation l'azote (incubation des échantillons du sol à 28 C° et à 80 % de CR)

III. Résultats et discussion

1. Caractérisation du sol (avant apport organique)

L'examen des résultats analytiques, consignés dans le tableau 1, montre qu'à l'exception de l'importance du degré de la salure dans le sol salé (SS) par rapport au sol non salé (NS), la caractérisation physico-chimique comparative entre les deux sols montre de faibles différences pour la majorité des paramètres pédologiques analysés. Ainsi, on peut noter en général :

- Une conductivité très élevée pour le sol salé (SS) de l'ordre de 2.35 dS m^{-1} mais faible pour le sol sableux non salé (NS) de 0.55 dS m^{-1} .
- Une réaction basique pour les deux types de sols : 8.46 pour le sol sableux non salé (NS) et 8.03 pour le sol sableux salé (SS).
- Des teneurs en matières organiques faibles pour les deux sols 0.55 % (NS) et 0.63 % pour (SS). Ces faibles teneurs en matière organiques sont mises en évidence étant dans les dosages de l'azote ou ceux du carbone. Les teneurs en carbone sont faibles 0.32 % pour (NS) et 0.36 % pour (SS). Les teneurs en azote sont également très faibles de l'ordre de 0.0053 et 0.006 % respectivement pour le sol sableux non salé (NS) et salé (SS).
- Une capacité d'échange cationique (CEC) faible en relation avec la pauvreté des deux sols, en colloïdes minéraux et organiques $6.7 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ pour le sol sableux non salé (NS) et $7.37 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ pour le sol salé (SS).
- Une capacité de rétention en eau faible, du fait d'une texture sableuse avec une dominance des éléments grossiers dans le (SS).
- Une teneur faible en bicarbonates pour les deux sites. Toutefois, la teneur en chlorures et en sulfates est élevée pour le (SS) en relation avec la salinité qui est très élevée.
- La teneur élevée en gypse dans le sol salé (SS) est compensée par un taux relativement élevé en calcaire dans le sol non salé (NS).

Grâce à la présence d'une source d'ions calcium en abondance dans la solution du sol pour les deux types de sols sous forme de gypse (en phase liquide pour le sol salé) et du calcaire (pour le sol non salé), l'alcalinisation du complexe adsorbant par l'ion sodium sera peu probable.

Par ailleurs, les propriétés des deux sols montrent un sérieux risque de pertes d'azote sous forme d'ammoniac (alcalinité marquée pour les deux types de sols) et de nitrate (texture sableuse trop filtrante).

Nous considérons que les deux types de sols sont pauvres au plan chimique et présentent des caractéristiques contraignantes du point de vue physique, notamment en ce qui concerne leur faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs. Une des solutions possible consiste à amender ces sols en matières organiques.

Tableau 1. Caractéristiques physico - chimiques des deux sols salé et non salé (Profondeur : 0 - 30 cm)

Type de sol		Sol non salé (NS)	Sol Salé (SS)
Paramètre			
Granulométrie	Argile (%)	05.94 ± 0.79	07.11 ± 0.51
	Limon fin (%)	05.96 ± 0.19	08.69 ± 0.17
	Limon grossier (%)	10.38 ± 0.32	17.10 ± 0.27
	Sable fin (%)	41.70 ± 2.73	32.65 ± 2.10
	Sable grossier (%)	36.02 ± 4.35	34.45 ± 2.36
Densité apparente (%)		01.56 ± 0.22	01.36 ± 0.27
Capacité rétention de l'eau (%)		18.56 ± 1.78	20.84 ± 1.78
Gypse (%)		Traces	20.02 ± 1.01
Calcaire (%)		12.94 ± 1.01	02.57 ± 0.50
Salinité globale CE _{1/5} (dS m ⁻¹)		00.55 ± 0.20	02.35 ± 0.42
Réaction du sol (pH eau _{1/2.5})		08.03 ± 0.22	08.46 ± 0.46
Caractéristiques Biochimiques	C.Org (%)	0.32 ± 0.043	00.36 ± 0.05
	N (%)	0.0053 ± 0.03	00.006 ± 0.01
	MO (%)	0.55 ± 0.13	00.63 ± 0.05
Complexe adsorbant. (cmol ⁺ Kg ⁻¹)	Mg ⁺⁺	00.92 ± 0.30	01.01 ± 0.12
	Ca ⁺⁺	05.04 ± 0.59	04.33 ± 0.57
	Na ⁺	00.35 ± 0.03	01.55 ± 0.03
	K ⁺	00.39 ± 0.04	00.48 ± 0.03
	CEC (T)	06.7 ± 0.71	7.37 ± 0.62
Bilan anionique de l'extrait _{1/5} (meq l ⁻¹) (Solution du sol)	Cl ⁻	04.70 ± 0.55	12.80 ± 0.9
	SO ₄ ⁻⁻	04.52 ± 0.48	13.67 ± 0.7
	HCO ₃ ⁻	0.80 ± 0.072	00.70 ± 0.1
	CO ₃ ⁻⁻	-	-

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

2. Caractérisation des produits organiques (avant apport aux sols)

La caractérisation analytique comparative des différents types de produits organiques testés avant leur emploi aux deux sols est illustrée et bien commentée dans le premier chapitre de cette partie (Chapitre 1. Caractérisation des produits organiques). Les principales

caractéristiques au plan physico-chimique et biochimique de ces produits sont synthétisées dans le tableau 2.

Concernant la teneur des produits organiques sélectionnés en éléments nutritifs, les résultats obtenus montrent que le fumier de volailles (FV) enregistre les teneurs les plus élevées en éléments fertilisants par rapport aux autres produits. Cette nette richesse au profit de ce type de fumier se remarque surtout au niveau de l'azote, potassium, calcium, phosphore et oligoéléments.

Le pH des produits organiques varie en fonction du type de produit testé. Alors que, fumier de FV et de FD présentent des pH légèrement basiques, soit 7.67 et 7.89 respectivement, le fumier de FC et de FB présentent des pH basiques de 8.10 et 8.21 respectivement. Le plus faible pH a concerné les résidus de palmier dattier, soit un pH de 5.74.

La concentration totale en sels exprimée par la conductivité électrique est élevée pour les quatre types de fumiers. Les valeurs enregistrées sont dans l'ordre décroissant suivant : 8.8 (FC) > 8.55 (FB) > 8.05 (FV) > 7.74 (FD). Alors que, les (RPD) enregistrent une CE relativement faible de 2.48 dS m⁻¹.

Par rapport à tous les produits organiques testés, les résidus de palmier dattier (RPD) affichent les teneurs les plus élevées en matière organique (73.77%) et en carbone (36.88%). Tandis que, ils présentent les plus faibles teneurs en azote (0.65%).

En ce qui concerne le fractionnement biochimique des différents produits organiques, les résultats analytiques rapportés sur le même tableau montrent que le FV présente un rapport C/N relativement bas (10.16), attribué probablement à une faible teneur en cellulose et en lignine (Peu de résidus végétaux sous forme de copeaux de bois). Les autres produits représentent des substrats riches en carbone peu humifié, traduit par des C/N de 24.7, 32.34, 34.19 et 56.74 respectivement pour le FD, FB, FC et les RPD, relativement élevé par rapport au fumier de volailles, ceci est dû à la présence des débris végétaux peu transformés. Cette richesse relative en composés difficilement biodégradables (Cellulose, lignine) suggère que leur action fertilisante s'étalera à long terme, et que ces matériaux seront donc sujets à une biodégradation plus lente.

Quant au fractionnement des acides humiques, les résultats obtenus montrent la dominance de la fraction des acides fulviques par rapport aux acides humiques pour l'ensemble des produits testés, ce qui a été exprimé par un indice d'humification faible (AH/AF) pour tous les

produits. Toutefois, une nette richesse en ces deux composés humiques a été enregistrée au profit du fumier de volailles par rapport aux autres produits.

Tableau 2. Principales caractéristiques physiques, physicochimiques et biochimiques des différents produits organiques testés

Produit organique Paramètre	Fumier de Volailles (FV)	Fumier de Bovins (FB)	Fumier de Caprins (FC)	Fumier de Dromadaire (FD)	Résidus de P.Dattier (RPD)
MO (%)	58.96 ± 4.43	65.98 ± 2.71	67.02 ± 4.26	64.2 ± 3.02	73.77 ± 5.12
CO (%)	29.48 ± 1.28	32.99 ± 1.18	33.51 ± 1.67	32.11 ± 1.42	36.88 ± 1.78
N _{total} (%)	02.9 ± 0.19	01.02 ± 0.12	0.98 ± 0.12	1.30 ± 0.22	00.65 ± 0.10
C/N	10.16 ± 1.72	32.34 ± 1.02	34.19 ± 1.7	24.7 ± 1.80	56.74 ± 2.02
pH _{1.2.5}	07.67 ± 0.21	08.10 ± 0.33	08.21 ± 0.2	7.89 ± 0.29	05.74 ± 0.16
CE _{1.5} (dS m ⁻¹)	08.05 ± 0.28	08.55 ± 0.33	08.8 ± 0.21	7.74 ± 0.43	02.48 ± 0.16
K (%)	02.76 ± 0.20	01.07 ± 0.18	00.75 ± 0.11	0.97 ± 0.19	00.51 ± 0.16
P _{total} (%)	01.52 ± 0.04	00.38 ± 0.05	00.52 ± 0.04	0.40 ± 0.03	00.05 ± 0.01
Mg (%)	0.43 ± 0.02	00.4 ± 0.017	0.74 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.08 ± 0.026
Ca (%)	05.88 ± 0.13	01.58 ± 0.17	02.76 ± 0.14	1.93 ± 0.12	01.27 ± 0.03
Cellulose (%)	26.75 ± 2.36	38.86 ± 3.06	037.98 ± 2.8	31.77 ± 2.71	41.32 ± 2.19
Lignine (%)	07.05 ± 2.08	09.52 ± 1.56	09.93 ± 1.71	008.8 ± 1.4	19.12 ± 2.15
AF (%)	03.72 ± 0.16	01.46 ± 0.19	01.53 ± 0.14	1.89 ± 0.19	0.62 ± 0.04
AH (%)	02.02 ± 0.14	01.33 ± 0.14	01.42 ± 0.14	1.38 ± 0.15	0.40 ± 0.07
AH/ AF	0.54 ± 0.02	00.91 ± 0.07	00.92 ± 0.13	0.73 ± 0.01	0.64 ± 0.12

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard).

3. Dynamique de minéralisation du carbone (évolution du dégagement cumulé de C-CO₂)

Les résultats de l'analyse de la variance ANOVA à deux critères de classification avec des mesures répétées ont révélé des effets significatifs des deux facteurs étudiés (Salinité et type du produit organique) et de leur interaction sur le dégagement de C-CO₂ au cours de l'incubation (Tableau 3). Le CO₂ dégagé, sous nos conditions expérimentales, est en fonction de la nature de l'apport organique et de degré de la salinité du sol.

Les courbes cumulatives de la minéralisation du carbone au bout de 56 jours d'incubation (Fig. 1a,b) montrent le rythme et l'intensité de la minéralisation (Activité respiratoire), dans les deux sols sableux non salé (NS) et salé (SS) enrichis séparément par les différents produits organiques : FV, FB, FC, FD et des RPD.

L'analyse de la cinétique de dégagement cumulé de CO₂ nous a permis d'observer durant les trois premières semaines de l'incubation, un fort dégagement de CO₂ pour les deux sols enrichis par les différents produits organiques par rapport aux sols témoins.

Ce qui se traduit sur l'allure de la courbe d'évolution par une phase ascendante rapide, correspondant à une phase de forte prolifération microbienne, suivie d'une phase de libération lente C-CO₂ (phase ascendante lente) caractérisée par une tendance à la stabilité vers les dernières semaines de l'incubation.

Toutefois, et quelque soit le degré de la salinité du sol, les plus forts et les plus rapides dégagements ont été enregistrés dans les sols enrichis en fumiers de volailles (FV) pendant les trois premières semaines de l'incubation. Puis après cette période, les dégagements cumulés de CO₂, augmentent lentement mais restent toujours supérieurs à ceux des deux sols sableux non salé (NS) et salé (SS) enrichis par les autres produits. Ces derniers qui contrairement aux traitements avec fumier de volailles, suivent une voie lente et progressive tout au long de l'incubation.

3. 1. Effet du type de produit sur la minéralisation du carbone

Le dégagement de CO₂ est significativement influencé par la nature de l'apport organique. L'analyse de la variance a mis en évidence des différences significatives entre les différents produits organiques et le témoin d'une part, et entre eux d'autre part ($P < 0.001$) (Tableau 3). Les moyennes obtenues sont de 784.95, 413.97, 350.8, 332.11, 216.46 et 60.74 mg100g⁻¹ respectivement pour le FV, FD, FB, FC, RPD et le témoin.

Ces moyennes ont été classées suivant le test de TNK (Tableau 3) en cinq groupes homogènes où chaque produit organique a formé un groupe à part :

- *Le groupe (a) présenté par le (FV) ;*
- *Le groupe (b) où figure le (FD) ;*
- *Le groupe (c) présenté par (FB) ;*
- *Le groupe (d) présenté par (FC) ;*
- *Le groupe (f) correspond aux (RPD);*
- *Le groupe (e) correspond au (Témoin).*

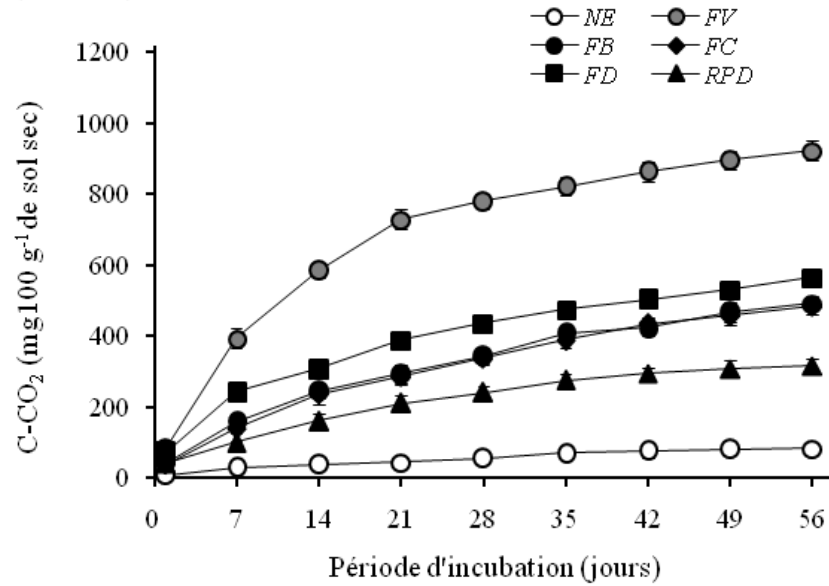
D'après le classement des groupes homogènes, il est évident que les plus forts dégagements de CO₂ sont obtenus en présence d'une matière organique facilement biodégradable représentée par le fumier de volailles.

Tableau 3. Résultats de l'analyse statistique des effets des facteurs étudiés et de leur interaction sur la minéralisation du carbone (dégagement de CO₂)

Facteur	C-CO₂ (mg 100⁻¹ de sol)
Niveau de salinité du sol (NS)	
Sol non salé (NS) (CE = 0.55 dS m⁻¹)	393.163 (a)
Sol non salé (SS) (CE =2.35 dS m⁻¹)	328.512 (b)
Type de produit organique	
Fumier de volailles (FV)	784.95 (a)
Fumier de dromadaire (FD)	413.96 (b)
Fumier de caprins (FC)	350.79 (c)
Fumier de bovins (FB)	332.10 (d)
Résidus de Palmier dattier (RPD)	216.46 (e)
Témoin (sans apport) (T0)	60.741 (f)
Temps d'Incubation	
56^{ème} jour	513.91 (a)
49^{ème} jour	489.59 (b)
42^{ème} jour	466.76 (c)
35^{ème} jour	444.05 (d)
28^{ème} jour	403.83 (e)
21^{ème} jour	360.35 (f)
14^{ème} jour	300.44 (g)
07^{ème} jour	206.81 (h)
01^{ème} jour	52.75 (i)
Signification statistique (Valeur P ANOVA)	
Niveau de salinité (NS)	***
Type de produit organique (PO)	***
Temps d'incubation (TI)	***
Interaction : NS × PO	***
Interaction : TI × PO	***
Interaction : TI × NS	***
Interaction : NS × PO × TI	***

Signification statistique: NS : Non Significatif; Significatif* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$. Dans les colonnes, les valeurs moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différents à $P \leq 0,05$.

(Sol salé)



(Sol non salé)

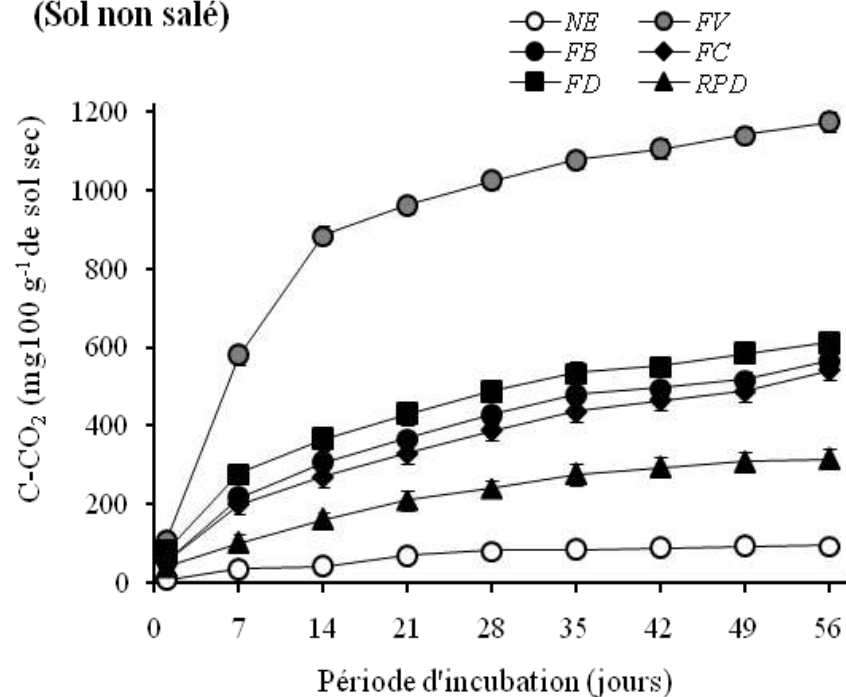


Figure 1 . Evolution de dégagement cumulé de C-CO₂ (mg 100 g⁻¹ de sol sec) au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)

En effet, le type de l'apport organique accroît significativement le dégagement de CO₂. Ce qui justifie les différences de l'activité respiratoire observées dans sol suite à son enrichissement par les différents types de produits organiques. Ainsi, les résultats obtenus ont montré que le dégagement de CO₂ dépend de la composition biochimique des apports organiques incorporés au sol.

Ces résultats corroborent ceux de Swift *et al.* (1979), Khalil *et al.* (2005), Nourbakhsh et Hosseini (2006) et Oustani *et al.* (2010), révélant que la décomposition des matières organiques apportées au sol est fortement liée à leur qualité biochimique.

En effet, la comparaison des différents produits montre que l'augmentation du dégagement de CO₂ est en faveur du FV. Ce dernier accroît le dégagement de CO₂ de 89.61, 123.75, 136.35, 262.63 % respectivement par rapport au FD, FB, FC et aux RPD.

La faible activité respiratoire dans les sols témoins est due à leurs faibles teneurs en carbone et en azote et par l'absence d'une source d'énergie (Par manque de substrats organiques), nécessaire pour assurer les activités métaboliques des microorganismes. Ces résultats sont en concordance avec ceux d'Al-Busaidi *et al.* (2014), qui ont signalé une faible activité respiratoire des sols non soumis à l'apport organique à cause de leurs faibles teneurs en matière organique, par suite de faibles restitutions organiques aux sols sous forme de résidus des végétaux.

3. 2. Effet de la salinité sur la minéralisation du carbone

L'examen de la figure 1 (a, b) montre que le sol sableux non salé enrichi, présente un dégagement plus intense que le sol sableux salé enrichi quel que soit, le type de traitement. Ces observations ont été confirmées par l'analyse statistique qui a montré des différences significatives pour le facteur salinité ($P < 0.001$) (Tableau 3). Les moyennes obtenues sont de 391.16 et 328.51 mg 100⁻¹g de sol sec respectivement pour les sols sableux non salé et salé. Le test de TNK montre deux groupes homogènes bien distincts :

- *Le premier groupe (a) où figurent les traitements de sol sableux non salé (NS)*
- *Le deuxième groupe (b) où figurent les traitements du sol sableux salé (SS).*

Ces résultats montrent donc l'influence de la salinité sur l'activité respiratoire du sol, traduite par une réduction significative du dégagement de CO₂ de l'ordre de 16.01%, en conditions salines.

Les résultats obtenus révèlent que la respiration du sol diminue avec l'augmentation de la salinité, confirmant des études antérieures qui ont montré que l'activité microbienne est significativement réduite en conditions salines (McCormick et Wolf, 1980; Halitim et Dellal, 1992; Rao et Patha, 1996; Rietz et Haynes, 2003; Yuan *et al.*, 2007; Chowdhury *et al.*, 2011; Setia et Marschner, 2012 ; Yan et Marschner, 2012 ; Al-Busaidi *et al.*, 2014; Reddy et Crohn, 2014 ; Sall *et al.*, 2015).

Toutefois, le taux de réduction de l'activité respiratoire enregistré par la présente étude est faible par rapport aux taux obtenus par Halitim et Dellal (1992) et Oustani (2010). Ces derniers ont rapporté des taux de réduction beaucoup plus élevés de l'ordre de 33 et 21% respectivement pour les deux auteurs. Ces différences peuvent être expliquées par la nature du sol dans le premier cas (Sol argileux à teneur élevée en Na⁺) et à l'importance de la salinité du sol dans le deuxième cas ($CE_{1/5}$ = élevée 8.2 dS m⁻¹).

Selon Gallali (1980), le flux de CO₂ diminue presque de moitié en passant de faible à haute conductivité du sol.

Halitim et Dellal (1992) et Reddy et Crohn, (2014) ont montré que dans les conditions salines, l'augmentation du potentiel extracellulaire agit considérablement sur le dégagement de CO₂, ceci est dû selon ces auteurs, à une action directe de la salinité sur l'activité microbiologique (augmentation de la pression osmotique du sol et/ou à l'accumulation des ions toxiques dans les cellules microbiennes). Mais, probablement à une action indirecte par la limitation de la diffusion de l'oxygène par suite d'un ESP très élevé dispersant la structure du sol dans les sols salins sodiques.

3. 3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur le dégagement cumulé de C-CO₂

L'analyse statistique a illustré des différences significatives de l'effet de l'interaction des facteurs étudiés sur le dégagement de CO₂ au cours de l'incubation. En fait, l'interaction des deux facteurs en fonction du temps (Salinité × Type de produit organique × Temps d'incubation) sur le dégagement de CO₂ a mis en évidence des différences significatives entre les différents traitements ($P < 0.001$) (Tableau 3).

Le plus fort dégagement de CO₂ a été obtenu par le sol non salé traité par le fumier de volailles (NSEFV) aux premières semaines de l'incubation, alors que le plus faible dégagement a été enregistré par le sol salé non soumis à l'apport organique (SSNE).

Les résultats relatifs à l'effet interactif sont en accord avec des travaux antérieurs enregistrés dans les sols salés, où l'activité microbienne est généralement corrélée négativement avec les concentrations en sels (Mallouhi et Jacquin 1986 ; Rietz et Haynes, 2003 ; Sardinha *et al.*, 2003), mais positivement corrélée avec la teneur en carbone (Zahran, 1997; Tejada, 2006). Ainsi, à l'issue de 56 jours d'incubation à 28°C, les dégagements cumulés de dioxyde de carbone observés dans les sols enrichis, que ce soit en sol sableux non salé ou salé, sont supérieurs à ceux des sols témoins (Fig 1 a ,b). En effet, des dégagements cumulés de 1173.26, 610.82, 563.95, 541.95, 315.95 et 95.93 mg100g⁻¹ ont été enregistrés par NSEFV, NSEFD, NSEFB, NSEFC, NSRPD et NSNE. Alors que les quantités dégagées en conditions salines sont de 922.53, 565. 84, 493.15, 484.46, 315.97 et 84.78 mg100g⁻¹ de sol respectivement SSEFV, SSEFD, SSEFB, SSEFC, SSERPD et SSNE.

3. 4. Dynamique de la minéralisation de l'azote

Les résultats de l'analyse de la variance, ANOVA à deux critères de classification avec des mesures répétées ont révélé des effets significatifs des facteurs étudiés (salinité et type de produit organique) et de leur interaction au cours de l'incubation sur la minéralisation de l'azote, dépendant du paramètre analysé (Tableau 4). Toutefois, aucun effet significatif n'a été enregistré pour l'interaction (Salinité × Temps de prélèvement) et (Salinité × Temps × Type de produit organique) relatifs au processus de l'ammonification (N-NH₄⁺).

4.1. Production cumulé de l'azote ammoniacal (N-NH₄⁺)

L'examen des courbes de l'ammonification dans les deux sols sableux non salé (SN) et salé (SS) enrichis par les différents produits organiques fait ressortir que l'addition des matières organiques aux sols, influe significativement sur le processus de l'ammonification ($P < 0.001$) (Tableau 4) qui est plus intense au début qu'à la fin de l'incubation, comparativement aux sols non enrichis, où l'ammonification évolue de manière plus lente (Fig. 2 a, b).

Néanmoins, il est clair que les différents produits ont contribué mais de manière différente à accroître la teneur en azote ammoniacal du sol. Ainsi, la figure 2 (a) relative à l'évolution cumulative de l'azote ammoniacal dans le sol sableux non salé (NS), montre que pour le sol enrichi en fumier de volailles, le rythme d'augmentation des teneurs en azote ammoniacal atteint le maximum aux premières semaines de l'incubation, ensuite la production de l'azote ammoniacal augmente progressivement jusqu'à la fin de l'incubation.

Tableau 4 . Résultats de l'analyse statistique des facteurs étudiés et de leur interaction sur la minéralisation de l'azote : Ammonification (N-NH₄⁺) ; Nitrification (N-NO₃⁻) et Azote minéral (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻)

Facteur	Paramètre	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ + N-NO ₃ ⁻
Niveau de salinité du sol (NS)				
	NS (0.55 dS m ⁻¹)	3.05 (a)	6.17 (a)	9.23 (a)
	SS (2.35 dS m ⁻¹)	2.95 (b)	5.06 (b)	8.02 (b)
Type de produit organique (PO)				
	Fumier de volailles (FV)	5.74 (a)	9.73 (a)	15.47 (a)
	Fumier de dromadaire (FD)	3.78 (b)	6.96 (b)	10.74 (b)
	Fumier de caprins (FC)	3.24 (c)	6.22 (c)	9.46 (c)
	Fumier de bovins (FB)	3.16 (d)	6.13 (c)	9.28 (c)
	Résidus de palmier (RPD)	1.74 (e)	3.92 (d)	5.66 (d)
	Témoin (sans apport) (T0)	0.39 (f)	0.74 (e)	1.13 (e)
Temps d'Incubation (en jours)				
	56 ^{ème} jour	3.83 (a)	7.09 (a)	10.92 (a)
	49 ^{ème} jour	3.76 (a)	6.97 (a)	10.74 (a)
	42 ^{ème} jour	3.63 (b)	6.81 (b)	10.45 (b)
	39 ^{ème} jour	3.52 (c)	6.65 (c)	10.17 (c)
	28 ^{ème} jour	3.42 (d)	6.46 (d)	9.88 (d)
	21 ^{ème} jour	3.27 (e)	6.21 (e)	6.21 (h)
	14 ^{ème} jour	3.01 (f)	5.83 (f)	9.48 (e)
	11 ^{ème} jour	2.70 (g)	5.38 (g)	8.85 (f)
	07 ^{ème} jour	2.38 (h)	4.70 (h)	8.08 (g)
	03 ^{ème} jour	2.09 (i)	3.57 (i)	5.67 (i)
	00 ^{ème} jour	1.42 (j)	2.12 (j)	3.54 (j)
Signification statistique (Valeur P ANOVA)				
	Niveau de Salinité (NS)	***	***	***
	Type de Produit organique (PO)	***	***	***
	Temps d'Incubation (TI)	***	***	***
	Interaction : NS × PO	*	***	***
	Interaction : TI × PO	NS	***	***
	Interaction : TI × NS	***	***	***
	Interaction : NS × PO × TI	NS	***	***

Signification statistique: NS : Non Significatif; Significatif*: P <0.05 ; **: P <0. 01 ; ***: P <0.001. Dans les colonnes, les valeurs moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différents à P ≤ 0,05.

Alors que, pour le même sol enrichi par les autres produits, une augmentation progressive a été observée durant les trois premières semaines de l'incubation, au delà desquelles, la courbe montre une faible augmentation jusqu'à la fin de l'incubation.

Quoique, le sol sableux salé produit de faibles quantités d'azote ammoniacal par rapport à celles enregistrées en conditions non salines, une tendance d'évolution similaire a caractérisé les deux sols (Fig 2.b).

Quant aux sols témoins, une faible production de l'azote ammoniacal a été observée dès le début de l'incubation, qui se poursuit jusqu'à la fin de celle-ci.

4.1.1. Effet du type de produit organique sur l'azote ammoniacal (N-NH₄⁺)

L'ammonification est aussi fortement influencée par la nature de la matière organique additionnée au sol. En effet, l'analyse de la variance fait ressortir des différences significatives pour les différents produits organiques ($P < 0.001$) (Tableau 4).

Par ailleurs, le test de classement des moyennes (TNK) relatif à la production de l'azote ammoniacal (Tableau 4) distingue six groupes homogènes, où l'ordre de classement s'établit comme suit : Le groupe **a** (5.74 mg/100⁻¹ g) > le groupe **b** (3.78 mg/100⁻¹) > le groupe **c** (3.24 mg/100⁻¹) > le groupe **d** (3.16 mg/100⁻¹) > le groupe **e** (1.74 mg/100 g) > le groupe **f** (0.39 mg/100⁻¹).

- *Le groupe (a) présenté par le (FV);*
- *Le groupe (b) présenté par le (FD);*
- *Le groupe (c) présenté par le (FB);*
- *Le groupe (d) présenté par le (FC) ;*
- *Le groupe (e) présenté par les (RPD);*
- *Le groupe (f) présenté par le (Témoin).*

Les taux d'augmentation de l'azote ammoniacal sous l'effet de fumier de volailles par rapport aux autres produits sont de l'ordre de 51.85, 77.16, 81.64 et 229 % respectivement pour le FD, FC, FB et les RPD.

Le processus de l'ammonification est plus élevé dans les traitements du sol par le fumier de volailles par rapport aux autres produits, ce qui peut être expliqué par sa richesse en azote (N), sa faible teneur en lignine et son faible rapport C/N. Son application au sol stimule tous les groupes microbiens (y compris les producteurs-ammonium).

En outre, l'incorporation de FV, relativement riche en substances hydrocarbonées et en différents nutriments, en particulier le calcium, a significativement stimulé les microorganismes ammonificateurs (Agrawal *et al.*, 1971).

Aussi, il est à souligner que la phase d'immobilisation de l'azote (dans laquelle les germes métabolisent l'azote minéral surtout sous sa forme ammoniacale) ne se manifeste pas dans notre sol, ceci pourrait être associé au rapport C/N. Généralement, il est admis que le C/N critique au dessous duquel la tendance est à la minéralisation, est compris entre 20 et 25, alors que pour un rapport C/N plus élevé, la tendance est en faveur à l'immobilisation (Aleksander, 1994). L'absence de l'immobilisation de l'azote par les microorganismes au niveau des deux types de sols enrichis en résidus de palmier de dattier, malgré son rapport C/N élevé, peut être attribuée, en dehors de sa faible teneur en azote, aux particularités édaphiques de nos sols.

D'après Jacquin *et al.* (1991), les sols à faible CEC et à texture grossière défavorisent l'immobilisation de l'azote et stimule au contraire la minéralisation de cet élément (Khalil *et al.*, 2002).

4.1.2. Effet de la salinité sur l'azote ammoniacal

L'analyse statistique relative à l'azote ammoniacal dénote un effet salinité significatif ($P < 0.001$) (Tableau 4). Les moyennes obtenues pour les deux sols sableux non salé (SN) et salé (SS) sont respectivement de 3.05 et 2.95 $\text{mg}100^{-1}\text{g}$ de sol. La réduction de l'ammonification sous l'effet de la salinité est de 3.28%. La comparaison des moyennes a mis en évidence deux groupes homogènes : le groupe (a) présente les traitements du sol sableux non salé et le groupe (b) présente les traitements du sol sableux salé (Tableau 4). Ce taux relativement faible de l'inhibition de l'ammonification par les sels, est dû au fait que cette dernière est un processus peu spécifique, qui se déroule dans tous les sols quelles que soient les conditions écologiques (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Alexander, 1994).

4. 2. Production cumulé de l'azote nitrique (N-NO_3^-)

La libération de N-NO_3^- au cours de l'incubation est fonction de la nature des intrants organiques et le degré de salinité du sol. Les résultats relatifs à la nitrification (Fig.3 a .b) montre que l'apport des substrats organiques provoque une augmentation significative de la teneur en azote nitrique ($P < 0.001$) pour les deux sols sableux non salé (NS) et salé (SS), enrichis par rapport aux sols non enrichis (Tableau 4).

Cette teneur semble augmenter davantage quand le sol est enrichi par le fumier de volailles. Le maximum d'augmentation de l'azote nitrique pour ce fumier est obtenu au cours des trois premières semaines de l'incubation pour les deux sols sableux non salé et salé. Par la suite, la courbe de l'évolution de l'azote nitrique montre un rythme d'augmentation faible par rapport au début de l'incubation et qui se poursuit jusqu'à la fin de celle-ci.

Au regard à la cinétique de la production de l'azote nitrique pour les autres produits testés, on voit que ces produits ont tendance à se minéraliser beaucoup plus lentement que le FV. En fait, les quantités de l'azote nitrique produites sont faibles par rapport à celles obtenues par les sols traités par le fumier de volailles tout au long de l'incubation. Néanmoins, elles présentent à leur tour un maximum aux premières semaines de l'incubation.

L'allure des courbes illustrées dans la figure 3 (a et b), nous permet également de constater que le sol non salé présente une nitrification plus intense que le sol salé, quelque soit le type de traitement. Le rythme de production des nitrates semble diminuer graduellement en passant du sol sableux non salé (NS) au sol sableux salé (SS).

En fait, l'examen de la cinétique de production de l'azote nitrique montre que le maximum de l'azote nitrique est enregistré durant les premières semaines de l'incubation en sol sableux non salé. Dans le cas du sol sableux salé, les quantités de l'azote nitrique libérées, bien que, plus faibles que celles du sol précédent, mais elles semblent suivent la même allure qu'en conditions non salines ; un maximum au début de l'incubation qui se poursuit jusqu'à la troisième semaine, au-delà de laquelle une certaine stabilité de la production de l'azote nitrique est constatée et qui se poursuit jusqu'à la fin de l'incubation.

Enfin une production faible de l'azote nitrique a caractérisé les sols témoins par rapport aux sols enrichis tout au long de l'incubation.

4.2.1. Effet du type de produit organique sur l'azote nitrique (N-NO₃⁻)

La nitrification est fortement influencée par la nature de l'apport organique additionné au sol. L'analyse statistique a révélé des différences significatives entre les différents produits ($P < 0.001$) (Tableau 4). Les moyennes obtenues sont de 9.74, 6.96, 6.23, 6.13, 3.93, 0.74 mg 100⁻¹ de sol sec respectivement pour le FV, le FD, FC, FB, RPD et le sol sans apport. Le test de TNK a fait ressortir cinq groupes homogènes bien distincts, où l'ordre de classement s'établit comme suit : Le groupe a (FV) > le groupe b (FD) > le groupe c (FC = FB) > le groupe d (RPD) > le groupe e (Témoin).

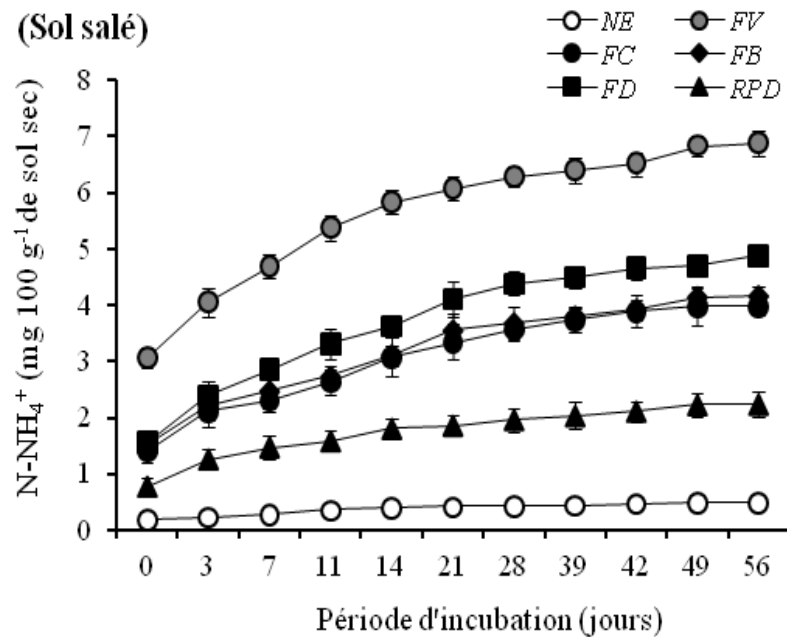
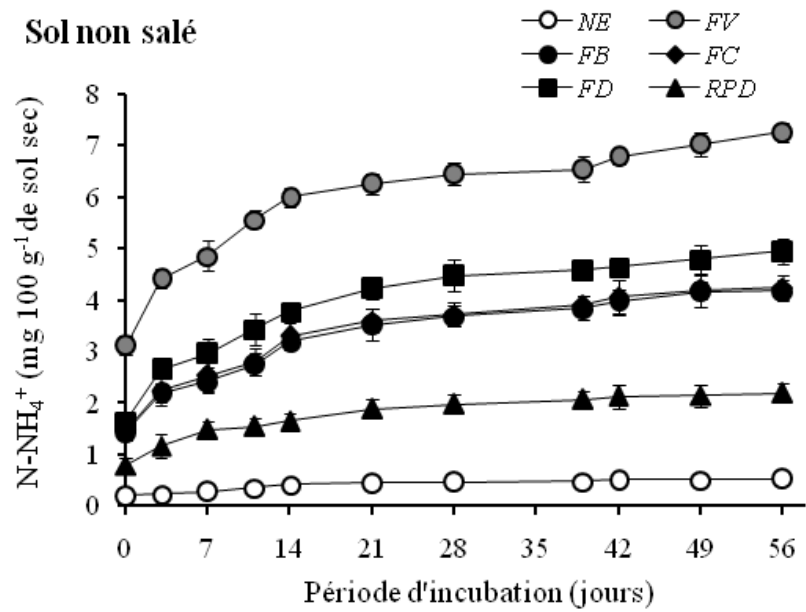


Figure 2. Evolution cumulé de $N-NH_4^+$ (mg100⁻¹g de sol sec) libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)

L'augmentation de la nitrification sous l'effet du fumier de volailles par rapport aux autres produits organiques est de 39.94, 56.34, 58.89, 147.8 % respectivement pour le FV, FD, FC), FB et RPD.

Ces résultats montrent que l'incorporation de la matière organique dans le sol stimule considérablement le processus de la nitrification, en raison des fortes quantités de sources d'énergie et du carbone facilement utilisable introduit au sol. Ces observations concordent avec ceux de Yousif et Abdalla (2009) qui ont montré que la production des composés intermédiaires de métabolisme de la matière organique semble agir positivement sur les microorganismes de la nitrification.

La comparaison des différents produits entre eux montre que l'azote nitrique augmente davantage quand les sols sont enrichis par le FV. Ce dernier, grâce à son rapport C/N bas, à sa richesse en azote et en calcium et en autres éléments, favorise mieux l'activité des germes nitrificateurs. Par contre, les autres produits organiques, relativement pauvres en azote (C/N élevé) ne stimulent que faiblement l'activité de ces microorganismes (Bakatyoko *et al.*, 2009 ; Azeez et Van Averbeké, 2010).

Le rapport C/N des intrants organiques règle largement l'accumulation et/ou la disparition du N-NO₃⁻. Dans une expérience similaire, Nourbakhsh et Dick (2005) ont démontré que le fort potentiel de la nitrification des sols traités avec le fumier de volailles est fortement lié à sa teneur élevée en N et à son rapport C/N bas.

4.2.2. Effet de la salinité sur l'azote nitrique (N-NO₃⁻)

D'après l'allure des courbes illustrées dans la figure 3 (a et b), le sol non salé présente une nitrification plus intense que le sol salé, quel que soit le type de traitement.

L'analyse statistique a montré un effet de salinité hautement significatif ($P < 0.001$) sur la nitrification (Tableau 4). Les moyennes de l'azote nitrique obtenues sont de 6.17 et 5.07 mg100⁻¹ g de sol sec respectivement pour les sols sableux non salé et sableux salé. La réduction significative de la nitrification par la salinité apparaît également à travers le test TNK, où il est constaté que les sols se partagent en deux groupes homogènes. Le groupe (a) du sol sableux non salé (NS) et le groupe (b) du sol sableux salé (SS) (Tableau 4).

Ces résultats montrent donc l'influence de la salinité sur l'activité respiratoire du sol, qui se traduit par une réduction significative de l'azote nitrique de l'ordre de 18 % en conditions salines. En effet, le rythme de production des nitrates semble diminuer graduellement en conditions salines. Le taux de réduction enregistré par cette étude est relativement faible par rapport à nos travaux antérieurs, où il a été enregistré un taux de réduction de 36 % sous l'effet de la salinité (Oustani, 2006), ce qui peut être lié au degré de la salinité du sol qui était très élevée dans notre précédent travail ($CE_{1/5} \text{ sol} = 8.2 \text{ dS m}^{-1}$).

La réduction de la nitrification par la salinité peut être liée à la réaction alcaline des sols salés. D'après Pathak et Rao (1998), le pH élevé des sols salés conduit à la suppression de certaines espèces bactériennes telles que les bactéries nitrifiantes, cas du *Nitrobacter* (Souidi et Chian, 1990; Khalil *et al.*, 2005; Sall *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus montrent par ailleurs, que le processus de la nitrification est plus sensible à la salinité que l'ammonification, ce qui est en concordance avec ceux de McCormick et Wolf (1980), Frankenberger (1982), Pathak et Rao (1998) et Azam et Ifzal (2006).

4.2.3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur l'azote nitrique (N-NO₃)

L'analyse statistique a mis en évidence des différences significatives pour l'effet de l'interaction des facteurs étudiés analysés deux à deux, ainsi que de leur interaction au cours de l'incubation. L'analyse de la variance effectuée sur l'interaction (Salinité × Produit organique × Temps) a indiqué des différences significatives entre les différents traitements ($P < 0.001$) (Tableau 4). Les quantités les plus élevées de l'azote nitrique ont été enregistrées par le sol non salé traité par le fumier de volailles (NSEFV) au cours des premières semaines de l'incubation, alors que les plus faibles ont été observées par le sol salé non enrichi (SSNE).

L'incidence positive d'un apport organique dans les sols salés est due à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces sols. Cet effet améliorant en réponse à l'apport organique semble plus évident notamment pour le processus de la nitrification, dans la mesure où l'ammonification paraît un processus peu spécifique et se déroule pratiquement dans tous les sols.

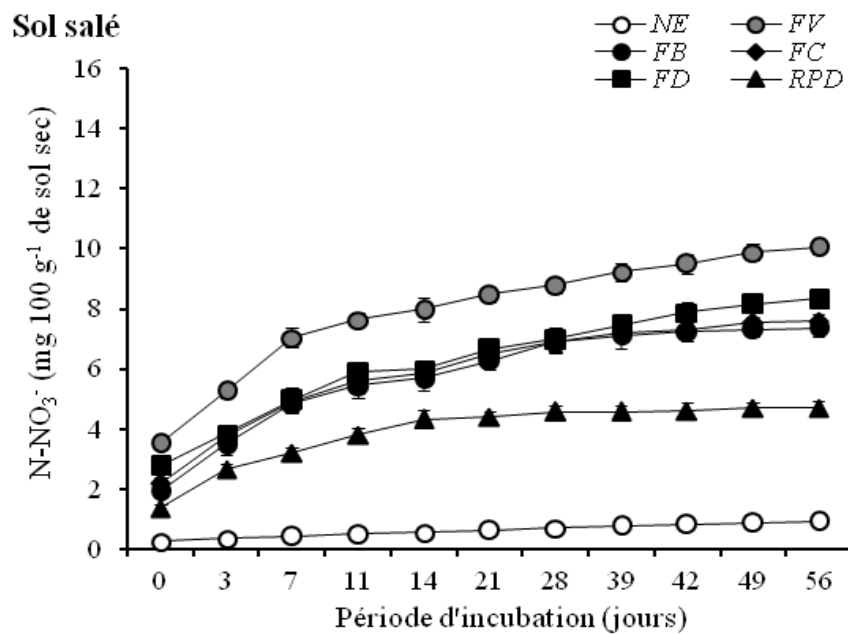
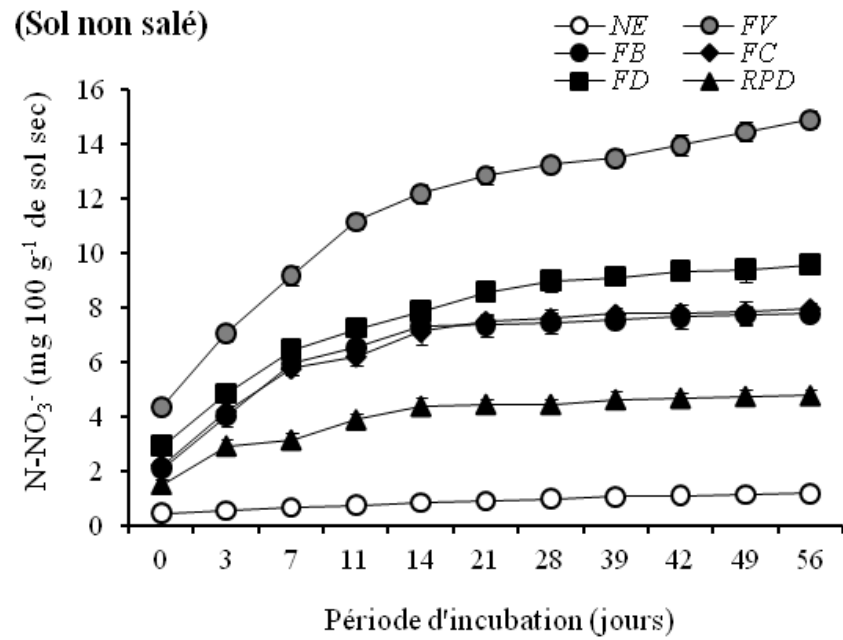


Figure 3. Evolution de $N-NO_3^-$ cumulé ($mg 100^{-1} g$ de sol sec) libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)

L'apport de la matière organique agit directement en enrichissant les sols salés en éléments nutritifs et en substrats énergétiques nécessaires pour toute relance biologique des sols, et indirectement en abaissent le pH de ces sols (Morel *et al.*, 1989).

En effet, le pH alcalin notamment du sol salé semble influe significativement et négativement sur les microorganismes nitrificateurs du genre nitrobacter, très sensibles à l'élévation du pH (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Chao *et al.*, 1993; Soudi et Chian, 1990 ; Sall *et al.*, 2015). Alors que, l'abaissement du pH des deux sols initialement alcalins par l'apport organique a probablement favorisé la prolifération des germes nitrificateurs, notamment que ces de derniers sont des germes neutrophiles (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Chao *et al.*, 1993).

La faible teneur en azote nitrique notée dans les sols non enrichis (Traitements témoins), est due au fait que les deux sols sont pauvres en matière organique et azote. De plus, dans le sol sableux salé non enrichi (Traitement témoin), la salinité inhibe le processus de la nitrification (Nitritation et nitratation).

Ainsi, au bout de 56 jours de l'incubation, les teneurs en azote nitrique les plus élevées sont celles enregistrées respectivement dans les deux sols (NSEFV) et (SSEFV) avec 14.91 et 10.06 mg 100g⁻¹ de sol sec. Cependant, des teneurs moins élevées ont été observées par les autres produits organiques avec 9.58 et 8.32 mg 100g⁻¹ de sol sec respectivement pour les deux sols enrichis en fumier de dromadaire (NSEFD et SSEFD).

Les fumiers de caprins et de bovins ont enregistré des teneurs presque similaires pour les deux sols de l'ordre de 7.95 et 7.78 mg100g⁻¹ respectivement pour (NSEFC) et (NSEFB) et de 7.58 et 7.35 100g⁻¹ respectivement pour (SSEFC) et (SSEFB). Par ailleurs, les deux types de sol (NSERPD et SSERPD) ont enregistré la même teneur en azote nitrique de 4.7 mg 100g⁻¹, en réponse à l'application des résidus de palmier dattier (RPD).

Toutefois, les plus faibles quantités de l'azote nitrique ont été enregistrées par les sols non enrichis, sableux non salé (NS) et salé (SS), soient des teneurs de 1.19 et 0.92 mg 100g⁻¹ de sol sec.

4.3. Relation entre les deux formes minérales de l'azote N-NH₄⁺ et N-NO₃

D'après les résultats de la minéralisation cumulative des deux formes de l'azote minéral, l'azote ammoniacal est hautement corrélé à l'azote nitrique pour les différents traitements des

deux sols avec les différents types de matières organiques. En effet, les droites de régression (Fig.4) illustrent l'intensité de la liaison entre ces deux formes minérales de l'azote. Les corrélations positives indiquées par l'analyse statistique nous permettent de confirmer l'absence de l'immobilisation de l'azote ammoniacal par les microorganismes. Autrement dit que la majorité de l'azote ammoniacal formé est rapidement nitrifié.

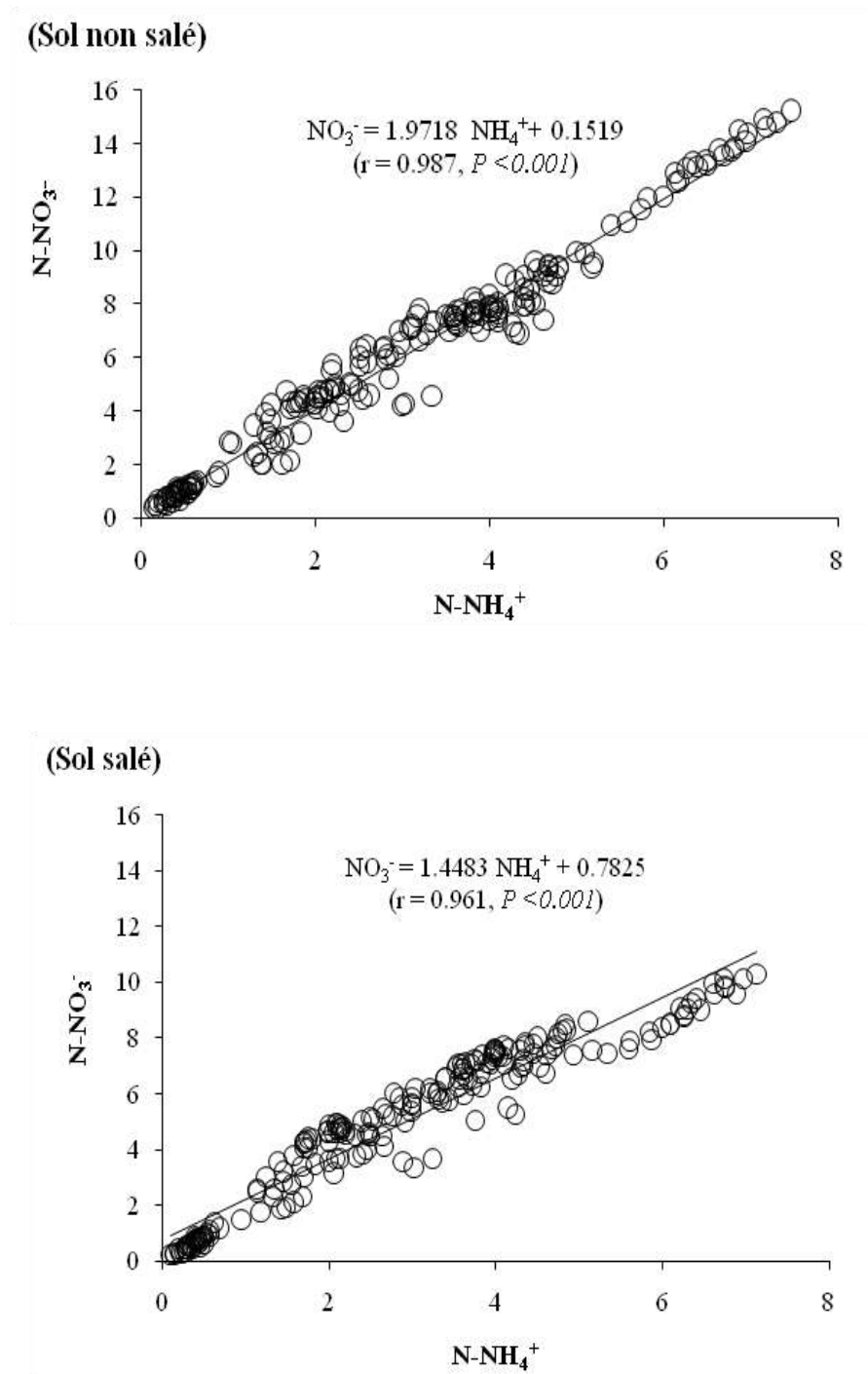


Figure 4. Relation entre l'azote ammoniacal et nitrique (en mg100 g⁻¹ de sol) dans : (a) le sol non sableux (NS) et (b) salé (SS)

.4. Production cumulé de l'azote minéral (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻)

L'observation de la figure 5 (a , b), relative à la cinétique d'évolution de l'azote minéral dans le temps, indique que la teneur en azote minéral augmente durant les premières semaines de l'incubation pour l'ensemble des traitements. Cependant, il se produit une diminution de la production de l'azote minéral vers la fin de l'incubation.

4.4.1. Effet du type de produit organique sur l'azote minéral

L'azote minéral est au même titre que l'azote nitrique et ammoniacal (Analysés séparément), est significativement ($P < 0.001$) influencé par l'apport et par la nature de la matière organique apportée au sol. Les quantités produites (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) sont nettement plus élevées dans les sols soumis à l'apport organique que celles issues des sols non enrichis. Les moyennes de l'azote minéral enregistrées pour les différents produits organiques sont de 15.48, 10.84, 9.47, 9.29, 5.67 et 1.13 mg100⁻¹g respectivement pour le fumier de volailles, fumier de dromadaire, fumier de caprins, fumier de bovins et sans apport.

Le taux d'augmentation de l'azote minéral sous l'effet de fumier de volailles par rapport autres produits organiques est de 42.80, 63.46, 66.63, 173 % respectivement pour le FC, FC, FB, RPD. En effet, le test de Newman et Keuls distingue six groupes homogènes : le groupe (a) présenté par le (FV). Le groupe (b) correspond au (FD), le groupe (c) regroupe le (FD) et (FB), le groupe (d) présenté par les (RPD) et le groupe (e) présenté par le témoin (Tableau 4).

Les taux d'augmentation de la production de l'azote minéral enregistrés par la présente étude sont plus élevés que ceux obtenus par Carter et Jacquin (1985), qui ont indiqué que l'apport de la matière organique aux sols, avait pour effet d'augmenter la minéralisation de l'azote de 10 à 40 % par rapport à l'état initial.

4.4.2. Effet de la salinité sur l'azote minéral (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻)

Par ailleurs, l'analyse statistique relative à l'effet de la salinité sur la forme minérale de l'azote a décelé des différences significatives ($P < 0.001$) entre les deux sols (Tableau 4). Le test de classement des moyennes met en évidence deux groupes homogènes : le groupe (a) qui présente les traitements du sol sableux non salé (9.23 mg 100g⁻¹) et le groupe (b) qui présente les traitements du sol sableux salé (8.03 mg 100g⁻¹). La réduction de l'azote minéral sous l'effet de la salinité est de l'ordre de 13 %.

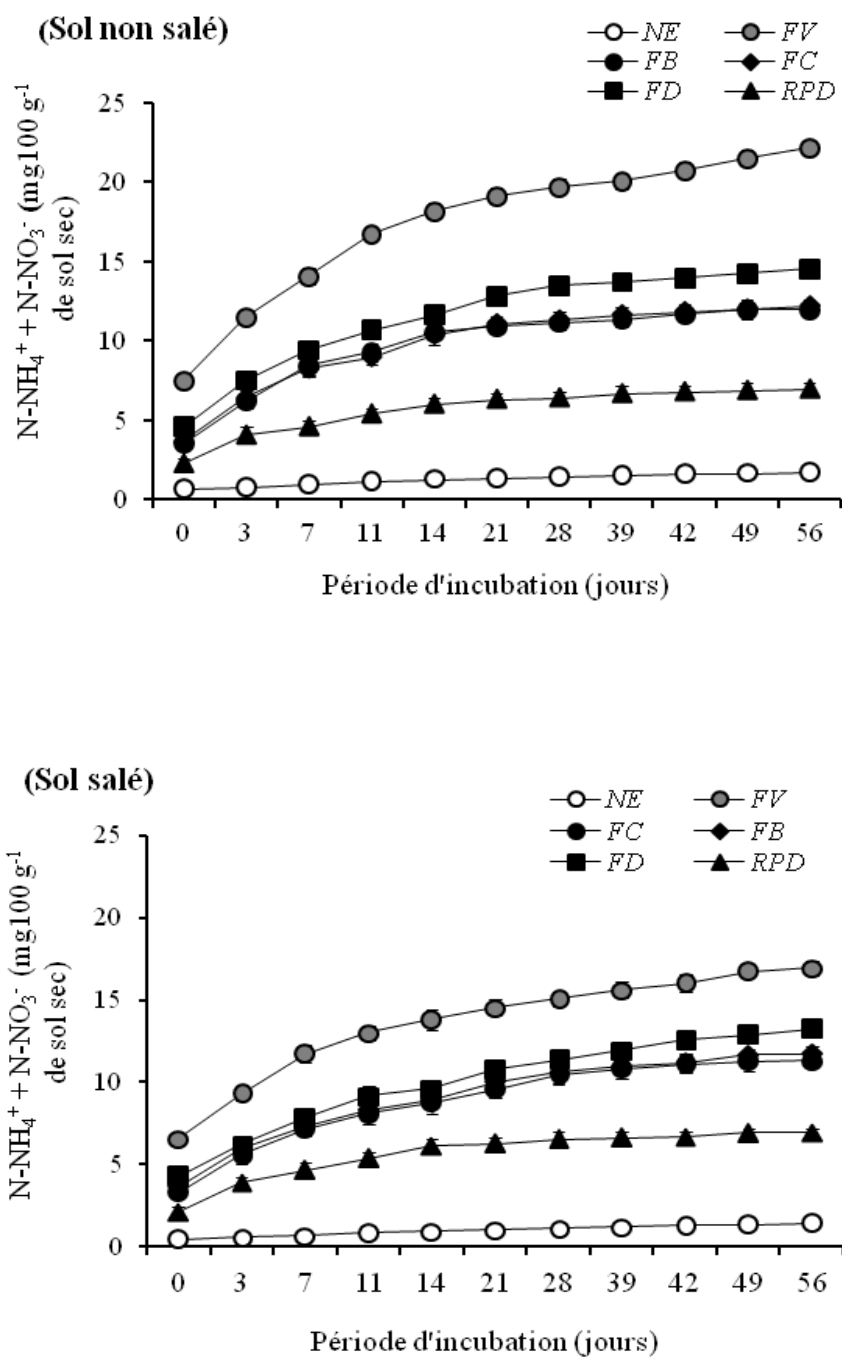


Figure 5. Evolution de l'azote minéral ($N-NH_4^+$ et $N-NO_3^-$) cumulé ($mg100^{-1}g$ de sol sec) libéré au cours de l'incubation dans le sol non enrichi (NE) et enrichi en (FV), (FB), (FC), (FD) et (RPD)

4.4.3. Effet de l'interaction des facteurs étudiés sur la l'azote minéral

En ce qui concerne l'interaction (Salinité × Produit organique × Temps), l'analyse statistique a montré un effet significatif ($P < 0.001$) (Tableau 4). En effet, les deux sols répondent positivement à l'apport organique (sous forme de fumier) mais à des degrés variables selon la nature biochimique de ce dernier et le degré de salinité. La minéralisation de l'azote s'effectuée majoritairement dans les trois premières semaines de l'incubation, quelque soit le type du sol ou du produit organique.

L'apparition de l'azote minéral au niveau du sol salé, peut être expliquée, en admettant que notre échantillon héberge une microflore autochtone, supposée résistante à la salinité, les nouvelles conditions expérimentales (Température, humidité contrôlées) et l'apport des substrats organiques sont à l'origine de la stimulation de cette microflore autochtone (Halophile ou Halotolérante), d'où la reprise de l'activité minéralisatrice dès le début de l'incubation.

D'autre part, Ayaba et Oklcho (1975) révèlent que la matière organique incorporée au sol salé active la minéralisation de l'azote par le biais de la stimulation des micro-organismes présents dans la matière organique (Microflore zymogène), avant même que celle-ci arrive au contact du sol.

En comparant les différents traitements entre eux (Fig 5. a ,b), on constate que les teneurs les plus élevées en azote minéral, sont enregistrées dans le traitement du sol sableux non salé par le (FV), suivis par celles du traitements du sol sableux salé par le même fumier. Alors que, l'apport des autres produits ne semble pas avoir un effet aussi stimulant sur l'azote minéral que ce de FV. En fait, la présence des quantifiées relativement élevées en cellulose et en composés ligneux au niveau de ces produits fait que la fraction non hydrolysable (insoluble) soit relativement plus importante que la fraction aminée (Soluble) facilement minéralisable.

À l'issue de 56 jours de l'incubation, les résultats de l'évolution de l'azote minéral (Figure 6 a ,b et c), montrent qu'il se produit dans le sol sableux non salé une quantité d'azote minéral de 22.17, 11.97, 12.20, 14.53 et 6.98 mg 100 g⁻¹ de sol sec respectivement sous l'effet du FV, FB, FC, FD et les (RPD) contre 1.72 mg 100 g⁻¹ de sol sec dans le sol sableux non enrichi. Alors que, les plus faibles quantités ont été observées pour le sol sableux salé 16.94, 11.33, 11.72, 13.21 et 6.93 mg 100g⁻¹ de sol sec respectivement sous l'effet des même produits contre 1.41 mg 100g⁻¹ de sol sec dans le sol salé non enrichi.

IV. Conclusion chapitre

Au terme de cette partie expérimentale de notre étude, il est à conclure :

- Une faible activité minéralisatrice de l'azote et du carbone de la matière organique endogène des deux sols, en relation avec une alcalinité élevée et une faible taille du compartiment microbien par suite d'une faible richesse des deux sols en matières organiques.
- Une réactivité élevée des deux sols vis-à-vis de la décomposition des différents produits organiques apportés, avec une forte activité minéralisatrice de la matière organique en sol non salé qu'en sol salé.
- Une stimulation de l'activité microbienne de la minéralisation du carbone et de l'azote qui dépend largement de la nature des substrats organiques apportés aux sols, en particulier de leur vitesse de biodégradation. Ainsi, le fumier de volailles (Riche en composés facilement minéralisables et à C/N bas) accuse une plus grande stimulation des microorganismes décomposeurs que les autres produits (Riches en cellulose et en lignine et à C/N élevé).
- Un classement des produits organiques vis-à-vis de leur dynamique de décomposition dans les sols qui tient plus compte de leurs caractéristiques biochimiques que du niveau de la salinité du sol dans lequel, ils sont apportés. À ce titre, l'effet de la salinité se trouve masqué après enrichissement des sols en matière organique. En effet, l'analyse statistique effectuée sur l'interaction (Salinité × Produit organique) montre clairement que l'apport de la matière organique masque l'effet inhibiteur de la salinité vis à vis les activités microbiologiques intervenant dans la minéralisation de l'azote et du carbone.
- En ce qui concerne l'importance de la minéralisation, les résultats issus des tests respirométriques et de l'extraction de l'azote minéral ont montré un fort pouvoir minéralisation aux premières semaines de l'incubation pour l'ensemble des paramètres étudiés. Ce pouvoir est d'autant plus marqué que le niveau de la salinité du sol est faible, et que le produit organique est riche en composés facilement métabolisables.

Dans l'ensemble, les quantités cumulatives en CO_2 , NH_4^+ et NO_3^- enregistrées dans les sols enrichis sont supérieures à celles enregistrées par le témoin quel que soit le niveau de la salinité. Toutefois, les plus fortes émissions cumulées de CO_2 , N-NH_4^+ et N-NO_3^- à la fin de l'incubation ont été enregistrées par le sol non salé enrichi en fumier de volailles, soient des quantités de 1173.26, 7.26 et 14.91 $\text{mg } 100^{-1}$ g de sol sec respectivement.

Ces valeurs de minéralisation relativement élevées obtenues sous nos conditions expérimentales, que ce soit, pour les composés carbonés ou azotés sont en mesure d'expliquer la faible protection physique de la matière organique à cause de la texture sableuse des deux sols. Par ailleurs, la faible activité minéralisatrice enregistrée par les résidus de palmier dattier peut être expliquée par leur forte résistance à l'attaque microbienne par suite de leurs richesses en composés difficilement biodégradables.

Les résultats obtenus ont montré également que la production d'azote minéral pour tous les traitements est essentiellement sous la forme nitrrique, indiquant l'absence d'immobilisation de l'azote ammoniacal par suite de la faible CEC et de la texture grossière qui caractérisent les sols utilisés.

Au regard de la cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote au cours de l'incubation, on voit que l'ensemble des produits ont tendance à se minéraliser rapidement aux premières semaines de l'incubation. Cela montre bien la pertinence d'implanter une culture intermédiaire piège à nitrate notamment en cas de fumier de volailles pour limiter au maximum le lessivage de l'azote et valoriser au mieux l'intérêt agronomique de ce fumier.

Enfin, il est important de signaler que les cinétiques de minéralisation ont été obtenues en laboratoire dans des conditions de température et d'humidité contrôlées. Les épandages au champ sont conditionnés par des paramètres tels que les facteurs pédoclimatiques. Ainsi, il est difficile d'extrapoler les résultats obtenus en laboratoire par rapport aux conditions réelles rencontrées sur le terrain. Ces cinétiques permettent toutefois d'apprécier une tendance sur le comportement agronomique des différents produits organiques testés.

V. Conclusion deuxième partie

Les résultats obtenus à l'issue de cette partie de notre travail ont montré que l'apport des produits organiques aux sols salés sous les conditions climatiques arides améliore les propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol. Par conséquent, l'addition de ces produits est considérée comme une solution prometteuse pour la mise en valeur des sols salés, en particulier pour ceux caractérisés par la dominance de la fraction sableuse où l'apport organique est faiblement protégé.

La matière organique améliore les propriétés du sol salé, et, en même temps qu'elle exerce ses effets directs en tant que sources de substances énergiques et nutritives, elle agit indirectement en améliorant certaines propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés.

Dans ce cas, l'effet négatif de la salinité sur les propriétés du sol et sur l'activité des micro-organismes semble être masqué après son enrichissement en produits organiques.

Néanmoins, l'aptitude des produits organiques à modifier les propriétés du sol salé est liée à la composition biochimique spécifique de chaque produit. À ce titre, des différences significatives entre les différents produits organiques étudiés ont été mises en évidence, tant que, sur leurs effets sur les caractéristiques physiques et physico-chimiques, que sur leur dynamique de biodégradation dans le sol.

Concernant, leurs effets sur les propriétés physiques et physico-chimiques du sol salé, les résultats obtenus ont montré que les quatre types de fumier ont montré des effets plus importants sur le pH, CEC et CE, alors que, les résidus de palmier (RDP) ont essentiellement augmenté la capacité de rétention en eau du sol (CR).

Les faibles modifications des propriétés des sols enregistrées par les résidus de palmier dattier peuvent être expliquées par leur faible biodégradation au cours de l'essai en raison de leurs fortes teneurs en lignine et en cellulose par rapport aux autres produits.

Quant à leurs effets sur les propriétés microbiologiques, les résultats obtenus ont montré que l'apport des produits riches en carbone facilement métabolisable et en azote est considéré comme le facteur le plus limitant à l'égard de l'activité de la biomasse microbienne intervenant dans la minéralisation du carbone et de l'azote.

Le fumier de volailles, grâce à sa richesse en carbone facilement métabolisable, en azote et à ses faibles ratios C/N et lignine/N a montré des taux de minéralisation plus élevés que ceux obtenus par les autres produits testés.

En revanche, le faible taux de minéralisation des composés azotés et carbonés enregistrés par les résidus de palmier dattier peut être dû à leur nature lignino-cellulosique difficilement biodégradable de ce produit.

Par ailleurs, vu que nos conditions pédoclimatiques n'offrent que de maigres possibilités de l'évolution de la matière organique jusqu'au stade humus de bonne qualité, il faut penser à exploiter l'effet nutritif (Effet engrais) lié aux apports organiques, notamment ceux les plus concentrés en éléments nutritifs, tel est le cas du fumier de volailles. D'autant plus qu'on a pu montrer que les déchets de volailles à l'état de fumier, contrairement à la fiente de volailles, ne posent pas un grand problème d'augmentation de la salinité du sol.

En fait, les résultats obtenus dans cette partie de notre travail contredisent l'idée généralement admise que le fumier de volailles fait augmenter la salinité du sol. La détermination de la salinité globale exprimée par la conductivité électrique a montré que le fumier de volailles (FV) est caractérisé par une faible salinité par rapport aux autres fumiers testés. Conséquemment, il peut être recommandé dans le cadre d'un programme de fertilisation des sols salés sans risque de salinisation, seulement, il faut optimiser son utilisation notamment de l'apporter aux sols salés à des doses raisonnables bien étudiées. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de la troisième partie de notre travail, où il a été jugé utile d'intégrer dans notre étude, un essai d'optimisation de l'utilisation de ce fumier en conditions salines du champs, et ceci à travers la détermination de l'effet de doses croissantes de fumier de volailles sur l'amélioration de la production de la pomme de terre retenue comme plante test.

Essai de l'optimisation de la fertilisation organique à base de fumier sur la culture de la pomme de terre en conditions d'irrigation par des eaux chargées

Résumé

Dans les zones arides, la salinité des sols, l'irrigation avec des eaux saumâtres et l'apport massif d'engrais chimiques constituent des contraintes majeures pour le développement de la pomme de terre, culture stratégique pour notre pays. Afin de mettre en évidence l'effet de la fertilisation organique à base de fumier de volailles (FV) sur l'amélioration de la production de pomme de terre et l'augmentation de sa tolérance à la salinité, un essai au champ a été conduit dans la région de Ouargla, au Sud de l'Algérie sur une durée de quatre ans (2009-2012). La variation de certains paramètres de croissance (Nombre de tiges de plant⁻¹, longueur des tiges plant⁻¹, surface foliaire plant⁻¹), de rendement (Nombre de tubercules plant⁻¹, diamètre des tubercules plant⁻¹, rendement total t ha⁻¹), d'état nutritionnel et du contenu des feuilles de pommes de terre en proline et en chlorophylle a été évaluée à l'aide d'un dispositif split-plot comprenant six doses croissantes de fumier de volailles (0, 20, 30, 40, 50, 60 t ha⁻¹) testées dans trois sites expérimentaux avec des niveaux de salinité croissants : sol peu salé (SPS : conductivité électrique EC = 1.2 dS m⁻¹), sol salé (SS :CE = 2.29 dS m⁻¹) et sol très salé (STS :CE = 5.6 dS m⁻¹) et en conditions d'irrigation par une eau chargée en sels. Les résultats obtenus ont révélé une augmentation significative et proportionnelle de la plupart des paramètres étudiés avec l'augmentation des doses de FV par rapport au contrôle, quel que soit le niveau de salinité dans les trois sites expérimentaux. Toutefois, l'effet d'interaction (Salinité × Dose de fumier FV) a montré que les meilleures performances en terme de croissance, de rendement, d'état nutritionnel, du contenu foliaire en proline et en chlorophylle ont été enregistrées au niveau du sol très salé (STS) traité avec la dose la plus élevée de FV (60 t ha⁻¹). Par ailleurs, bien que l'ANOVA à trois critères de classification n'ait montré aucun effet significatif sur l'interaction des trois facteurs étudiés pour le rendement total ha⁻¹, une tendance de production plus élevée a été enregistrée au niveau de l'interaction (STS × 60 t ha⁻¹ × Année 2009) avec un rendement total de 45.9 t ha⁻¹. L'évaluation de l'état nutritionnel des plants de pomme de terre au stade floraison a montré que les concentrations de K⁺, Ca⁺⁺ et NO₃⁻ ont augmenté tandis que les concentrations de Na⁺ et Cl⁻ ont diminué dans les feuilles et les racines de la pomme de terre, en réponse à l'apport croissant en FV, principalement sous le niveau de salinité élevé. Ces résultats sont similaires pour les quatre ans. L'interaction entre la salinité et les doses de volailles de fumier était importante pour tous les paramètres de la plante, laissant penser que ce fumier pourrait effectivement être utilisé comme une stratégie pour atténuer les effets négatifs de la salinité et de soutenir la croissance des plantes dans des conditions salines. Par ailleurs, ces résultats suggèrent que la dose de 60 t ha⁻¹ de FV peut être considérée comme une dose organique optimale et une formule fertilisante exclusive sans utilisation d'engrais chimiques sous les conditions salines des régions arides.

Mots clés : Salinité, Fumier de volailles, État nutritionnel, Proline, Chlorophylle, Rendement, Régions arides.

I. Introduction

Dans les zones arides, la salinité du sol et des eaux d'irrigation est une contrainte environnementale majeure affectant les sols agricoles, souvent associée à la sécheresse (Zid grignon, 1991; Zhu, 2001; Lakhthar *et al.*, 2008 ; Alvarez *et al.*, 2015), elle conduit à une réduction continue des rendements des cultures (Munns, 2002; Rafat et Rafiq, 2009).

La salinisation des terres dans ces zones ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre avec un rythme de trois hectares par minute à cause de la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation (Pasternak et Malach, 1994 ; Levy et Taib, 2013), de l'intensification des cultures (Ghassemi *et al.*, 1995) et de l'utilisation exagérée des fertilisants chimiques (Grieve et Shannon, 1999) particulièrement en agriculture irriguée.

Les quantités énormes de sels accumulées dans les sols salés des régions arides affectent la nutrition hydrique et minérale des plantes (Levigneron *et al.*, 1995), notamment dans ces régions où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au-delà de la zone racinaire et, où les ressources en sols et en eaux d'irrigation sont trop salines pour la plupart des cultures stratégiques (Zhu, 2001; Munns, 2002; Rengasamy, 2006; Lakhthar *et al.*, 2008).

Les plantes dans ces arides régions se trouvent en permanence sous d'effets osmotiques (Stress hydrique), effets spécifiques d'ions (Stress salin) et des déséquilibres nutritionnels (Carence en éléments nutritifs) (Munns, 2002; Lindsay *et al.*, 2004; Munns *et al.*, 2006 ; Achraf, 2009 ; Álvarez et al., 2015.), ou d'un effet combiné de tous ces facteurs (Achraf et Wu, 1994). Par conséquent, divers mécanismes physiologiques et biochimiques associés à la croissance et au développement des plantes se trouvent affectés (Sairam *et al.*, 2002).

L'accumulation excessive des ions Na^+ et Cl^- dans les tissus des plantes limite l'absorption de l'eau et des éléments essentiels à leur nutrition (NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , N et Ca^{++}) (Greenway et Munns, 1980; Kaya *et al.*, 2001; Ghoulam *et al.*, 2002 ; Haouala *et al.*, 2007 ; Achraf et Foolad, 2007; Khorshidi *et al.*, 2009). Cependant, l'effet négatif de la salinité dépend du degré de tolérance des plantes et au niveau de la salinité du sol (Munns, 2002). Les plantes halophiles, qui poussent normalement dans les sols riches en sels ont tendance à accumuler du Na^+ dans leurs vacuoles et l'utiliser comme un osmoticum (Glenn *et al.*, 1999). Au contraire, les glycophytes (dont appartient la plupart des plantes cultivées) ont tendance à exclure Na^+ et à maintenir un rapport K^+/Na^+ élevé, ce qui semble être intéressant pour la tolérance au sel (Grattan et Grieve, 1999). Une sélectivité d'absorption en faveur du K^+ malgré l'excès de Na^+ est un critère couramment étudié pour tester la tolérance des plantes à la salinité. La capacité de sélectionner le K^+ par rapport au Na^+ lors de l'absorption a été décrite comme un critère de tolérance au sel (Ashraf et Ali, 2008).

Par ailleurs, la synthèse et l'accumulation des solutés organiques (Solutés compatibles) tels que, les sucres solubles, les composés azotés comme la proline, etc. (Munns, 2002 ; Ajithkumar et Panneerselvam, 2013; Puniran-Hartley *et al.*, 2014), est un mécanisme

indispensable pour établir l'équilibre ionique dans la vacuole, induisant une diminution du potentiel hydrique et permettant l'absorption de l'eau de l'environnement (Kumara *et al.*, 2003; Parida et Das, 2005; Messedi *et al.*, 2006). Ce processus est considéré, comme un mécanisme majeur d'adaptation au stress osmotique pour permettre de protéger la structure des enzymes, des protéines et de maintenir l'intégrité membranaire et de la turgescence des cellules (Banu *et al.*, 2009). Ce qui est nécessaire pour nombreuses fonctions physiologiques de la plante (Photosynthèse, transpiration, croissance...) (Martinez *et al.*, 2007).

Cependant, la synthèse de ces solutés organiques à des fins de protection et d'osmorégulation, se fait aux dépens de leur implication dans la production de la biomasse chez les plantes (Alarcon *et al.*, 1994 ; Grégory, 2005), ce qui se répercute négativement sur leur développement normal.

En fait, l'accumulation des électrolytes ou la synthèse des osmolytes organiques nécessitent des quantités élevées d'énergie.

Conséquemment, lorsque l'énergie et la matière disponible pour la croissance sont entièrement détournées pour l'adaptation et la protection, l'organisme ne dispose plus de ressources pour contenir l'excès de Na^+ loin des activités métaboliques sensibles des cellules vivantes (Grégory, 2005).

À l'instar des glycophytes, la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est considérée comme modérément sensible au sel par rapport à d'autres espèces cultivées (Levi, 1992). À un niveau de salinité du sol de 2.0-3.0 dS m^{-1} , le rendement est diminué de 50% (Maas et Hoffman, 1977; Katerji *et al.*, 2003). Ainsi, la salinité peut être l'un des facteurs les plus limitants du rendement de la pomme de terre dans les zones arides.

Ce stress abiotique provoque une réduction importante de la hauteur de la plante, la surface foliaire, le poids frais, le nombre et le calibre des tubercules et la teneur en amidon (Levi, 1992; Heuer et Nadler, 1995). Il inhibe, par ailleurs, la production de la chlorophylle et du carotène dans les feuilles et influence les voies respiratoires dans les racines (Levy et Veilleux, 2007).

Par conséquent, des concentrations élevées en sels dans le sol et / ou dans l'eau d'irrigation peut être l'un des principaux facteurs de la diminution de rendements de la pomme de terre dans les zones arides. Or, cette plante stratégique est l'une des cultures les plus

importantes du monde. Elle est classée au quatrième rang derrière le blé, le riz et le maïs (FAO, 2008).

Malheureusement, au Sud de l'Algérie, la production de la pomme de terre se heurte au problème de la salinité qui affecte à la fois le rendement et la qualité des tubercules. D'où l'importance de la limitation de l'effet négatif de ce stress abiotique, qui est souvent associé à la pénurie de l'eau douce dans cette région, rendant l'utilisation de l'eau saline pour l'irrigation des cultures souvent obligatoire. En fait, selon Daoud et Halitim (1994), la majorité des eaux souterraines est constituée d'eaux saumâtres titrant entre 2 et 6 g de sels par litre.

Un défi principal que doit relever les agriculteurs dans les régions arides, consiste à trouver des solutions pour combattre les effets néfastes de la salinité des sols et des eaux sur la pomme de terre et de minimiser l'impact environnemental de l'utilisation exagérée des engrais chimiques dans ces écosystèmes, connus pour leur fragilité.

Dans ce cadre, la fertilisation organique semble être l'une des solutions les plus recommandées pour résoudre le problème de la salinité et pour améliorer la tolérance des plantes à ce stress (Hannachi *et al.*, 2004; Walker et Bernal, 2008; Turkan et Demiral, 2009; Ahmed *et al.*, 2010).

La transformation de la solution du sol de composition défavorable en solution nutritive, impose l'apport de fertilisants organiques dont la minéralisation progressive libère des éléments nutritifs utiles (Ca^{++} , K^+ , NO_3^- , etc.) à la plante.

De plus, la minéralisation de la matière organique enrichit la solution du sol en K^+ et Ca^{2+} qui peuvent empêcher, par l'effet de l'antagonisme ionique, l'absorption d'ions toxiques en excès et qui ne sont nécessaires à la plante qu'en faibles quantités tels que le Na^+ (Lesaint et Coïc, 1983).

Quant à l'adaptation à la salinité, Rady (2012) montre que l'apport organique au sol salé augmente le niveau de tolérance des plantes à la salinité, probablement en favorisant la synthèse et l'accumulation des osmolytes organiques.

À cet titre, plusieurs types de déchets d'origine animale ont été apportés aux sols, bien que le fumier de volailles ait souvent été préféré aux autres déchets, en raison de sa forte concentration en éléments nutritifs (Warman, 1986; Walker et Bernal, 2008; Azeez *et al.*, 2010; Demir *et al.*, 2010; Delago *et al.*, 2012; Adekiya et Agbede, 2016).

Ce fumier semble être le plus apte à couvrir les besoins nutritifs de la pomme de terre. Comme il s'agit d'une plante trop consommatrice en éléments nutritifs, avec un court cycle végétatif et un système racinaire relativement peu développé, l'application d'un fertilisant organique très riche en éléments nutritifs à fort potentiel de minéralisation, tel que le fumier de volailles, s'avère une voie prometteuse pour couvrir tous les besoins nutritionnels de ce végétal, sans recours à l'utilisation des engrais minéraux.

Néanmoins, ce fumier doit être apporté à des doses raisonnables et fractionnées en fonction des besoins de chaque stade phénologique de cette plante (Oustani *et al.*, 2015). Ainsi, la détermination de la dose optimale de fumier de volailles est une étape très importante pour optimiser l'utilisation de ce fumier sous les conditions salines des régions arides afin d'éviter, d'une part, le risque de carence et/ou la toxicité par des éléments minéraux associés à l'excès de sels, et d'autre part, d'assurer la disponibilité de tous les éléments nécessaires pour la nutrition des plantes pendant les périodes de fortes exigences sans nuire à la qualité de l'environnement.

Ceci dit, en dépit de l'importance de ce type de fumier, très peu d'études ont été effectuées sur les taux d'application, en particulier en conditions salines où la pomme de terre est soumise à l'effet combiné de l'interaction de plusieurs sels et non pas à l'action unique du NaCl.

Les objectifs de cette étude sont les suivants: (1) Étudier l'effet de doses croissantes de fumier de volailles sur certains paramètres biométriques (Paramètres de croissance végétative et de rendement de la pomme de terre (Variété Spunta), (2) Déterminer la dose optimale de cet apport organique en conditions salines, (3) Évaluer l'état nutritionnel de la plante en conditions salines, (4) Évaluer la réponse biochimique à la fertilisation organique sous la contrainte saline, à travers l'analyse de la proline autant que soluté organique liée à la tolérance à la salinité et le dosage de la chlorophylle .

II. Matériel et méthodes

1. Objectif de l'essai au champ

La complexité des études en champs réside dans la représentativité des échantillonnages et dans l'analyse multifactorielle qui résulte d'une telle approche. Cependant, cet essai a volontairement été mis en place en champ avec une situation agronomique réaliste (Salinité du sol et eau naturelle, épandage des fertilisants au champ, etc.) afin d'évaluer la durabilité des itinéraires des techniques proposées et tirer des recommandations aux agriculteurs de la région

d'étude. Par ailleurs, si le choix de travailler dans des parcelles expérimentales rend délicate l'interprétation des résultats obtenus, elle permet de relativiser les effets de la fertilisation organique en conditions salines par rapport aux effets des autres facteurs anthropiques et saisonniers naturels.

Par ailleurs, la plupart des études effectuées sur l'interaction (Salinité et Matière organique) ont été faites sous des conditions contrôlées de laboratoire où la contrainte de salinité a été créée par addition artificielle de NaCl, par contre, les sources naturelles de la salinité peuvent interagir différemment en conditions de terrain.

Par conséquent, l'objectif principal de ce travail est d'optimiser la fertilisation organique à base de fumier de volailles sur la culture de pomme de terre sous les conditions salines du champ. Ainsi, la réponse morphologique, physiologique et biochimique de cette plante à des doses croissantes de fumier de volailles a été comparée à un témoin sans apport au sein de trois niveaux de salinité du sol et en conditions d'irrigation par une eau saline.

2. Sites expérimentaux

Les sites d'étude sont localisés au niveau de trois sites, dans la ferme de Baziz située dans le secteur de Hassi Ben Abdallah à 26 km du chef lieu de la wilaya d'Ouargla (Sud-Est de l'Algérie) (Fig. 1).

Le choix de cette région s'est basé sur son caractère représentatif de la région aride chaude sous l'angle de sa fertilité naturelle médiocre, notamment la faible teneur en matière organique et la forte concentration en sels au niveau du sol et/ou dans l'eau d'irrigation. Cette situation nous a permis d'installer notre dispositif expérimental pour étudier la réponse de la pomme de terre à la fertilisation organique à base de fumier de volailles en conditions salines du champ. En fait, la ferme choisie possède des caractéristiques qui font d'elle un modèle adéquat pour l'étude de la restauration des sols dégradés par les fortes concentrations en sels et les faibles teneurs en matières organiques.

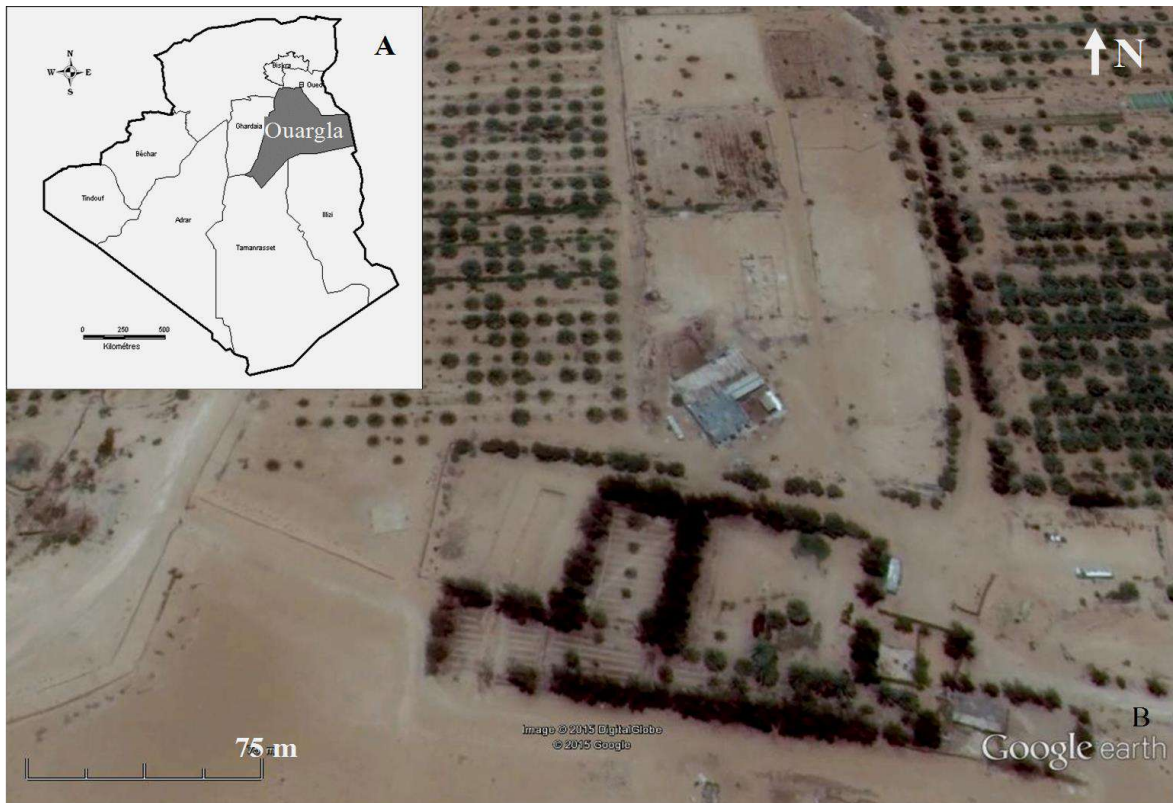


Figure 1. A Localisation géographique des sites d'étude ; B. Image satellite présentant la localisation des sites d'étude dans la ferme frère de Baziz (Réf. Elec. 01)

3. Climat

À l'instar de la région de Ouargla, les sites d'étude sont caractérisés par un climat saharien aride et contrasté, marqué par une pluviométrie rare et irrégulière, des températures moyennes mensuelles particulièrement élevées et une forte évaporation. Les sites d'étude étant en milieu Saharien, les conditions de température et de pluviométrie des trois sites sont presque homogènes.

Les conditions climatiques qui ont régné durant la période de l'essai de Février à Juin (2009 à 2012), sont caractérisées par des cumuls pluviométriques très faibles de 15.4, 5.4, 12.8 et 10 mm respectivement pour l'année 2009, 2010, 2011 et 2012. En revanche, les cumuls de l'évaporation sont très élevés de 926, 1217.4, 1065 et 1088.2 mm. Quant aux, valeurs moyennes de la température de l'air sont de 22.11, 24.41, 22, 22.67°C respectivement pour les mêmes années.

Ces données montrent que les conditions climatiques ne sont pas considérablement différentes entre les quatre années, sauf pour l'année 2009 qui s'est caractérisée par une

pluviométrie relativement plus élevée et une évaporation moins importante par rapport aux trois autres années (Tableau 1, Fig. 2).

Toutefois, il est bien évident d'après les données météorologiques enregistrées durant la période de l'essai, que les écarts de température et d'humidité sont trop faibles pour faire varier significativement le climat entre sites et entre années.

Par ailleurs, au cours de l'essai, de Février à Juin de chaque année culturale, la pluviométrie et les températures diffèrent légèrement des conditions moyennes observées sur 10 ans (2002-2012) pour la région de Ouargla (Annexe I).

Globalement, malgré leur agressivité en terme de fortes températures et de faibles précipitations, les conditions climatiques au cours de la période de l'essai 2009-2012 n'ont été pas pénalisantes pour la culture de pomme de terre de saison, dans la mesure où ces contraintes climatiques ont été compensés par une irrigation régulière en fonction des besoins hydriques de chaque stade phénologique de notre plante test. Ceci suggère que les contraintes majeures liées à la production de la pomme de terre soient à rechercher au niveau des caractéristiques édaphiques et des techniques agronomiques appliquées.

Tableau 1. Données météorologiques enregistrées pour la période de l'essai (2009 - 2012)
(ONM Ouargla, 2013)

Année	Paramètre	Mois					
		Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Cuml /Moy
2009	V.V (km/h)*	54	54	61	50	50	53.8
	P (mm) **	01.5	10.6	0.8	0	2.5	15.4
	Evap (mm) **	115	152	173	153	333	926
	In (h)**	254	267	321	338	271	1451
	Hr Moy (%) *	54	48	42	39	28	42.2
	T Moy (°C) *	13.75	17.4	19.8	26.45	33.15	22.11
2010	V.V (km/h) *	61.00	86.00	72.0	86.0	68.0	74.6
	P (mm) **	0.00	0.00	0.7	1.7	3.00	5.40
	Evap (mm) **	131	186	211	279	410	1217
	Inso (h) **	198	219	263	311	219	1210
	Hr Moy (%) *	46	39	39	35	30	37.8
	T. Moy(°C) *	17.5	20.5	24.6	26.15	33.3	24.41
2011	V.V (km/h) *	61.00	76.00	108	58	58	72.2
	P (mm) **	0.0	11.1	1.7	0.0	0.0	12.8
	Evap (mm) **	80	159	215	263	348	1065
	Inso (h) **	257	266	306	333	245	1407
	Hr Moy (%) *	50	50	39	37	34	42
	T.Moy (°C) *	13.5	16.8	22.75	26.15	30.75	22
2012	V.V (km/h) *	72	47	72	72	72	62.6
	P (mm) **	05.5	1.00	3.5	0.0	0.0	10
	Evap (mm) **	80.8	132.4	209.1	312.3	353.6	1088.2
	Inso (H) **	273	253	293.4	328	231	1378.4
	Hr Moy (%) *	55.9	49.5	37.5	29.4	25.2	39.5
	T. Moy (°C)*	10.35	16.65	22.45	27.55	36.35	22.67

*Hr : Humidité relative ; T moy : Température moyenne annuelle ; P: Pluviométrie ;In : Insolation; V.V : Vitesse de vent. Evap : Evaporation, * Moyen ; ** Cumul*

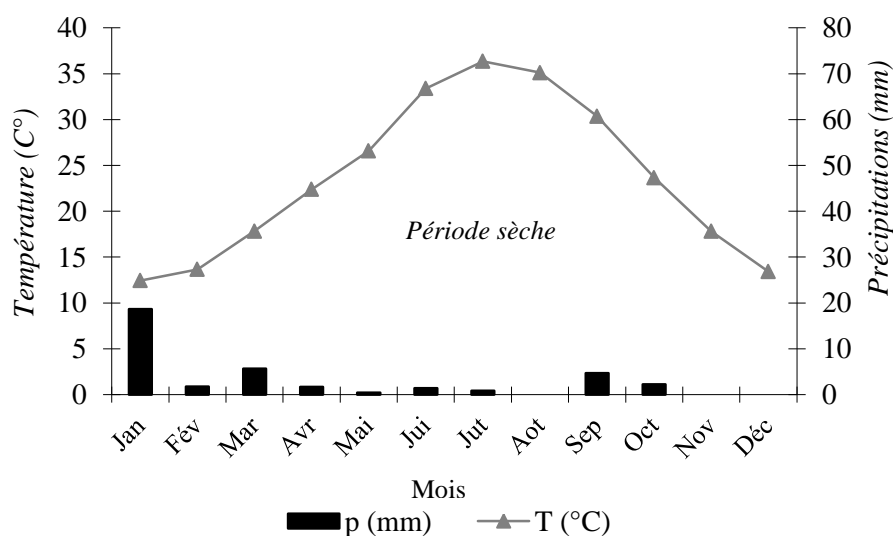


Figure 2. Températures et précipitations sur les sites d'étude pendant la période expérimentale (2009-2012)

4. Échantillonnage et caractérisation du sol

Les échantillons de sol ont été prélevés de l'horizon arable (profondeur de 50 cm) de trois sites à des niveaux de salinité différents dans la région d'étude en mois de Février des années 2009, 2010, 2011 et 2012. Pour chaque site, un échantillon composite du sol obtenu à partir de mélange de dix sous-échantillons, a été séché à l'air, tamisé à 2mm et soumis à l'analyse en adoptant les méthodes standard d'analyse du sol décrites en détail dans le chapitre 2 de la deuxième partie de ce travail.

Ainsi, la granulométrie a été déterminée par la méthode de la pipette de Robinson basée sur la loi de STOCKES ; le pH du sol et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur un rapport 1: 2.5 et 1: 5 sol: l'eau (p/v), respectivement; le calcaire total a été déterminé par un calcimètre volumétrique de Bernard ; la densité apparente par la méthode de cylindre ; la capacité de rétention en eau par la méthode de Richard (1964).

Le carbone organique (C.Org) a été déterminé par la méthode de Anne (1945) ; le taux de matière organique (MO) a été évalué en multipliant le taux de C.Org \times 1.72 ; l'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl; la capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée par la méthode cobaltihexammine (Orsine et Rémy, 1976) ; les Bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) ont été extraits par une solution d'acétate d'ammonium, puis Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été quantifiés en utilisant l'absorption atomiques spectrophotomètre tandis que le K^+ et Na^+ ont été mesurés à l'aide de photomètre de flamme ; P assimilable a été déterminée par la méthode de Olsen (Olsen *et al.*, 1954) . Le chlore a été déterminé par la méthode de Mohr ; les carbonates et bicarbonates : (CO_3^- et HCO_3^-) ont été dosés sur l'extrait 1/5 par acidimétrie avec H_2SO_4 en présence d'un indicateur phénophtaléine pour les carbonates et le méthylorange pour les bicarbonates. Les sulfates ont été déterminés par la méthode gravimétrique qui se base sur la précipitation des sulfates par BaCl_2 ; Le taux de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) a été déterminé par la méthode de Coutinet. Le calcaire total et actif ont été déterminés par la méthode de calcimètre et de Drouineau-Galet respectivement. La caractérisation physique et physico-chimique moyenne (moyenne des quatre années) du sol avant plantation au niveau des trois sites expérimentaux est consignée dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractérisation physique et physico-chimique moyenne du sol (0-50 cm de profondeur) au niveau des trois sites expérimentaux avant la plantation

Type de sol	Sol Peu Salé (SPS) (CE=1.2 dS m ⁻¹)	Sol Salé (SS) (CE =2.29 dS m ⁻¹)	Sol Très Salé (STS) (CE= 5.6 dS m ⁻¹)
Paramètre			
Classe texturale			
Sable grossier	44.30 ± 2.67	40.77 ± 2.46	41.95 ± 1.6
Sable fins	49.18 ± 1.05	52.21 ± 1.07	50.58 ± 1.62
Argile et Limon (%)	06.52 ± 0.57	07.02 ± 0.47	07.38 ± 0.32
pH (1/5)	08.24 ± 0.30	08.30 ± 0.27	08.43 ± 0.32
CE dS m ⁻¹ (1/5)	01.2 ± 0.4	02.29 ± 0.28	05.6 ± 0.29
Densité apparente	01.34 ± 0.22	01.36 ± 0.20	01.36 ± 0.14
CR (%)	17.62 ± 0.71	18.98 ± 0.55	20.33 ± 1.05
Calcaire total (%)	04.52 ± 0.78	04.94 ± 0.61	06.83 ± 0.68
Calcaire actif (%)	-	-	01.83 ± 0.29
MO (%)	00.47 ± 0.1	00.50 ± 0.04	00.62 ± 0.04
C.Org (%)	0.27 ± 0.06	00.29 ± 0.06	00.36 ± 0.05
N Total (%)	0.017 ± 0.003	0.014 ± 0.002	0.022 ± 0.005
P assim (mg kg ⁻¹)	30.04 ± 1.95	28.78 ± 1.32	33.33 ± 1.69
K ⁺ (cmol kg ⁻¹)	00.39 ± 0.02	0.56 ± 0.03	01.05 ± 0.09
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	02.06 ± 0.11	02.85 ± 0.14	03.32 ± 0.31
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)	00.50 ± 0.065	00.75 ± 0.04	01.10 ± 0.07
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	01.10 ± 0.065	01.05 ± 0.04	00.83 ± 0.06
CEC (T) (cmol kg ⁻¹)	04.05 ± 0.14	05.21 ± 0.17	06.30 ± 0.04
Cl ⁻ (meq L ⁻¹)	008.0 ± 0.76	27.00 ± 1.03	43.00 ± 2.08
SO ₄ ⁻ (meq L ⁻¹)	09.45 ± 0.86	15.33 ± 0.91	18.86 ± 0.83

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

Le sol dans cette région est caractérisé dans l'ensemble par une texture sableuse, un pH basique, de faibles teneurs en argile et en matière organique respectivement inférieures à 10 et 1%, une CEC, faible, de 4.05, 5.21 et 6.30 (cmol⁺ Kg⁻¹) respectivement pour le sol sableux peu salé (SPS), sol salé (SS) et sol très salé (STS). Le sol des trois sites a donc un pouvoir adsorbant faible, ce qui défavorise la nutrition minérale des plantes et accentue la lixiviation des éléments minéraux.

La caractérisation analytique montre également que le sol des trois sites est insuffisamment pourvu en éléments nutritifs tels que l'N, K et le P. Les apports d'engrais sont donc nécessaires. Ainsi, le sol au niveau de ces sites semble se prêter particulièrement bien à des enrichissements en matière organique, dans la mesure où, cette dernière permet d'éteindre les graves conséquences résultant à la fois du manque de colloïdes minéraux et organiques au niveau du site (sol peu salé) et/ou à la salinité au niveau des sites (sols salé) et (sol très salé).

Par ailleurs, le relevé pédologique réalisé par le BNEDER (1998) relatif à la distribution de la salinité montre que cette région présente une variabilité spatiale de la salinité, liée à plusieurs facteurs notamment, au mauvais drainage et à la qualité de l'eau d'irrigation.

D'après l'échelle de classification de la salinité sur l'extrait dilué ($1/5$) (Aubert, 1978) (Annexe III), le sol au niveau des trois sites est classé en Sol Peu Salé (SPS) ($CE_{1/5} = 1.2 \text{ dS m}^{-1}$), Sol Salé (SS) ($CE_{1/5} = 2.29 \text{ dS m}^{-1}$) et en Sol Très Salé (STS) ($CE_{1/5} = 5.6 \text{ dS m}^{-1}$). Ainsi, le choix de trois sites expérimentaux au niveau de cette ferme s'est basé sur les résultats de l'analyse de la conductivité électrique de l'extrait $1/5$ de la solution du sol des trois sites.

5. Échantillonnage et caractérisation de fumier de volailles

Vue la grande variabilité de la composition du fumier notamment en fonction du régime alimentaire et de l'âge de l'animal (Chadwick *et al.*, 2000; Azeez *et al.*, 2010), l'échantillonnage du fumier de volailles a été réalisé chaque année culturale. Ainsi, un échantillon représentatif obtenu par mélange de 10 sous échantillons pour chaque année a été prélevé séparément de 10 fermes d'élevage de poulet de chair suivant le protocole d'échantillonnage de fumier décrit dans le chapitre 1 (Partie II) de ce travail. Chaque échantillon correspond à un mélange de fientes et des coupeaux de bois. Il est à mentionner que les prélèvements sont presque du même âge (3 à 4 mois), et ont été obtenus d'un élevage de poulets de chair mené en intensif. Ces prélèvements ont été emballés dans des sacs de polyéthylène et transportés au laboratoire. Ils ont été par la suite séchés et broyés (à 0.5 mm) et soumis à une caractérisation physico-chimique et biochimique par les méthodes recommandées pour l'analyse de fumier (Chapitre 1, Partie II).

Ainsi, le pH et la CE ont été mesurés dans un mélange 1: 5 mélanges (p / v) de fumier et d'eau. La matière organique (OM) a été déterminée par la méthode de calcination (Incinération à 600°C). Le carbone organique a été quantifié comme suit: $C. \text{ Org} = MO/2$. L'Azote total a été déterminé par la méthode micro-Kjeldahl. Les échantillons de fumier de volailles broyés à 0.5 mm, sont séchés au four (70°C), puis digérés par voie humide avec un mélange triacide (nitrique, perchlorique et sulfurique). Les cations ont été mesurés par spectrophotométrie d'absorption atomique. Le dosage des éléments minéraux s'effectue soit en absorption (Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} , Cu^{++} , Mn^{++} , Zn^{++}), soit en émission (K^+ , Na^+). Le phosphore a été mesuré par colorimétrie par la méthode Murphy-riley (Carter, 1993).

Le chlore a été dosé par la méthode argento-métrique de Mohr. Les ions ammoniums NH_4^+ et nitrates NO_3^- ont été extraits par une solution KCl (2M) (Keeny et Nelson, 1982).

La proline a été dosée par la même méthode utilisée pour l'analyse de la proline dans le végétal, méthode de Troll et Lindesly (1955) simplifiée et mise au point par Rasio *et al.* (1987). Le fractionnement biochimique du fumier de volailles a été effectué par la méthode de Van Soest *et al.* (1967). Quant au fractionnement des composés humiques, il a été réalisé par la méthode de fractionnement adaptée de l'International Humic Substances Society (IHSS). Les principales caractéristiques physico-chimiques et biochimiques des fumiers utilisés pour les quatre années sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractérisation physico-chimique et biochimique comparative du fumier de volailles utilisé durant les quatre années de l'essai au champ (2009-2012) (Avant épandage sur les sols des trois sites expérimentaux)

Fumier de l'année	2009	2010	2011	2012
Paramètre				
pH ($_{1/5}$)	7.67 ± 0.21	08.23 ± 0.42	8.13 ± 0.91	8.04 ± 0.32
CE dS m ⁻¹ ($_{1/5}$)	8.05 ± 0.28	12.03 ± 1.62	10.92 ± 1.34	11.13 ± 1.43
M O (%)	58.96 ± 4.43	65.38 ± 4.37	63.45 ± 5.2	59.89 ± 4.33
C .Org (%)	29.48 ± 1.28	32.69 ± 2.79	31.72 ± 2.71	29.94 ± 2.41
N total (%)	2.90 ± 0.19	2.08 ± 0.20	2.23 ± 0.48	2.35 ± 0.51
C/N	10.16 ± 1.72	15.71 ± 1.36	14.26 ± 1.4	12.74 ± 1.28
Ca ⁺⁺ (%)	4.13 ± 0.38	02.3 ± 0.38	2.16 ± 0.15	2.78 ± 0.14
Mg ⁺⁺ (%)	0.43 ± 0.026	0.32 ± 0.13	0.45 ± 0.15	0.40 ± 0.14
K (%)	2.76 ± 0.20	1.54 ± 0.26	1.88 ± 0.10	1.92 ± 0.13
P total (%)	1.52 ± 0.04	1.40 ± 0.24	1.44 ± 0.14	1.46 ± 0.27
Na ⁺ (%)	0.40 ± 0.02	0.47 ± 0.24	0.43 ± 0.14	00.5 ± 0.27
Mn (mg Kg ⁻¹)	320.4 ± 19.2	242.1 ± 28.7	265.0 ± 22.7	276 ± 26.67
Fe (mg Kg ⁻¹)	1880 ± 43.7	997.12 ± 76.5	1725.2 ± 139	1794.2 ± 100
Zn (mg Kg ⁻¹)	295.5 ± 16.1	198.33 ± 13.1	289.54 ± 17.4	278.1 ± 22.3
Cu (mg Kg ⁻¹)	102.3 ± 2.4	96.00 ± 14.06	101 ± 13.13	115.3 ± 10.2
N-NH ₄ ⁺ (mg Kg ⁻¹)	4529 ± 237.6	3986.5 ± 110	4290.2 ± 194	4380.33 ± 15
N-NO ₃ ⁻ (mg Kg ⁻¹)	2729.3 ± 99.7	2195.8 ± 102	2345.1 ± 128	2422.3 ± 105
Cl ⁻ (%)	0.53 ± 0.06	0.54 ± 0.06	0.49 ± 0.06	00.50 ± 0.04
Proline (%)	01.1 ± 0.32	0.65 ± 0.25	0.87 ± 0.14	01.1 ± 0.29
Cellulose (%)	26.75 ± 2.36	32.23 ± 2.21	29.78 ± 1.44	27.45 ± 0.88
Lignine	7.05 ± 2.08	14.45 ± 1.34	12.77 ± 1.32	10.45 ± 0.86
AF	03.72 ± 0.16	03.44 ± 0.23	03.48 ± 0.26	03.54 ± 0.20
AH	02.02 ± 0.14	01.82 ± 0.17	01.98 ± 0.20	01.84 ± 0.22

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

La caractérisation comparative de la composition du fumier de volailles (FV) utilisé pour les quatre années avant l'épandage sur les sols des trois sites (Tableau 3) a montré que, dans l'ensemble le fumier de volailles utilisé pour les quatre années est riche en éléments nutritifs.

Le rapport C/N est de 10.16, 15.71, 14.26 et 12.74 respectivement pour le fumier de l'année 2009, 2010, 2011 et 2012 indiquant un fort potentiel de minéralisation (C/N inférieur à 25) de l'ensemble des fumiers utilisés en raison de leur teneur élevée en azote.

Le pH pour l'ensemble des fumiers est basique, sauf pour le fumier de l'année 2009 qui présente un pH légèrement basique (7.67). La concentration globale en sels exprimée en (CE) est élevée pour l'ensemble des fumiers utilisés, cependant la conductivité électrique la plus élevée (CE) a été enregistrée par le fumier de l'année 2010, soit une CE de 12.03 dS m⁻¹.

La richesse de fumier de volailles en éléments nutritifs pour les quatre fumiers peut être liée au régime alimentaire concentré donné aux volailles, notamment, qu'il s'agit d'un élevage de poulet chair mené en système intensif. D'après Omeira *et al.* (2006), en systèmes intensifs, le fumier est très concentré par rapport aux élevages en plein air.

Toutefois, la comparaison des teneurs en éléments nutritifs sur base sèche présente une variabilité marquée entre les quatre types de fumier. Ce qui est certainement en lien avec le type d'alimentation des volailles dans chaque ferme, mais aussi avec les facteurs de dilution (sable, litière). Le problème de dilution des éléments fertilisants par la litière, et à l'occasion du sable, est évident pour faire varier la teneur du fumier en plusieurs éléments tel que N total, P, K, Ca et Mg (Côté *et al.*, 2006).

Il est évident que le fumier de l'année 2009 présente une richesse relativement plus élevée par rapport à ceux utilisés pour les autres années. Les teneurs obtenues sont de 2.9, 2.76, 1.52 % respectivement pour l'azote, le potassium et le phosphore. En revanche, les teneurs les plus faibles ont été enregistrées par le fumier de l'année 2010, soient des teneurs de 2.08, 1.54 et 1.40 % respectivement pour les mêmes éléments.

Malgré sa faible concentration en éléments nutritifs par rapport aux autres fumiers, le fumier de l'année 2010 a affiché la CE la plus élevée, pouvant être associé à la présence d'une quantité de sable.

Par ailleurs, les teneurs totales en éléments traces (Zn, Cu) sont pour l'ensemble des fumiers étudiés inférieures aux normes limites fixées par AFNOR (French standards of *AFNOR U 44-051*).

Quant à la teneur en proline, les résultats obtenus ont montré que la teneur la plus élevée en cet acide aminé a été enregistrée à la fois par le fumier de l'année 2009 et 2012 avec une teneur identique de 1.1 %. Des teneurs moins élevées de l'ordre de 0.65 et 0.87 % ont été enregistrés par le fumier de l'année 2010 et 2011 respectivement.

Les quatre fumiers affichent des teneurs élevées en acides fulviques par rapport aux acides humiques. Toutefois, les teneurs les plus élevées en acide fulvique et humique ont été enregistrées par le fumier de l'année 2009 avec des teneurs de 3.72 et 2.02 % respectivement pour les deux acides.

6. Analyse de l'eau d'irrigation

L'irrigation du sol dans les trois sites a été effectuée à partir d'un aquifère souterrain fossile qui caractérise l'hydrogéologie de la zone d'étude (CT). L'eau de cet aquifère est fortement minéralisée. Selon USSL (Classification de l'eau d'irrigation) (Richards, 1954; USSL, 1954), qui tient compte de la conductivité électrique et du taux de sodium absorption ratio (SAR), la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation appartient à la classe C₅-S₁, révélant une eau impropre à l'irrigation dans des conditions ordinaires. Toutefois, elle peut être utilisée sur des sols perméables avec un système de drainage adéquat (Daoud et Halitim, 1994), ce qui est le cas de nos sols sableux.

Il est à noter que le sel dominant au niveau de l'eau d'irrigation est le NaCl. Les résultats obtenus par les procédures analytiques décrites par Rodier *et al.* (2005), Richards (1954) (Annexe III) sont mentionnés dans le tableau 4.

Tableau 4. Caractérisation physico-chimique moyenne de l'eau d'irrigation durant les quatre années de l'essai

Paramètre		Résultat
CE (dS m ⁻¹)		5.75 ± 0.42
Résidu sec (mg L ⁻¹)		1752 ± 109.6
pH		7.8 ± 0.71
Cations solubles (meq L ⁻¹)	Ca ⁺⁺	19.8 ± 1.22
	Mg ⁺⁺	8.3 ± 1.06
	K ⁺	1.2 ± 0.13
	Na ⁺	22.9 ± 1.07
Fascias cationique		Na ⁺ - Ca ⁺⁺
Anions solubles (meq L ⁻¹)	CO ₃ ⁻	-
	HCO ₃ ⁻	1.27 ± 0.17
	Cl ⁻	36.25 ± 1.98
	SO ₄ ⁻	26.08 ± 2.64
Faciès anionique		Cl ⁻ - SO ₄ ⁻
Faciès chimique		Na ⁺ - Cl ⁻
Sodium absorption ratio (SAR)		6.12 ± 1.27
Classe		C ₅ -S ₁

Les valeurs mentionnées dans le tableau sont des moyennes de trois répétitions (± erreurs standard)

7. Conduite de l'essai au champ et dispositif expérimental

L'essai au champ a été réalisé durant quatre campagnes agricoles consécutives (2008-2009, 2009-2010, 2010-2011 et 2010-2012) (dans des conditions expérimentales similaires) sur trois sites expérimentaux différents sur le plan de la salinité dans la ferme de Baziz. Les trois sites sont caractérisés par des sols non cultivés depuis plus de 10 ans.

7.1. Justification du choix des doses de fumiers et du matériel végétal

7.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé comme plante-test est la pomme de terre (Variété Spunta). Le choix de cette espèce est basé d'une part sur le cycle végétatif court de cette plante, d'autre part en raison de sa bonne réponse à la fertilisation organique sur laquelle se base l'objectif de cette étude.

Le choix de la variété Spunta est fondé à son tour sur plusieurs raisons. C'est une variété très appréciée par les agriculteurs du Sud de l'Algérie, elle présente une bonne résistance à la sécheresse et s'accommode bien aux sols sahariens notamment, s'il s'agit d'une culture de

saison (tel est le cas de notre essai), où la récolte aura lieu généralement à la période estivale. Par ailleurs, cette variété est caractérisée par un rendement élevé et un calibrage uniforme.

La description botanique, le cycle végétatif, les exigences en eau et en unités fertilisantes et les caractéristiques de la variété utilisée sont présentées dans l'annexe III.

7.1.2. Doses de fumier de volailles (FV)

Le choix des doses de fumier de volailles dans le cadre de cet essai a été inspiré des résultats de nos essais précédents au terme desquels, il a été démontré que la dose recommandée pour l'amélioration des propriétés du sol (dose de 3 %) (Parie II), ne répond pas aux exigences optimales de notre plante test. De telle dose (équivalente à 120 t ha⁻¹) semble être exagérée pour la fertilisation de la culture de pomme de terre dans un milieu aride saharien. En fait, dans un essai précédent au champ (réalisé dans des conditions similaires) traitant l'effet de doses croissantes de fumier de volailles (0, 30, 60, 90, 120 t ha⁻¹) sur les paramètres de rendement de la pomme de terre, nous avons observé un effet toxique à partir de la dose 90 t ha⁻¹, et qui s'est manifesté par des brûlures totales des tubercules.

Suite à ces résultats et sachant que l'amélioration du rendement des plantes sous les conditions salines est étroitement corrélée avec un apport raisonné de matière organique (Choudhary et al, 2004 ; Abou El-Maged *et al.* 2008 ; Ahmed *et al.* 2010), nous avons opté pour des doses de fumier de volailles de 0, 20, 30, 40, 50 et 60 t ha⁻¹.

Le choix de ces doses a également, pris en considération que la fertilisation organique en milieu aride doit tenir en compte la teneur initiale du sol en matière organique ; soit une dose de 60 t ha⁻¹ pour un sol pauvre en MO, et une dose de 30 t ha⁻¹ pour un sol moyennement riche en MO (Chibane, 1999).

7.2. Organisation du dispositif expérimental et conduite de l'essai

L'expérimentation a été conduite suivant un dispositif en blocs complets randomisés. Le dispositif expérimental adopté chaque année est de type split plot, comportant trois niveaux de salinité : Sol peu salé (CE = 1.2 dS m⁻¹), Sol salé (2.29 dS m⁻¹) et Sol très salé (CE= 5.6 dS m⁻¹) et cinq doses de fumier de volailles : 20, 30, 40, 50 et 60 t ha⁻¹, et un témoin sans aucun apport.

Le dispositif expérimental dans sa globalité contient ainsi 18 traitements répartis en 4 blocs (4 répétitions) soit un total de 72 parcelles élémentaires de 12 m² (4 × 3) chacune. Les

traitements sont répartis au hasard au niveau de chaque bloc. Afin de minimiser les interférences, des espacements de 3 et 2 m ont été laissés entre les blocs et entre parcelles respectivement (Fig. 2). Ainsi, après un labour sur une profondeur de 50 cm effectué avec une charrue à soc, les doses de fumier de volailles précédemment citées ont été épandues deux semaines avant la plantation en surface puis enfouies dans les premiers centimètres du sol à l'aide d'un scarificateur.

Les doses de fumier de volailles ont été fractionnées en fonction des besoins de chaque stade phenologique de la plante : deux tiers (2/3) de chaque dose ont été apportées avant la plantation de la pomme de terre, et un tiers (1/3) a été appliqué au stade floraison (début tubérisation).

La plantation a été réalisée manuellement au mois de Février de chaque année culturale, ainsi, pour chaque parcelle élémentaire, des tubercules (Semences uniformes) (poids de 75 ± 5 g) ont été plantées avec une densité de 4 plants par m^2 . L'espacement entre plants et entre lignes est de 40 et 75 cm respectivement, avec une profondeur de plantation de 10 cm.

Les précipitations ont été très faibles au cours du cycle de croissance de la plante pendant les quatre années de l'essai (Tableau 1), de ce fait, l'alimentation hydrique a été entièrement liée à l'irrigation en utilisant un système d'irrigation localisée (goutte à goutte). Les doses de l'irrigation ont été appliquées en fonction des besoins hydriques de chaque stade phenologique de la pomme de terre (Annexe III). L'irrigation a été arrêtée à la maturité des tubercules (sept jours avant la récolte).

L'eau utilisée pour l'irrigation appartient à la classe C₅-S₁, (Tableau 4). Elle est impropre à l'irrigation dans des conditions normales, mais elle peut être utilisée sur des sols perméables avec un drainage adéquat.

La récolte a eu lieu manuellement le mois de Juin de chaque année. Le rendement a été mesuré uniquement pour des plantes qui poussent dans les lignes centrales, alors que les lignes extérieures ont servi comme bordure. Des travaux d'entretien (Binage, désherbage, buttage) et des traitements phytosanitaires ont été effectués tout au long du cycle de la plante, conformément aux recommandations agricoles pour cette culture (Annexe III).

Pour éviter l'effet du précédent cultural (Effet résidus et infections par les pathogènes), nous avons été obligé de changer l'assiette des sites expérimentaux chaque année culturale, tout

en gardant les mêmes classes de conductivité du sol pour les trois sites. La photo 1 illustre quelques opérations culturales effectuées au cours de l'essai.

8. Paramètres étudiés

L'étude de la réponse de la pomme de terre à la fertilisation organique en fonction du degré de la salinité dans les trois sites expérimentaux au cours des quatre années de l'essai a été réalisée en procédant à des mesures des paramètres mesures biométriques (morphologiques), physiologiques et biochimiques.

8.1. Mesures biométriques

La réponse biométriques de la pomme de terre à la fertilisation organique à base de fumier de volailles en fonction du degré de la salinité a été effectuée sur des mesures moyennes de cinq plants choisis aléatoirement au niveau de chaque parcelle élémentaire. Les paramètres de croissance végétative ont été déterminés après 90 jours de plantation, et ceux de rendement après 120 jours de plantation.

8. 1.1.Paramètres liés à la croissance végétative

8. 1.1.1. Hauteur des tiges aériennes plant⁻¹

La mesure de la hauteur tiges/plant (cm) a été effectuée à l'aide d'une règle graduée.

8.1.1.2. Nombre de tiges plant⁻¹

Il consiste à compter le nombre de tiges plant⁻¹. Ce paramètre est considéré comme composante de rendement, car chaque tige porte des tubercules souterrains.

8. 1.1.3. Surface foliaire plant⁻¹

La mesure de la surface foliaire en (cm²), a été déterminée suivant la formule de Sakalova (1979) : Surface foliaire en (cm²) = L × l × Coefficient (K) :

- *L* : Longueur de la feuille de pomme de terre ;
- *l* : Largeur de la feuille de pomme de terre ;
- *K*: Coefficient relatif à la forme de la feuille de pomme de terre = 0.674 .

8. 1.1.4. Biomasse sèche plant⁻¹

Pour la détermination de la biomasse sèche des organes aériens et souterrains de la pomme de terre (g plant⁻¹), les échantillons des deux organes ont été séparés en partie aérienne (feuilles et tiges : BSA) et souterraine (racines : BSR). Par la suite, ils ont été rincés dans trois bains successifs d'eau glacée puis éponges et séchés avec du papier filtre. Les deux échantillons sont rapidement mis dans des sachets en papier aluminium préalablement tarés puis pesés avant et après dessiccation à 70°C pendant 48 heures.

8.1.2. Paramètres de rendement

8.1.2.1. Nombre de tubercules plant⁻¹

Le nombre de tubercules a été déterminé pour chaque plant, puis on procède au comptage du nombre moyen de tubercules plant⁻¹.

8.1.2.2. Diamètre du tubercule plant⁻¹

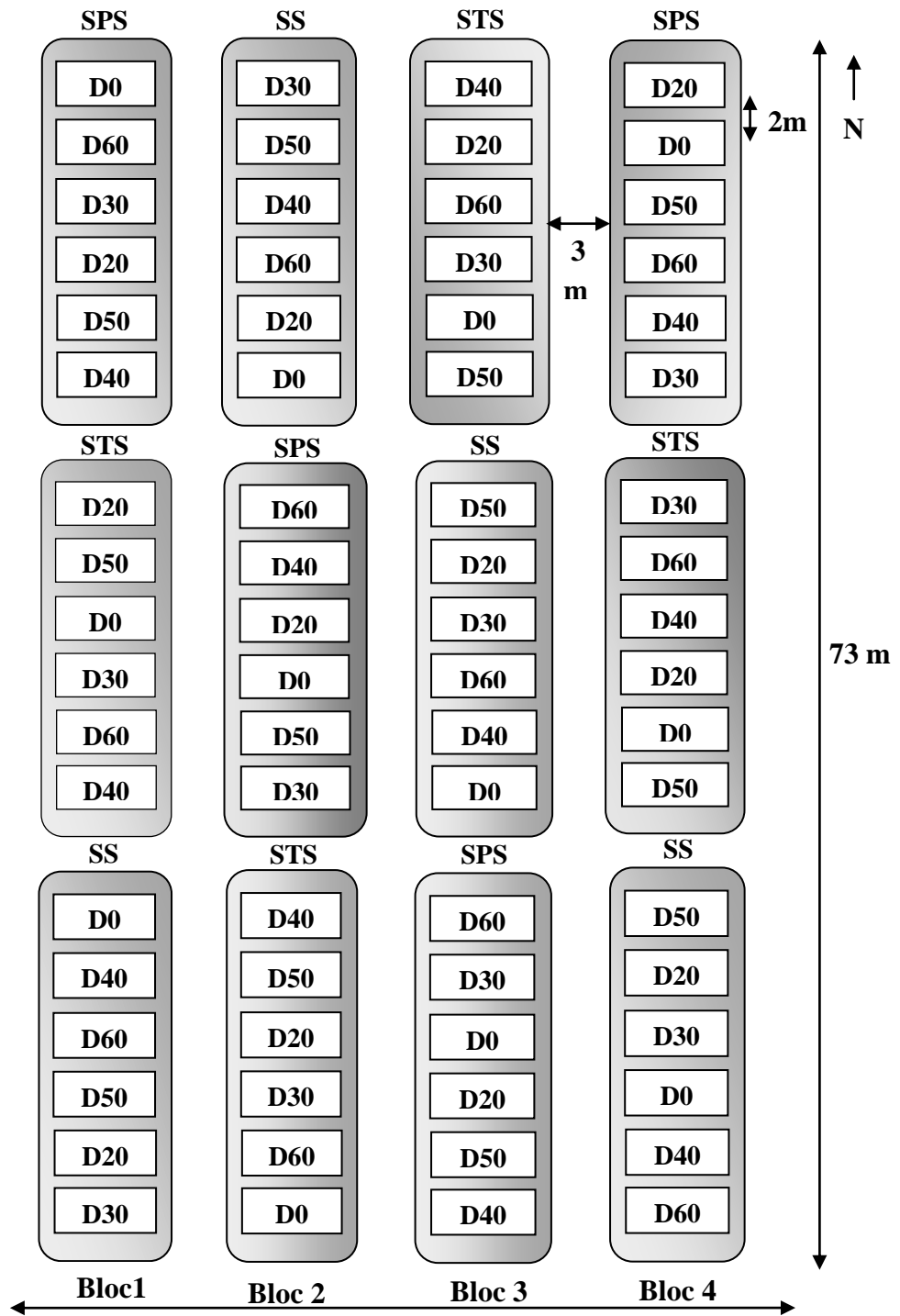
Le diamètre des tubercules plant⁻¹ (cm) a été déterminé à l'aide d'un pied à coulisse (± 0.01 mm). Les mesures sont portées sur les tubercules de moyen et gros calibre, respectivement de $28\text{mm} < \emptyset < 58 \text{ mm}$ et $\emptyset > 58 \text{ mm}$.

8. 1.2.3.Rendement plant⁻¹

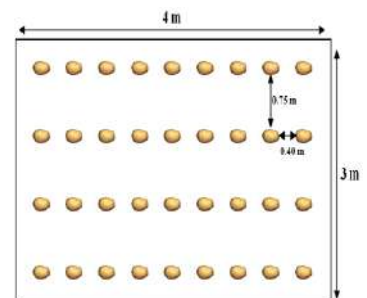
Le rendement plant⁻¹ a été déterminé en pesant les tubercules de chaque plant, puis on a procédé au calcul du rendement moyen plant⁻¹. Ce paramètre a été mesuré en utilisant une balance électrique ($\pm 0.1 \text{ g}$).

8.1.2.4. Rendement total (t ha⁻¹)

Le rendement (t ha⁻¹) a été déterminé sur cinq plants par parcelle élémentaire dans les lignes du milieu de chaque parcelle au niveau de la zone réservée aux observations du rendement. Le rendement est estimé en rapportant le rendement moyen par plant à la population végétale par hectare.



- *D* : Dose de fumier de volailles ;
- *SPS* : Sol Peu Salé ;
- *SS* : Sol Salé ;
- *STS* : Sol Très Salé ;



Détaille de la parcelle élémentaire

Figure 3. Schéma du dispositif expérimental



Photo 1. Certaines opérations culturales de la conduite de l'essai expérimental: **(a)** Préparation du sol, **(b)** Installation de système d'irrigation, **(c)** Epannage du fumier de volailles, **(d)** Plantation, **(e)** Levée, **(f)** Floraison, **(g)** Mesure de la hauteur de la tige, **(h)** Mesure du calibre des tubercules, **(i)** Récolte.

8.2. Paramètres physiologiques et biochimiques

Pour mettre en évidence l'effet de la fertilisation organique à base de fumier de volailles sur l'état nutritionnel de la pomme de terre, et l'évaluation de sa tolérance à la salinité sous nos conditions expérimentales, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, au dosage des teneurs de la plante en éléments nutritifs, appuyé sur la détermination des différents ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre, puis dans un deuxième temps à la détermination des teneurs des feuilles en proline et en chlorophylle .

8. 2.1.État nutritionnel

L'état nutritionnel a été évalué par l'analyse des teneurs des feuilles et des racines de la pomme de terre en éléments nutritifs majeurs et en autres éléments nutritifs liés au rendement de cette plante.

Il s'agit de la teneur de la plante en N, P, K, Ca, NO₃. Comme l'objectif de cette partie de notre étude est basé sur l'amélioration de la nutrition minérale de la pomme terre sous les conditions salines, les mesures ont également porté sur les éléments qui se trouvent en excès dans la solution du sol et dont la plante ne les exige qu'en faibles quantités à savoir, les contenus foliaires et racinaires de la pomme de terre en Na⁺ et Cl⁻.

Ces deux éléments ont été mesurés afin d'établir les différents ratios ioniques au niveau des deux organes de la plante. Il s'agit des ratios : K⁺/Na⁺, Ca⁺⁺/Na⁺, NO₃⁻/Cl⁻. La détermination de ces derniers est indispensable pour l'étude de la capacité de la sélectivité d'absorption de (K⁺, Ca⁺⁺) et NO₃⁻ par rapport au Na⁺ et Cl⁻ respectivement.

Ainsi, des échantillons foliaires (4^{ème} feuille à partir du point de croissance) et racinaires ont été collectés aléatoirement de cinq plants au niveau de chaque parcelle élémentaire au stade floraison. Avant l'analyse, ces échantillons ont été lavés à l'eau distillée, séchés à 60°C pendant 72 heures, broyés et tamisés à 0.5 mm. Par la suite, un échantillon de 100 mg de chaque traitement a été incinéré à 450°C pendant 4 heures au four à moufle. Après refroidissement, 2 ml de HNO₃/capsule sont ajoutés puis remis au four pendant 1 heure. La cendre obtenue est dissoute dans 3 ml d'HCl (6N) puis filtrée et le volume est amené à 100 ml. À partir de cette solution, le Na⁺ et le K⁺ ont été dosés par photométrie à flamme. L'azote total a été déterminé par la méthode micro-Kjeldahl. Le phosphore total (P) a été déterminé par colorimétrie. Le chlore a été déterminé par la méthode argento-métrique de Mohr. Le K a été déterminé par un photomètre à flamme et les Ca et Mg ont été déterminés par l'EDTA (Acide acétique diaminetetra d'éthylène), méthode de titrage (AOAC, 1997). Il est à mentionner que la teneur du végétal en éléments nutritifs est exprimée sur la base de la matière sèche.

8. 2.2.Paramètres biochimiques

L'approche biochimique a été effectuée par l'analyse du contenu des feuilles de la pomme de terre en proline et en chlorophylle. Le dosage de ces deux paramètres biochimiques a été réalisé au stade floraison (90 jours après la plantation) sur la quatrième feuille comptée en partant du sommet de la tige principale. Pour chaque traitement, cinq feuilles collectées aléatoirement dans chaque parcelle élémentaire. La teneur du végétal en chlorophylle et en proline a été exprimée sur la base de la matière fraîche.

8. 2.2.1. Dosage de la proline

La proline ou acide pyrrolidine 2-carboxylique est l'un des vingt principaux acides aminés qui entrent dans la constitution des protéines. Elle est facilement oxydée par la ninhydrine ou tricetohydrindène. C'est sur cette réaction que se base le protocole de mise en évidence de la proline dans les échantillons foliaires (El Jaafari, 1993). La méthode suivie est celle de Trolls et Lindsley (1955), simplifiée et mise au point par Rasio *et al.* (1987). Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline existant dans l'échantillon.

Ainsi, cent milligrammes (100 mg) des tiers médianes des feuilles fraîches sont prélevés et mis dans des tubes à essai auxquels on ajoute 2 ml de méthanol à 40 %. Les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) sont portés à ébullition au bain-marie à 85°C pendant 60 min. Après refroidissement, 1 ml de l'extrait a été prélevé de chaque tube et mis dans de nouveaux tubes auxquels, on ajoute 1 ml d'acide acétique. Ensuite, on ajoute, dans chaque tube, 1 ml de mélange contenant 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide orthophosphorique (H_3PO_4 , $d = 1.7$) et 25 mg de ninhydrine. Le mélange est porté à ébullition durant 30 min. La solution vire vers le rouge. On ajoute 5ml de toluène, après agitation deux phases se séparent.

- *Phase supérieure qui contient la proline.*
- *Phase inférieure sans proline.*

La phase supérieure est récupérée et déshydratée par l'adjonction de Na_2SO_4 anhydre, à l'aide d'une spatule pour éliminer l'eau qu'elle contient. La lecture de la densité optique des échantillons est faite à l'aide d'un spectrophotomètre à la longueur d'onde de 528 nm (Fig 4).

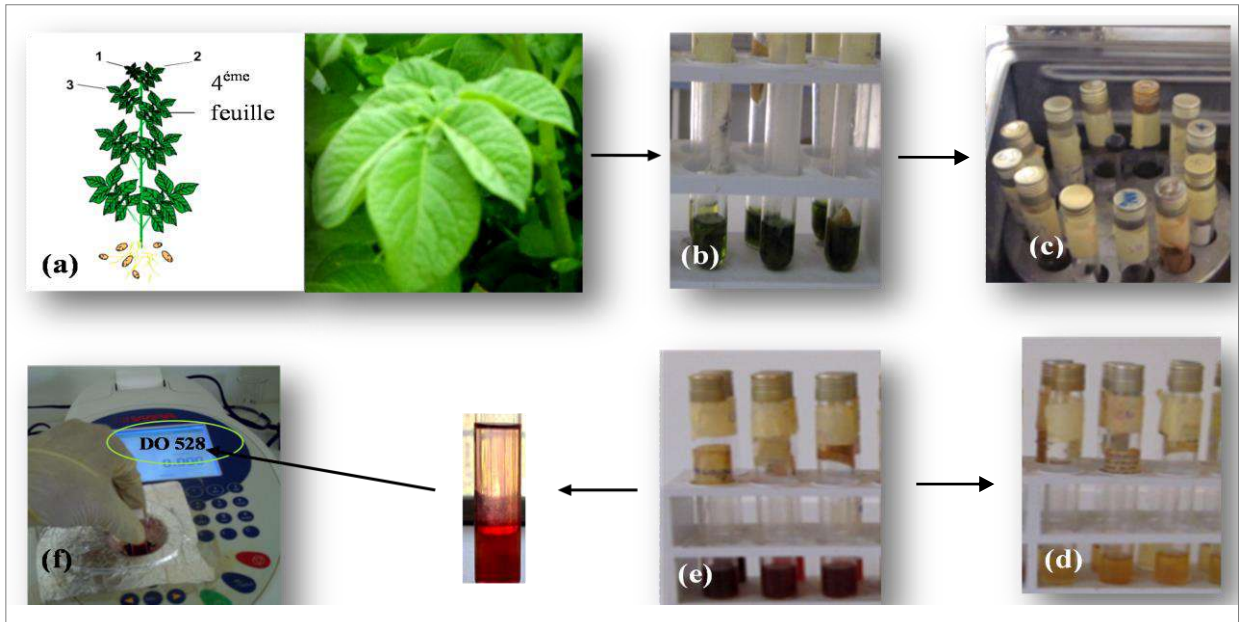


Figure 4. Principaux étapes de dosage de la proline : **a.** Echantillonnage de la 4^{ème} feuille ; **b.** Macération des échantillons dans le méthanol ; **c.** Emplacement des échantillons dans le bain-marie; **d.** Solution avant ébullition ; **d.** Solution après ébullition; **e.** Séparation des deux solutions ; **e.** Dosage de la proline par spectrophotomètre

8. 2.2.2. Dosage de la chlorophylle

Le dosage de la chlorophylle est réalisé sur des échantillons de cinquante milligrammes (50 mg) prélevés sur les tiers médians des plus jeunes feuilles, sont broyés dans de l'acétone à 80% et une pincée de CaCO₃. Le broyage est répété plusieurs fois dans un milieu ombré afin d'extraire la totalité des pigments chlorophylliens. L'extrait obtenu est centrifugé à 3400 g pendant 10 min. La densité optique (DO) de la totalité du surnageant obtenu est mesuré à 645 nm et à 663 nm (Spectrophotomètre U.V). L'étalonnage de l'appareil a été réalisé avec l'acétone (80%) (Fig 5).

La concentration en chlorophylle totale (Chlorophylle a et b), exprimée en mg. g⁻¹ MF est donnée par la formule d'Arnon (1949):

$$[\text{Chlorophylle a + b}] = (8.02 \times \text{DO } 663 + 20.21 \times \text{DO } 645) V / M ; \text{ Où}$$

- *V* : volume de l'extrait total en litres
- *M* : Masse de la matière fraîche de l'échantillon broyée en grammes

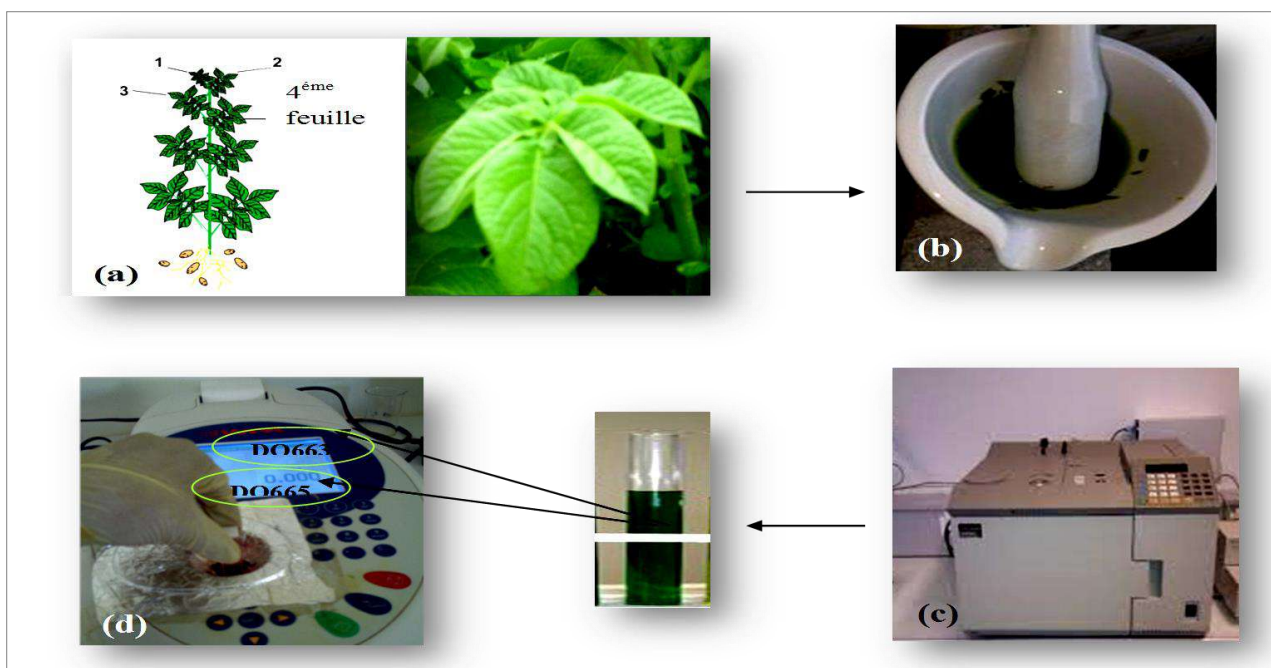


Figure 5. Principales étapes de dosage de la chlorophylle : **a.** Échantillonnage de la 4^{ème} feuille ; **b.** Macération et broyage des échantillons foliaires dans l'acétone ; **c.** Centrifugation ; **d.** Dosage de la chlorophylle par spectrophotomètre.

9. Méthodes traitement des données

Les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse de la variance (ANOVA) à trois critères de classification (Doses de fumier de volailles, niveau de salinité du sol et année) par le programme R-commander (Rcmdr) (R Development Core Team, 2013) utilisé comme logiciel statistique. Pour les analyses significatives, des comparaisons de moyennes ont été réalisées par le test de Newman et Keuls (TNK). Chaque moyenne est affectée d'une lettre. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes, au seuil de probabilité 5 %. Les corrélations entre l'ensemble des variables étudiées ont été déterminées par les coefficients de corrélation de Pearson (Coefficient r de Pearson ou coefficient de corrélation linéaire).

III. Résultats et discussion

La réponse de la pomme de terre à la fertilisation organique à base de fumier de volailles sous nos conditions expérimentales a été évaluée sur la base des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques. Les résultats obtenus montrent que les facteurs étudiés influencent l'ensemble des paramètres mesurés.

1. Effets de la salinité, dose de fumier (FV), année et de leur interaction sur les paramètres biométriques de la pomme de terre

1.1. Effets sur les paramètres de la croissance végétative

Les effets des doses de fumier de volailles (FV), du niveau de la salinité et de leur interaction sur les paramètres de croissance végétative durant les quatre années de l'essai sont consignés dans le tableau 5.

1.1.1. Effet des doses de fumier de volailles sur les paramètres de la croissance végétative

L'effet des différentes doses de fumier de volailles sur les paramètres de croissance végétative (nombre de tiges plant^{-1} , hauteur de la tige plant^{-1} , surface foliaire plant^{-1} , biomasse sèche aérienne (BSA) et biomasse sèche souterraine (BSR) plant^{-1}) est dans l'ensemble significatif ($P < 0.001$) (Tableau 5). Ces paramètres enregistrent une augmentation significative avec l'apport croissant de fumier de volailles, avec des meilleurs résultats pour la dose 60 t ha^{-1} . Les moyennes relatives à cette dose sont de 37.76 cm pour la hauteur de la tige, 310.15 cm^2 pour la surface foliaire, 61.97g pour la BSA et 5.43 g pour la BSR. Soient des taux d'augmentation de 101.7, 81.9, 123 et 120.07 % respectivement pour la hauteur de la tige plant^{-1} , la surface foliaire plant^{-1} , la BSA et la BSR par rapport au témoin. Le test de classement des moyennes (TNK) appliqué à ces paramètres a révélé six groupes homogènes distincts, où chaque dose a formé un groupe à part suivant le classement décroissant suivant : **a** (60 t ha^{-1}) > **b** (50 t ha^{-1}) > **c** (40 t ha^{-1}) > **d** (30 t ha^{-1}) > **e** (20 t ha^{-1}) > **f** (0 t ha^{-1}).

En revanche, le nombre de tige plant^{-1} le plus élevé a été enregistré par la dose 50 t ha^{-1} avec une moyenne de 3.46 tige plant^{-1} occupant ainsi la première position présentée par le groupe (**a**), secondé par les doses 30 et 40 t ha^{-1} présentées par le groupe (**ab**). Les doses 60, 20 et 0 t ha^{-1} ont occupé la troisième position présentée par le groupe (**b**).

Quant au ratio BSR/BSA, la première position a été occupée par la dose 30 t ha^{-1} avec un rapport de 0.1 (groupe **a**), suivie par les doses restantes qui ont formé un seul groupe (groupe **b**).

1.1.2. Effet de la salinité sur les paramètres de croissance végétative

L'analyse de la variance a montré que les paramètres de croissance végétative étudiés ont été influencés d'une façon significative par la salinité ($P < 0.001$), à l'exception du nombre

de tiges plant⁻¹ et le rapport (BSR/BSA), qui n'ont montré aucune différence significative entre sites (Tableau 5).

D'après les résultats de test de classement des moyennes (TNK), le site 3 (STS) a été classé en première position pour la hauteur des tiges plant⁻¹, la surface foliaire plant⁻¹, la BSA et la BSR.

Les moyennes obtenues pour ces paramètres sont respectivement de 28.08 cm, 300.24 cm², 54.82 g et 5.03 g. Ce site enregistre des taux d'augmentation de (8.92% et 11.96%), (33.57% et 45.32%), (36.16% et 35.9 %) et (41.29 % et 38.56 %) pour la hauteur de tige plant⁻¹, surface foliaire plant⁻¹, BSA et BSR respectivement par rapport aux sites (SS) et (SPS).

L'effet de la salinité sur les paramètres de la croissance végétative a permis de répartir les sites d'étude en deux groupes homogènes pour la BSA, BSR et la hauteur de la plante : le groupe **(a)** présenté par le sol le plus salé (STS), et le groupe **(b)** regroupant les deux sols : sol salé (SS) et sol peu salé (SPS). Pour la surface foliaire, la première position a été occupée à la fois par le sol très salé (STS) et salé (SS), secondée par le sol peu salé (SPS) représenté par le groupe **(b)**.

Bien que la salinité a montré un effet significatif sur la BSA et la BSR, elle n'a pas eu d'effet préjudiciable sur leur ratio (BSR /BSA), qui n'a montré aucune différence significative entre sites.

Les résultats obtenus montrent que le rapport BSR/BSA est inférieur à l'unité, c'est-à-dire que la croissance pondérale de la partie aérienne est plus importante que celle de la partie souterraine.

Tableau 5. Effets des facteurs étudiés (Salinité, Dose de fumier (FV), Année) et de leur interaction (Moyennes \pm SD et les valeurs *P*) sur les paramètres de croissance végétative de la pomme de terre durant les quatre années de l'essai (2009 -2012)

Paramètre Facteur	Nom. tiges plant ⁻¹	Haut. Tiges plant ⁻¹	Sur. Foli (cm ²)	BSA (g)	BSR (g)	Rapport BSR / BSA
Année						
2009	3.46 \pm 0.3 (a)	29.39 \pm 9.66 (a)	260.09 \pm 81.9 (a)	52.18 \pm 15.58 (a)	5.13 \pm 1.59 (a)	0.10 \pm 0.01 (a)
2010	3.29 \pm 0.38 (c)	23.61 \pm .72 (c)	211.25 \pm 54.89 (c)	40.62 \pm 12.37 (c)	3.54 \pm 1.11 (c)	0.09 \pm 0.01 (b)
2011	3.39 \pm 0.25 (ab)	26.51 \pm 6.61 (b)	246.34 \pm 86.0 (b)	43.69 \pm 13.83 (b)	3.8 \pm 1.25 (b)	0.09 \pm 0.01 (b)
2012	3.16 \pm 0.24 (b)	26.99 \pm 7.8 (b)	257.82 \pm 74.58 (a)	44.03 \pm 16.21 (b)	3.8 \pm 1.32 (b)	0.09 \pm 0.02 (b)
Niveau de Salinité du sol (dS m⁻¹)						
SPS (1.2)	3.36 \pm 0.33	25.08 \pm 7.9 (b)	206.6 \pm 4.24 (b)	40.32 \pm 11.91 (b)	3.63 \pm 1.04 (b)	0.09 \pm 0.01
SS (2.29)	3.30 \pm 0.36	25.87 \pm 7.4 (b)	224.78 \pm 5.27 (a)	40.26 \pm 12.56 (b)	3.56 \pm 0.93 (b)	0.09 \pm 0.01
STS (5.6)	3.32 \pm 0.26	28.08 \pm 8.5 (a)	300.24 \pm 4.24 (a)	54.82 \pm 15.74 (a)	5.03 \pm 1.77 (a)	0.09 \pm 0.02
Dose de fumier de volailles (FV) (t ha⁻¹)						
0	3.21 \pm 0.27 (b)	18.72 \pm 1.6 (f)	170.51 \pm 23.28 (f)	27.79 \pm 2.44 (f)	2.46 \pm 0.6 (f)	0.09 \pm 0.02 (b)
20	3.29 \pm 0.31 (b)	19.35 \pm 2.5 (e)	189.78 \pm 19.35 (e)	36.52 \pm 9.08 (e)	3.3 \pm 1.0 (e)	0.09 \pm 0.01 (b)
30	3.36 \pm 0.39 (ab)	22.45 \pm 3.8 (d)	232.49 \pm 42.42 (d)	40.58 \pm 12.02 (d)	3.84 \pm 1.1 (d)	0.10 \pm 0.02 (a)
40	3.37 \pm 0.33 (ab)	27.25 \pm 2.43 (c)	271.23 \pm 58.32 (c)	47.79 \pm 11.94 (c)	4.4 \pm 1.28 (c)	0.09 \pm 0.01 (b)
50	3.46 \pm 0.30 (a)	34.21 \pm 3.3 (b)	289.08 \pm 85.7 (b)	56.14 \pm 9.74 (b)	4.99 \pm 1.08 (b)	0.09 \pm 0.01 (b)
60	3.26 \pm 0.26 (b)	37.76 \pm 5.4 (a)	310.15 \pm 84.78 (a)	61.97 \pm 9.95 (a)	5.43 \pm 1.23 (a)	0.09 \pm 0.01 (b)
Signification statistique (Valeur <i>P</i> ANOVA)						
Année	***	***	***	***	***	***
N. Salinité	NS	***	***	***	***	NS
Doses FV (t ha ⁻¹)	**	***	***	***	***	*
NS \times Année	**	***	***	***	***	***
Dose FV (t ha ⁻¹) \times Année	**	***	***	***	NS	***
NS \times Dose FV (t ha ⁻¹)	**	*	***	***	***	*
NS \times Dose FV \times Année	***	NS	***	***	*	NS

Nom de tiges plant⁻¹ : Nombre de tiges plant⁻¹; Haut. tiges plant⁻¹ : Hauteur de tige par plant ; Sur. foli: Surface foliaire ; BSA: Biomasse sèche aérienne (feuilles+tiges); BSR : Biomasse sèche souterraine ; Rapport : BSA/BSR ; Rapport : Biomasse partie racinaire /Biomasse poids sec partie aérienne.

*Signification statistique : NS : Non Significatif ; * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$.Dans les colonnes, les valeurs moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différents à $p \leq 0,05$.*

1.1.3. Effet de l'année sur les paramètres de croissance végétative

Les paramètres de croissance végétative étudiés ont enregistré des variations significatives entre années ($P < 0.001$) (Tableau 5). Le test de classement des moyennes a révélé que les meilleures moyennes ont été observées durant l'année 2009, présentée par le groupe (a), alors que les plus faibles ont été enregistrées par l'année 2010 présentée par le groupe (c). Les moyennes correspondantes sont (3.46 et 3.29 tiges plant⁻¹), (29.39 et 23.61 cm), (260.09 et 211.25 cm²), (52.18 et 40.62g), (5.13 et 3.54 g) et (0.1 et 0.9) respectivement pour le nombre de tiges plant⁻¹, la hauteur de tiges plant⁻¹, la surface foliaire (cm²), BSA et BSR et le ratio BSR/BSA pour l'année 2009 et 2010.

Les deux autres années ont enregistré des valeurs intermédiaires rassemblées dans les groupes **(ab)** et **(b)** relatifs à l'année 2011 et 2012 pour le nombre de tiges plant⁻¹ et le groupe **(b)** relatif à l'année 2011 et 2012 pour la hauteur de tiges plant⁻¹.

La variation interannuelle de la biomasse sèche aérienne et racinaire a permis de scinder les années en trois groupes homogènes : le groupe **(a)** présenté par l'année 2009, le groupe **(b)** rassemble les deux années 2011 et 2012 et enfin un groupe **(c)** présenté par l'année 2010.

Toutefois, une variation moins importante a caractérisé le rapport BSR/BSA. Le test de classement des moyennes a décelé seulement deux groupes homogènes bien distincts. Le premier groupe **(a)** correspond à l'année 2009 avec un rapport de 0.1, alors que le groupe **(b)** rassemble les trois années restantes (2010, 2011 et 2012) avec un rapport de 0.9.

1.1.4. Effet de l'interaction de la salinité, dose de fumier et année sur les paramètres de croissance végétative

Concernant l'interaction entre les facteurs (Salinité, Doses de fumier et Année) analysés deux à deux, l'ANOVA a montré des effets significatifs sur les interactions étudiées pour l'ensemble des paramètres de croissance végétative mesurés (Nombre de tiges plant⁻¹, Hauteur de tiges plant⁻¹, Surface foliaire (cm²), BSA et le ratio BSR/BSR), exception faite à la BSR qui n'a montré aucune différence significative pour l'interaction (Dose fumier FV × Année) (Tableau 5).

Les paramètres de croissance végétative augmentent proportionnellement avec l'augmentation des doses de fumier de volailles pour les quatre années de l'essai, cependant, cette augmentation paraît variable en fonction des années (Tableau 5, Annexe III).

Quant à l'interaction (Salinité × Dose fumier), l'analyse statistique a montré des différences significatives ($P < 0.001$) entre les différents traitements pour les paramètres de croissance végétative étudiés. Les meilleurs résultats ont été enregistrés par le traitement : Site 3 (STS) × 60 t ha⁻¹ (FV) (Tableau 5, Annexe III).

Les résultats de l'analyse de la variance a montré également des effets significatifs pour l'interaction (Salinité × Année). Les meilleures moyennes ont été observées durant l'année 2009 au niveau du site sol très salé (STS) (Tableau 5, Annexe III).

Concernant l'interaction entre les trois facteurs (Salinité × Dose fumier × Année), l'analyse statistique a montré des différences significatives pour la plupart des paramètres de croissance végétative étudiés, à l'exception de la hauteur de tige plant⁻¹ et le rapport (BSA/BSR) qui n'ont révélé aucune différence significative entre traitements. Les meilleurs résultats ont été enregistrés par le traitement (STS × 60 t ha⁻¹ de (FV) × Année 2009) avec 453.98 cm², 82.61g et 8.47g pour la surface foliaire plant⁻¹, la BSA et la BSR respectivement.

Quant au nombre de tiges plant⁻¹, le meilleur résultat a été observé par le traitement (SS × 40 t ha⁻¹ de (FV) × Année 2010) avec 3.96 tiges plant⁻¹, alors que les plus faibles résultats ont été enregistrés durant l'année 2010 au niveau du sol peu salé (SPS) soit, 2.55 tiges plant⁻¹ enregistrées par la dose (30 t ha⁻¹), 122.5 cm² enregistrée par la dose (0 t ha⁻¹) et 1.99 g enregistrée par la dose (0 t ha⁻¹ × SS), respectivement pour le nombre de tiges plant⁻¹, la surface foliaire et la BSR.

La plus faible BSA a été enregistrée par la dose (0 t ha⁻¹) au niveau du sol très salé (STS) durant l'année 2010 avec 25.82g (Tableau 5, Annexe III).

En revanche, aucune différence significative n'a été enregistrée pour l'effet de l'interaction des trois facteurs sur la hauteur de la tige plant⁻¹ et le rapport BSR/BSA (Tableau 5).

1.1.5. Discussion générale

Le fumier de volailles introduit au sol au niveau des trois sites expérimentaux a provoqué une amélioration significative de la plupart de paramètres de croissance végétative étudiés par rapport au témoin (sans apport) et ceci, quel que soit le niveau de salinité dans les trois sites expérimentaux.

Ces résultats corroborent ceux de Abou-Hussein (1995) et Hamdy (2008) qui ont montré que les paramètres de croissance végétative de la pomme de terre (Hauteur de tige plant⁻¹, la surface foliaire plant⁻¹ et BSR et le rapport BSR/BSA) augmentent significativement avec l'augmentation de l'apport organique appliqué au sol.

Les résultats obtenus peuvent être expliqués par l'action favorable de l'apport de fumier de volailles sur l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et microbiologique du sol (Tejada *et al.*, 2006 ; Walker et Bernal, 2008 ; Jalali et Ranjbar, 2009).

L'effet positif de l'apport organique s'avère particulièrement, selon Saleh *et al.* (2003) et Suganya et Sivasamy (2006), sur la structure du sol, la capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs du sol. Ce qui s'applique en particulier à la nature pédologique sableuse de nos sites expérimentaux, suite à leur enrichissement en fumier de volailles.

L'amélioration des paramètres de croissance végétative observée en réponse aux différentes doses de fumier de volailles peut être due à l'amélioration du potentiel d'alimentation de la plante en macroéléments et micro-éléments. Il est bien connu que la croissance végétative des plantes est positivement corrélée avec l'absorption des éléments nutritifs, en particulier celle de l'azote (Verlinden et McDonald, 2007).

La richesse du fumier de volailles en cet élément, a assuré un approvisionnement continu de la plante au fur et à mesure de la minéralisation des composés organiques azotés contenus dans ce fumier (Kumar *et al.*, 2007).

D'après Eleiwa *et al.* (2012), l'azote joue un rôle très important dans l'augmentation de l'indice foliaire, sur le rendement en feuilles et sur le taux de la photosynthèse chez la pomme de terre.

Ces observations ont été appuyées par les fortes corrélations positives et significatives enregistrées entre l'azote et certains paramètres de la croissance végétative tel que la surface foliaire ($r = 0.66^{***}$) et la hauteur de la tige plant⁻¹ et ($r = 0.74^{***}$) (Tableau 7, Annexe III).

Les résultats obtenus ont également montré que, l'action favorable de l'apport organique sous forme de fumier de volailles sur les paramètres de croissance végétative est d'autant plus marquée que la dose appliquée est élevée. Ces résultats s'accordent avec ceux de Hamdy *et al.* (2008), où une augmentation significative des paramètres de croissance végétative de la pomme de terre a été observée avec l'apport croissant du fumier de volailles. Ce résultat se voit clairement avec la plus forte dose (60 t ha⁻¹) de fumier de volailles (FV), pouvant être attribuée à sa richesse éléments nutritifs par rapport aux autres doses testées.

Ainsi, une bonne nutrition azotée assurée dans notre cas, notamment par les fortes doses de fumier de volailles (FV) a activé la photosynthèse et a augmenté la production de matière sèche pour la croissance et le grossissement des tubercules.

La forte production de la matière sèche en réponse à l'augmentation des doses de fumier de volailles (FV), particulièrement la proportion de la matière sèche produite par le système

aérien (BSA), est synonyme d'une vigueur considérable de cette plante en réponse à l'apport organique croissant. La biomasse sèche aérienne (BSA) a enregistré une augmentation de 123 %, suite à l'application de la dose de 60 t ha⁻¹ par rapport au témoin. Ainsi, la vigueur transmise par le système racinaire permet aux plants de la pomme de terre de préserver la croissance pondérale de la plante entière, au détriment de la croissance de la partie racinaire, au profit de l'appareil végétatif aérien, responsable de la photosynthèse dont les produits seraient distribués de façon optimale pour assurer la survie de la plante (Rubinigg *et al.*, 2004 ; Munns, 2005).

En ce qui concerne l'effet de la salinité sur les paramètres de croissance végétative, contrairement à Heuer et Nadler (1995), qui ont rapporté que ce facteur provoque une forte réduction de la croissance végétative de la pomme de terre, les meilleurs paramètres de croissance végétative pour la présente étude ont été enregistrés dans le site le plus salé (STS : CE = 5.6 dS m⁻¹).

Les résultats obtenus montrent que pour tous les sites, le rapport de biomasse BSR/BSA est inférieur à l'unité, c'est-à-dire que la croissance pondérale de la partie aérienne est plus importante que celle de la partie souterraine et de ce fait plus résistante à la salinité.

Toutefois, l'absence de l'effet significatif de la salinité sur le rapport (BSR/BSA), nous laisse supposer que ce paramètre n'est pas très discriminant pour la tolérance à la salinité chez la pomme de terre, comme il est le cas chez d'autres cultures, tel que le haricot (Zaman-Allah *et al.*, 2009).

Au regard à l'effet de l'interaction (Salinité × Dose fumier), les résultats obtenus ont indiqué que l'apport croissant de fumier de volailles a considérablement amélioré les paramètres de croissance végétative par rapport au témoin, quel que soit le niveau de salinité du sol. Néanmoins, les meilleurs paramètres ont été enregistrés durant l'année 2009 au niveau du sol le plus salé (STS) traité par la plus forte dose de fumier de volailles, soit, 60 t ha⁻¹. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Saleh *et al.* (2003) et El-Missery (2003) sur d'autres cultures (Luzerne, oignon, épinard). Ces auteurs ont révélé que l'application de la fumure organique au sol salé augmente significativement les paramètres de croissance de ces plantes.

Il est clair, à partir de ces résultats que, la fertilisation organique à base de fumier de volailles diminue l'effet défavorable de la salinité sur la croissance végétative de la pomme de terre.

En plus, l'application de la matière organique a ses propres avantages sur l'amélioration des conditions de croissance, en abaissant le pH de la rhizosphère, ce qui se traduit par l'augmentation de la solubilité de nutriments et leur disponibilité pour les plantes (Choudhary *et al.*, 2004; Abou El Majd, 2008).

Les faibles performances enregistrées pour les sols témoins comparativement aux sols soumis à l'apport de fumier de volailles pour les quatre années, sont dues aux faibles teneurs en éléments nutritifs. En plus, l'énergie disponible à la plante a été probablement déviée vers les mécanismes de tolérance à la salinité au lieu de son implication dans la vigueur de la croissance.

1.2. Paramètres de rendement

Les effets de la salinité, doses de fumier de volailles (FV) et de leur interaction sur les paramètres de rendement durant les quatre années de l'essai sont présentés dans le tableau 6.

1.2.1. Effets des doses de fumier de volailles sur les paramètres de rendement

En se basant, sur les résultats de l'analyse de la variance, les effets globaux des doses de fumier de volailles (FV) étaient significatives ($P < 0.001$) sur les paramètres de rendement étudiés à savoir le nombre de tubercules plant⁻¹, diamètre de tubercule plant⁻¹, le rendement des tubercules plant⁻¹ et le rendement de total t ha⁻¹ (Tableau 6).

Les résultats obtenus ont indiqué que l'apport croissant de fumier de volailles (FV) (20, 30, 40, 50 et 60 t ha⁻¹) a significativement augmenté tous les paramètres de rendement mesurés par rapport au témoin (0 t ha⁻¹). Toutefois, l'application de la dose 60 t ha⁻¹ de ce fumier a enregistré les moyennes les plus élevées pour tous les paramètres de rendement étudiés.

Le test de Newman-Keuls montre que la dose 60 ha⁻¹ de fumier de volailles (FV) a enregistré les meilleurs résultats concernant ces paramètres (groupe **a**).

Les moyennes enregistrées par cette dose sont 9.61 tubercules plant⁻¹, 7.85 cm pour le diamètre de tubercules plant⁻¹, 1.31 kg plant⁻¹ pour le rendement plant⁻¹ et 34.17 t ha⁻¹ pour le rendement total ha⁻¹, soient des taux d'augmentation de 57.8, 34.88, 95.52 et 74.23% respectivement par rapport au témoin (0 t ha⁻¹) qui a occupé la dernière position pour l'ensemble des paramètres (Tableau 6).

1.2. 2. Effets de la salinité sur les paramètres de rendement

Quant aux effets de la salinité, l'analyse de la variance a décelé des différences significatives de ce facteur sur l'ensemble des paramètres de rendement étudiés ($P < 0.001$) (Tableau 6). Le test de Newman-Keuls a montré que le sol très salé (STS) a été classé au premier rang pour la plus part des paramètres de rendement «groupe **a**», malgré la forte salinité du sol à son niveau. Ce sol diffère significativement des deux sols (SPS) et (SS) qui ont été groupés en deuxième position « groupe **b** ».

Les meilleurs paramètres de rendement ont été enregistrés au niveau du sol très salé (STS), soit un nombre moyen de 8.88 tubercules plant^{-1} , un diamètre moyen de tubercules de 7.65 cm, un rendement plant^{-1} de 1.07 kg plant^{-1} et un rendement total de 33.45 t ha^{-1} . Soit des gains respectifs de 18.24 % et 21.81 % pour le nombre de tubercules plant^{-1} , 20.22 et 27.38 % pour le rendement plant^{-1} et 33.64 et 46.32% pour le rendement total plant^{-1} par rapport au sol peu salé (SPS) et sol salé (SS) respectivement. Le même taux d'augmentation de 14.18 % a été enregistré par le sol très salé (STS) par rapport aux deux autres sols pour le diamètre des tubercules plant^{-1} (Tableau 6).

1.2.3. Effet de l'année sur les paramètres de rendement

L'analyse de la variance a montré que les paramètres de rendement varient significativement entre les quatre années de l'étude ($P < 0.001$) (Tableau 6). Néanmoins, il est bien évident, d'après le classement des moyennes, que les meilleures moyennes ont été observées durant l'année 2009 qui a occupé la première position pour le rendement par plant^{-1} et le rendement total ha^{-1} , avec des gains respectifs de (6.59 et 5.12 %), (3.11 et 2.5%) et (5.43 et 4.1%) par rapport aux années 2010, 2011 et 2012.

Cependant, les années 2009 et 2012 ont été classées en deuxième position après les années 2010 et 2011 pour le nombre de tubercules plant^{-1} en augmentant ce paramètre de 4.14 % par rapport aux années 2009 et 2012. L'année 2010 a enregistré le plus faible diamètre de tubercules plant^{-1} , soit, un taux de réduction de 14.47, 13.33 et 12.16 % par rapport à l'année 2009, 2011 et 2012 respectivement.

Tableau 6. Effet des facteurs étudiés (Salinité, Dose de fumier (FV), Année) et de leur interaction (Moyennes \pm SD et les valeurs *P*) sur les paramètres de rendement de la pomme de terre durant les quatre années de l'essai (2009 -2012)

Facteur	Paramètre	Nom. tuber plant ⁻¹	Diam. tuber plant ⁻¹ (cm)	Rend plant ⁻¹ (kg)	Rend. total t ha ⁻¹
Année					
2009		7.73 \pm 1.28 (b)	7.6 \pm 1.23 (a)	0.97 \pm 0.29 (a)	27.9 \pm 7.6 (a)
2010		8.05 \pm 1.62 (a)	6.5 \pm 0.77 (b)	0.91 \pm 0.25 (b)	26.54 \pm 7.1 (b)
2011		8.05 \pm 1.85 (a)	7.5 \pm 1.46 (a)	0.94 \pm 0.28 (ab)	27.22 \pm 7.9 (ab)
2012		7.73 \pm 1.75 (b)	7.4 \pm 1.16 (a)	0.92 \pm 0.24 (b)	26.8 \pm 7.7 (b)
Niveau de la salinité du sol (dS m⁻¹)					
SPS (1.2)		7.51 \pm 1.81 (b)	6.7 \pm 1.0 (b)	0.89 \pm 0.2 (ab)	25.03 \pm 3.97 (b)
SS (2.29)		7.29 \pm 1.21 (c)	6.7 \pm 0.95 (b)	0.84 \pm 0.2 (b)	22.86 \pm 3.19 (c)
STS (5.6)		8.88 \pm 1.35 (a)	7.6 \pm 1.06 (a)	1.07 \pm 0.3 (a)	33.45 \pm 9.14 (a)
Dose de fumier de volailles (FV) (t ha⁻¹)					
0		6.09 \pm 0.96 (d)	5.85 \pm 0.85 (c)	0.67 \pm 0.08 (f)	19.5 \pm 1.11 (f)
20		6.82 \pm 1.03 (c)	6.50 \pm 8.17 (b)	0.74 \pm 0.06 (e)	22.7 \pm 2.82 (e)
30		6.99 \pm 0.92 (c)	6.75 \pm 9.87 (b)	0.8 \pm 0.09 (d)	25.62 \pm 3.81 (d)
40		8.71 \pm 1.09 (b)	7.30 \pm 1.01 (ab)	0.97 \pm 0.17 (c)	28.73 \pm 6.38 (c)
50		9.03 \pm 1.11 (a)	7.60 \pm 0.79 (a)	1.13 \pm 0.22 (b)	31.9 \pm 7.97 (b)
60		9.61 \pm 1.02 (a)	7.85 \pm 0.92 (a)	1.31 \pm 0.16 (a)	34.17 \pm 8.04 (a)
Valeur (ANOVA <i>P</i>)					
Année		***	*	***	***
NS. Salinité		***	***	***	***
Dose FV		***	***	***	***
N. Salinité \times Année		***	***	NS	NS
Dose FV \times Année		***	***	*	NS
NS \times Dose FV		***	***	***	***
NS \times Dose FV \times Année		NS	***	**	NS

Nom de tuber plant⁻¹ : Nombre de tubercules plant⁻¹ ; Diam. tuber: Diamètre de Tubercules plant⁻¹ ; Rend total plant⁻¹ . SPS: Sol Peu Salé ; SS: Sol Salé ; STS: Sol Très Salé ; N.Salinité : Niveau de Salinité ; Doses FV : Doses de Fumier de Volailles.

*Signification : NS : Non Significatif ; * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$. Dans les colonnes, les valeurs moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différents à $P \leq 0.05$.*

Pour le diamètre de tubercules plant⁻¹, la comparaison multiple des moyennes a permis de dégager deux groupes distincts : le groupe (a) englobant les trois années 2009, 2011, 2012 et le groupe (b) présenté par l'année 2010.

En revanche, l'analyse de la variance a mis en évidence une variation annuelle plus importante pour le rendement plant⁻¹ et le rendement total t ha⁻¹, ce qui a permis de classer les moyennes en trois groupes distincts : (a) 2009 > (ab) 2011 > (b) 2010 = 2012.

1.2.4. Effets de l'interaction de la salinité, dose de fumier et année sur les paramètres de rendement

L'analyse statistique relative à l'effet de l'interaction des facteurs étudiés n'a montré aucun effet significatif sur le rendement total ha^{-1} pour les deux interactions : (Salinité \times Année) et (Dose fumier \times Année), alors qu'un effet significatif a été mis en évidence pour ces deux interactions sur le nombre de tubercules plant^{-1} et le diamètre de tubercules plant^{-1} .

Pour le rendement total plant^{-1} , un effet non significatif et un autre significatif ont été enregistrés respectivement pour les deux interactions précédentes. En revanche, l'interaction (Salinité \times Dose fumier) a montré des effets significatifs pour l'ensemble des paramètres étudiés (Tableau 6).

Quant à l'analyse de la variance relative à l'effet de l'interaction des trois facteurs a manifesté un effet significatif pour l'interaction (Salinité \times Dose fumier \times Année) pour le diamètre et le rendement plant^{-1} . Toutefois, aucun effet significatif n'a été mis en évidence pour le nombre de tubercules plant^{-1} , ni pour le rendement total t ha^{-1} (Tableau 6).

1.2.5. Effet de l'interaction de la salinité, dose fumier (FV) et année sur le rendement total

L'élaboration du rendement implique l'enchaînement de multiples mécanismes liés à la croissance et au développement des peuplements végétaux cultivés à travers la morphogenèse et le fonctionnement des organes des plantes qui les constituent, en relation avec les facteurs et les conditions du milieu (Picard et Combe, 1994). L'effet des deux interactions : (Salinité \times Année) et (Dose fumier \times Année) sur le rendement total est bien illustré par les figures 6 et 7.

Pour chaque niveau de salinité au sein des trois sites expérimentaux, le rendement total ne semble pas varier significativement en fonction des années. Toutefois, le rendement total (t ha^{-1}) le plus élevé a été enregistré durant l'année 2009 au niveau du site le plus salé (STS), soit un rendement total de 34 t ha^{-1} enregistré à la fois durant l'année 2009 et 2011 au niveau du sol très salé(STS) (Fig. 6).

D'autre part, aucune variation interannuelle n'a été mise en évidence, quelle que soit la dose de fumier de volailles apportée au sol. Tandis que, le rendement le plus élevé a été enregistré par la plus forte dose (60 t ha^{-1}) durant l'année 2009 avec un rendement total de 34.93 t ha^{-1} (Fig. 7).

À l'opposé des deux interactions précédentes, l'analyse des résultats relatifs à l'effet de l'interaction (Salinité × Dose fumier FV) sur les paramètres de rendement, nous a permis de conclure que l'apport croissant de fumier de volailles conduit à une amélioration significative du rendement total $t\ ha^{-1}$ de la pomme de terre ($P < 0.001$). Le meilleur rendement a été obtenu par le traitement sol : (STS) × 60 $t\ ha^{-1}$ de (FV) avec un rendement total de 45.04 $t\ ha^{-1}$. Le plus faible rendement a été enregistré par le traitement : Sol (SS) × 0 $t\ ha^{-1}$ de (FV) avec un rendement total de 19.16 $t\ ha^{-1}$ (Fig. 8).

Quant à l'analyse statistique relatif à l'effet interactif de trois facteurs (Salinité × Dose fumier × Année), l'ANOVA n'a été indiquée aucune variation significative entre traitements sur le rendement total ha^{-1} , bien que, l'analyse individuelle de chaque facteur a indiqué des différences significatives pour chacun à part (Fig. 9, Tableau 6). Toutefois, malgré l'absence de l'effet significatif pour l'interaction entre les trois facteurs, le meilleur rendement total $t\ ha^{-1}$ a été enregistré par la dose 60 $t\ ha^{-1}$ dans le site sol très salé (STS), soit un rendement moyen de 45.9 $t\ ha^{-1}$ obtenu durant l'année 2009. Alors que, le plus faible a été enregistré par la dose T0 (sans apport) durant l'année 2012 au niveau du sol salé (SS) avec un rendement total de 18.47 $t\ ha^{-1}$ (Fig. 8) (Tableau 7, Annexe III).

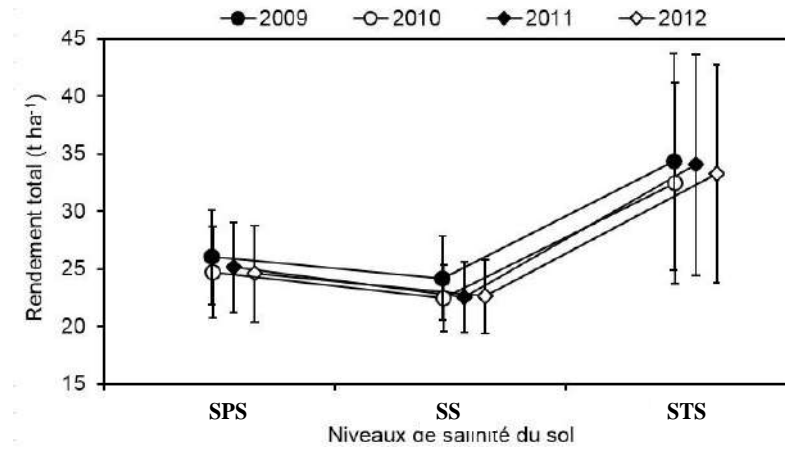


Figure 6. Effet de niveau de la salinité sur le rendement total ($t\ ha^{-1}$) durant les quatre années de l'essai

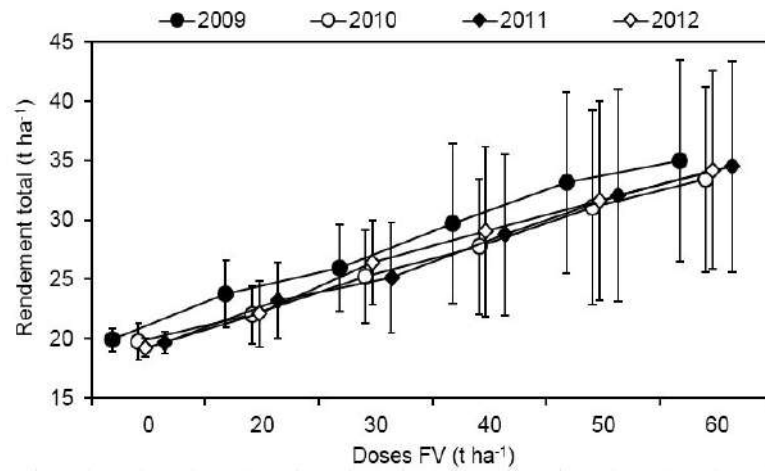


Figure 7. Effet des doses de fumier de volailles (FV) sur le rendement total ($t\ ha^{-1}$) durant les quatre années de l'essai

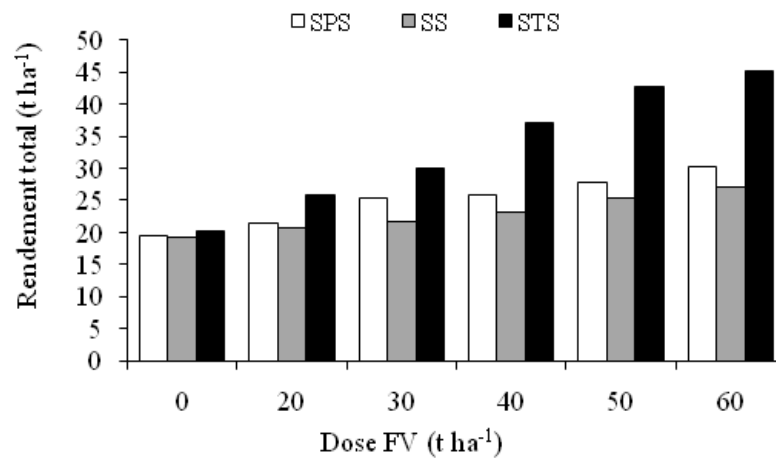


Figure 8. Rendement ($t\ ha^{-1}$) total en fonction des doses de fumier et de niveau de la salinité dans les trois sites expérimentaux

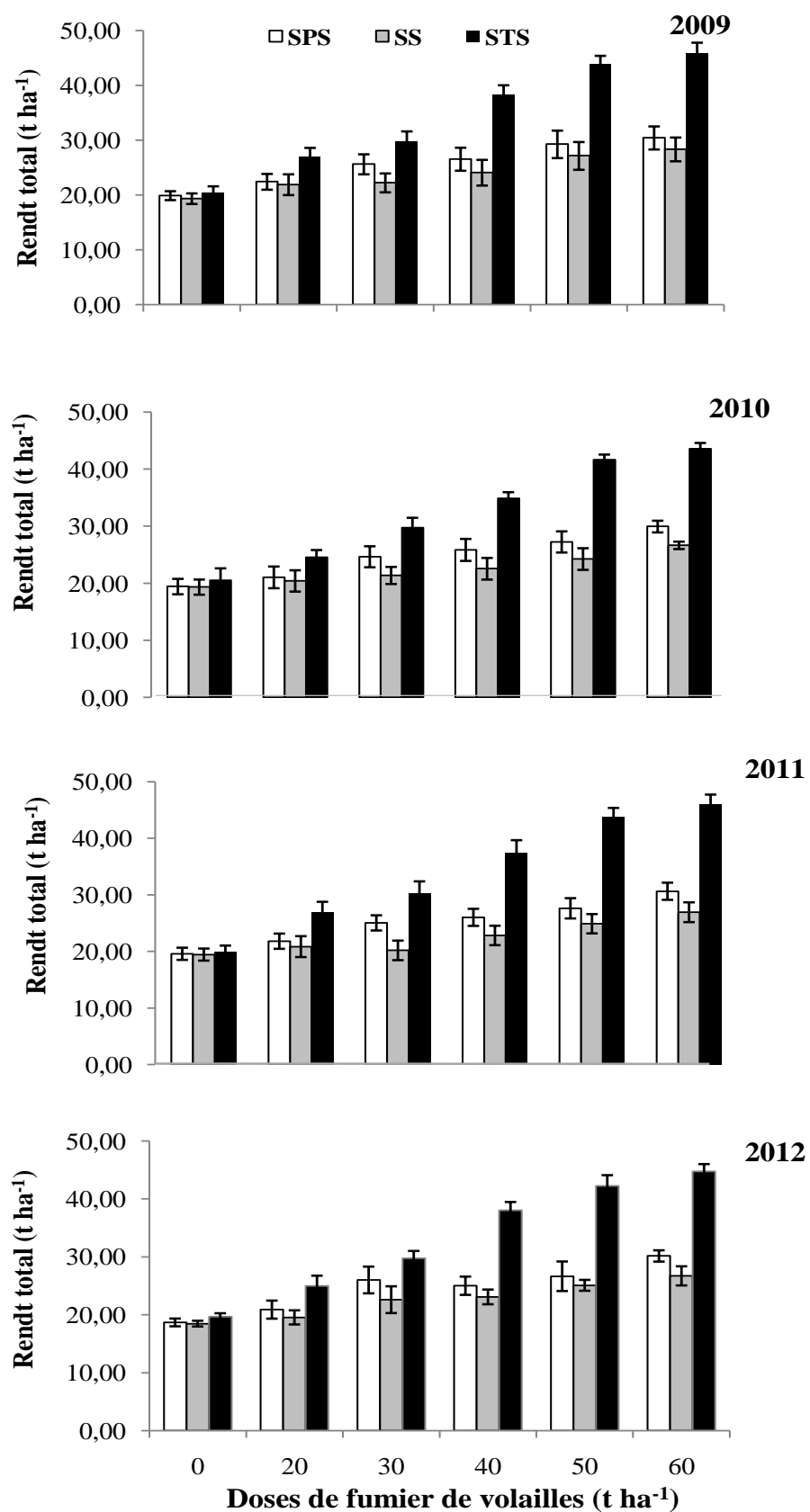


Figure 9. Effet des doses de FV et des niveaux de la salinité du sol sur le rendement total t ha⁻¹ au niveau des trois sites expérimentaux durant les quatre années de l'essai

1.2.6. Discussion générale

L'application du fumier de volailles au sol dans les conditions hyperarides de la région saharienne induit une forte amélioration des paramètres de rendement de la pomme de terre par rapport au témoin, indépendamment du niveau de la salinité, au niveau des sols des sites expérimentaux.

Nos résultats sont en concordance avec ceux rapportés par Martineau et Lavoie (1996), El-Tantawy *et al.* (2009) et Kandi *et al.* (2011), qui ont démontré que les paramètres de rendement de la pomme de terre ont été significativement plus élevés dans parcelles ayant reçu le fumier de volailles (FV) par rapport à d'autres types de fumiers. Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet favorable de fumier de volailles (FV) sur l'ensemble des propriétés physiques, chimiques, et microbiologiques du sol, comme il a été déjà signalé pour les paramètres de croissance végétative (Lakhdhar *et al.* 2008 ; Jalali et Ranjbar, 2009).

L'amélioration des paramètres de rendement en réponse à l'apport de fumier de volailles, peut être due à la libération rapide et continue de nutriments (Azote, potassium, phosphore et oligo-éléments) à partir de ce fumier, ce qui a permis de satisfaire les besoins nutritionnels de la pomme de terre durant tous les stades de son cycle productif (El-Tantawy *et al.*, 2009).

Le fort potentiel de minéralisation de ce fumier est due à sa richesse en composés facilement métabolisables (Rapport C/N faible), couplé aux conditions pédoclimatiques (Températures élevées, irrigation et texture sableuse), ce qui a favorisé une forte activité microbologique et par conséquent une forte libération des éléments nutritifs de ce fumier, ce qui a coïncidé avec les fortes exigences nutritives de cette plante. Selon Oustani (2006), le fumier de volailles est un substrat organique rapidement décomposable dans les sols sableux en climat chaud et sous irrigation.

Par ailleurs, la substitution de la fumure minérale par un apport organique riche en éléments nutritifs tel est le cas du fumier de volailles peut assurer une bonne production de la pomme de terre (Darogkina, 1972). D'après Gupta *et al.* (1997), Demir *et al.* (2010) et Delago *et al.* (2012), le fumier de volailles stimule mieux la productivité des sols que d'autres engrais organiques et conduit à une augmentation considérable du carbone organique et une forte disponibilité d'éléments nutritifs.

La forte amélioration des paramètres de rendement enregistrée par la plus forte dose 60 t ha⁻¹ de fumier de volailles (FV) peut être attribuée à sa forte concentration en macro et micro nutriments par rapport aux autres doses testées. En effet, des effets semblables de l'amélioration des paramètres de rendement de la pomme de terre en conditions arides ont été signalés en réponse à l'apport croissant de fumier de volailles (Al-Moshileh et Motawei, 2007).

Ces résultats rejoignent également ceux de Pannikov et Mineev (1977), qui ont montré que l'augmentation de l'apport organique appliqué au sol conduit à une augmentation significative des paramètres de rendement jusqu'au seuil de 100 t ha⁻¹.

Concernant l'effet de la salinité sur les paramètres de rendement, contrairement à plusieurs études indiquant que la salinité du sol et/ou celle de l'eau d'irrigation retarde la croissance des plantes et réduit de manière significative le rendement des tubercules de pomme de terre (Levy, 1992 ; Maas et Hoffman, 1977; Levy et Veilleux, 2007), dans notre étude les meilleurs paramètres de rendement de la pomme de terre ont été enregistrés dans le sol très salé (STS) malgré les fortes concentration en sels dans le sol et dans l'eau d'irrigation .

Ces résultats vont dans le même sens que ceux enregistrés par Hannachi *et al.* (2004), qui ont affirmé dans des travaux précédents la tolérance de la pomme de terre à la salinité, et que les plantes irriguées avec une eau contenant 4g l⁻¹ de NaCl peuvent avoir des performances agronomiques presque similaires (Nombre de tubercules plante⁻¹, rendement des tubercules plant⁻¹ etc.) ou même meilleures comparées à celles obtenues par des plantes non soumises à l'effet de l'excès de sel et irriguées avec une eau non saline.

Quant à l'effet de l'année sur les paramètres de rendement, les différences significatives observées pour les paramètres de rendement entre années, ne sont pas dues aux facteurs climatiques étant donné les faibles variations météorologiques enregistrées entre les quatre années de l'essai, mais probablement à la différence de la composition du fumier utilisé durant les quatre années

Quant à l'effet de l'interaction (Salinité × Dose fumier) sur les paramètres de rendement, les résultats obtenus montrent que l'apport des doses croissantes de fumier conduit à une augmentation significative de ces paramètres (Tableau 6). L'application du fumier de volailles diminue les effets néfastes de la salinité sur le rendement de la pomme de terre. En fait, pour les trois sites, l'apport de fumier semble avoir masqué l'effet de la salinité.

Nos résultats confirment ceux rapportés par Skiredj (2007) qui a montré que sous les conditions salines, la fertilisation organique permet d'augmenter les paramètres de rendement de la pomme de terre. D'après cet auteur, lorsque la CE augmente à 7.2 dS m^{-1} , le rendement de pomme de terre n'est pas pénalisé à plus de 50 % de sa valeur en conditions non salines, mais, contrairement, à la théorie de Ayers et Westcot (1976), il semble être comparable aux rendements obtenus dans les conditions non salines.

D'après Hannachi *et al.* (2004) et Al-Moshileh et Motawei (2007), l'accroissement de la fertilisation organique augmente la tolérance de la pomme de terre aux fortes concentrations des sels au niveau du sol et de l'eau d'irrigation. Ceci peut être expliqué par le fait que l'apport organique sous forme de fumier de volailles en dehors de sa richesse en éléments nutritifs, a provoqué l'abaissement des principaux paramètres de la salinité. Cette observation a été faite par Jalali et Ranjbar (2009), où il a été souligné que l'application de la matière organique aux sols salés réduit les principaux paramètres de la salinité à savoir, le pH, la CE, le SAR et l'ESP.

Par ailleurs, la matière organique s'avère d'une grande efficacité dans l'inhibition des effets de la salinité en favorisant le lessivage des sels en excès et en augmentant la résistance des plantes aux sels (Benabadji et Halitim, 1978). En outre, Qadir *et al.* (2008), Walker et Bernal (2008) et Kahlon *et al.*, (2012) ont rapporté que l'accélération de lessivage Na^+ diminue considérablement l'ESP et la CE.

L'interprétation des résultats des paramètres de rendement montre que les meilleurs rendements ont été obtenus, non pas avec le faible niveau de salinité présenté par le site peu salé (SPS), comme de nombreux travaux ont signalé (Hamdy, 2002 ; Aboul majed *et al.*, 2008 ; Ould Ahmed *et al.* 2010), mais avec la combinaison du sol le plus salé avec la plus forte dose de l'apport organique (FV) ($\text{STS} \times 60 \text{ t ha}^{-1}$ de FV). Par ailleurs, le test de classement des moyennes a montré que le site 3 correspondant au sol très salé (STS) a été classé au premier rang des paramètres de rendement, malgré la plus forte salinité de d'eau et du sol au niveau de ce site.

Ainsi, contrairement à Ould Ahmed *et al.* (2010), qui ont indiqué que le fumier de volailles ne doit pas être recommandé en tant que fertilisant organique en conditions d'irrigation avec des eaux salines, car il accentue la salinité du sol. Dans notre cas, les meilleurs rendements ont été obtenus par la plus forte dose de fumier de volailles (FV).

Au regard à l'effet de l'interaction des trois facteurs (Salinité, dose fumier (FV) et année) sur le rendement total $t\ ha^{-1}$, l'ANOVA n'a indiqué aucune différence significative entre traitements. En fait, les essais au cours des quatre années ont été réalisés dans les mêmes conditions expérimentales (Conditions naturelles de terrain et de la conduite de l'essai).

En outre, il n'y avait pas de différences significatives dans les conditions météorologiques pendant le cycle de développement de la plante au cours de la période d'étude, malgré que ces conditions paraissent moins agressives pour l'année 2009. Ces similitudes notamment climatiques et édaphiques (mis à part la salinité) ont conduit probablement au même potentiel de minéralisation du fumier de volailles apporté au cours des quatre années de l'essai.

L'apport organique, quelle que soit la dose appliquée au sol au niveau des trois sites, a probablement masqué les différences de degré de salinité entre ces sites en donnant des rendements totaux presque similaires entre les quatre années.

La matrice de corrélation de Pearson mentionnée dans le tableau 7 (Annexe III) affiche des corrélations positives et significatives entre les variables de la croissance végétative et celles du rendement étudiées :

- Une corrélation positive et significative a été enregistrée entre le rendement total et la surface foliaire ($r = 0.86 ***$).
- Une corrélation positive et significative a été enregistrée entre la surface foliaire et le nombre de tubercules par plant⁻¹ ($r = 0.71 ***$).
- Une corrélation positive et significative a été enregistrée entre le rendement total et la biomasse aérienne et racinaire avec des coefficients de corrélations de ($r = 0.85***$) et ($r = 0.83***$) respectivement.

2. Effet de la salinité, doses de fumier de volailles (FV), année et de leur interaction sur l'état nutritionnel de la pomme de terre

Les effets des facteurs étudiés (Salinité, doses de fumier de volailles (FV) et année) et de leur interaction sur l'état nutritionnel de la pomme de terre durant les quatre années de l'essai au niveau des feuilles et des racines sont présentés dans le tableau 7 (a, b et c).

2.1. Effet des doses de fumier (FV) sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en éléments minéraux

Les résultats illustrés dans le tableau 7 (a, b) révèlent que l'apport croissant de fumier de volailles augmente significativement les teneurs des feuilles et des racines de la pomme de terre en N, K⁺, P, Ca⁺⁺ et NO₃⁻ ($P < 0.001$). Les teneurs foliaires en ces éléments nutritifs tendent à augmenter de 17.56, 15.77, 1.84, 8.58 et 4.45 mg g⁻¹ à 56.79, 54.63, 5.76, 16.96 et 19.22 mg g⁻¹ respectivement, lorsque la dose de fumier de volailles passe de 0 à 60 t ha⁻¹.

Avec la même tendance, les teneurs racinaires en N, K⁺, P, Ca⁺⁺ et NO₃⁻ tendent à augmenter respectivement de 16.34, 15.02, 1.79, 10.31 et 4.22 mg g⁻¹ MS à 55.82, 52.77, 5.52, 18.42 et 18.92 mg g⁻¹ MS, lorsque l'apport de fumier de volailles passe de 0 à 60 t ha⁻¹ (Tableau 7.b).

Les résultats obtenus montrent que les éléments nutritifs augmentent proportionnellement à l'apport croissant de fumier de volailles (FV). Ainsi, les meilleurs contenus foliaires et racinaires en Azote (N), Potassium (K), Phosphore (P) et nitrates (NO₃⁻) ont été enregistrés par la dose de 60 t ha⁻¹.

En revanche, une tendance inverse a été observée pour les teneurs des feuilles et des racines en Na⁺ et Cl⁻. Les teneurs les plus élevées en ces éléments ont été observées par les faibles doses de fumier de volailles (FV).

En effet, les teneurs foliaires les plus élevées en Na⁺ et Cl⁻ ont été enregistrées par les doses (30 et 20 t ha⁻¹) respectivement pour le Na⁺ et Cl⁻ avec une teneur moyenne de 3.25 et 3.18 mg g⁻¹ MS, tandis que, les plus faibles ont été enregistrées dans les feuilles des plantes traitées avec la dose 60 t ha⁻¹ avec des valeurs de 2.04 et 2.95 mg g⁻¹ MS respectivement pour Na⁺ et Cl⁻ (Tableau 7, a).

Le taux de réduction de la teneur foliaire en Na⁺ et Cl⁻ au niveau de la dose 60 t ha⁻¹ par rapport à la dose 30 et 20 t ha⁻¹ est de 37.23 et 7.23 % respectivement pour les deux éléments, alors qu'il est de 32.22 et 6.34 % par rapport au témoin.

Quant aux taux de réduction de la teneur racinaire en Na⁺ et Cl⁻ au niveau de la dose 60 t ha⁻¹ par rapport à la dose 30 et 20 t ha⁻¹ est de 35.39 et 6.48% respectivement pour le Na⁺ et le Cl⁻, tandis qu'il est de 30.25 et 6 % par rapport au témoin.

Il est à signaler que, les résultats obtenus enregistrent une tendance d'évolution comparable entre les teneurs en Cl^- et en Na^+ , aussi bien dans les feuilles que dans les racines.

2.2. Effet de la salinité sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en éléments minéraux

En ce qui concerne l'effet de la salinité sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en éléments minéraux, l'analyse de la variance a révélé un effet significatif ($P < 0.001$) (Tableau 7. a, b) sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en N, K^+ , Ca^{++} et en NO_3^- .

Les teneurs foliaires les plus élevées en ces éléments ont été obtenues au niveau du sol très salé (STS), soient, 45.71, 47.04, 15.3 et 12.3 mg g^{-1} MS respectivement pour N, K^+ , Ca^{++} et NO_3^- , alors que les teneurs racinaires les plus élevées sont de 44.88, 44.97, 17.95 et 11.81 mg g^{-1} MS, respectivement pour les quatre éléments.

En revanche, les plus faibles teneurs en N, K^+ et NO_3^- ont été enregistrées dans le sol salé (SS) avec respectivement des teneurs de 42.35, 36.96 et 10.58 mg g^{-1} de MS (Feuilles), et 41.05, 35.44 et 10.05 mg g^{-1} MS (Racines), respectivement pour les trois éléments.

Quant au sol peu salé (SPS), les teneurs sont de 43.4, 37.53 et 10.93 mg g^{-1} MS pour N et K^+ et NO_3^- au niveau des feuilles et 42.16, 36.19, 15.69, et 10.62 mg g^{-1} MS au niveau des racines respectivement pour les trois éléments (Tableau 7 a,b).

Les résultats obtenus montrent que le sol peu salé (SPS) est situé en dernière position pour la teneur foliaire en Calcium (11.82 mg g^{-1} MS), alors qu'au niveau des racines, la répartition de cet élément entre les deux organes suit la même tendance observée par les autres éléments.

Paradoxalement aux effets des différentes doses de fumier de volailles sur les contenus foliaires en N, K^+ , NO_3^- et Ca^{++} , qui ont montré des différences significatives entre traitements, la salinité n'a montré aucun effet significatif sur la teneur foliaire et racinaire en phosphore (Tableau 7 a , b). Néanmoins, il est bien évident que les teneurs les plus élevées en cet élément ont été observées au niveau du sol peu salé (SPS) avec des valeurs de 3.96 et 3.63 mg g^{-1} MS, respectivement au niveau des feuilles et des racines.

Les teneurs les plus élevées des feuilles en Na^+ et Cl^- ont été enregistrées au niveau du sol salé (SS), soit 3.26 et 3.37 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$, respectivement. Les plus faibles teneurs ont été observées au niveau du sol peu salé (SPS) avec des teneurs de 2.08 et 2.83 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$ respectivement pour les deux éléments. Le sol très salé (STS) est classé en position intermédiaire entre les deux sols en enregistrant des teneurs de 2.99 et 2.95 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$ respectivement pour les deux éléments.

Le test de classement des moyennes a montré que le premier groupe **(a)** est occupé par le sol salé (SS), suivi par le groupe **(b)** présenté par le sol très salé (STS) et enfin le dernier groupe **(c)** présenté par le sol peu salé (SPS).

Les teneurs racinaires en Na^+ et Cl^- , quoique plus élevées que celles enregistrées au niveau des feuilles, elles suivent presque la même tendance. Les teneurs les plus élevées en ces éléments ont été enregistrées au niveau du sol salé (SS), soient des teneurs de 3.38 et 3.43 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$.

Les plus faibles ont été observées au niveau du sol peu salé (SPS) avec des teneurs de 2.22 et 2.86 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$. Le sol très salé (STS) s'est classé en position intermédiaire, en enregistrant des teneurs de 3.14 et 3.07 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$ respectivement pour les deux éléments.

2.3. Effet de l'année sur la teneur des feuilles et racines en éléments minéraux

L'analyse statistique relative à la variation interannuelle de la teneur de pomme de terre en éléments nutritifs n'a été significative que pour la teneur foliaire et racinaire en N et K^+ , Na^+ et Cl^- . Cependant, aucune variation significative entre les quatre années de l'étude n'a été signalée pour les teneurs de ces deux organes en P, Ca^{++} et NO_3^- .

La meilleure teneur foliaire en N a été enregistrée durant l'année 2012, soit une teneur de 44.6 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$, alors qu'au niveau des racines, la meilleure teneur en cet élément a été en faveur de l'année 2011 avec une teneur de 43.59 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$.

Le test de classement des moyennes pour la teneur en azote a indiqué quatre groupes homogènes dont le classement des années est dans l'ordre suivant: **(a)** 2012 > **(ab)** (2011) > **(b)** (2009) > **(c)** (2010) au niveau des feuilles, alors qu'au niveau des racines seulement deux groupes homogènes ont été déterminés, où les trois années 2009, 2010 et 2011 ont occupé la première position présentée par le groupe **(a)**, suivi par le groupe **(b)** où figure l'année 2010.

Les résultats obtenus montrent que l'année 2009 a enregistré la meilleure teneur en potassium (K), soit une teneur de 43.22 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et 42.41 mg g⁻¹ MS (Racines). Le test de classement des moyennes pour la teneur en potassium (K) au niveau des deux organes de la plante est dans l'ordre croissant suivant : **a** (2009) > **b** (2011 = 2012) > **c** (2010).

Quant à la teneur en Na⁺ et Cl⁻, il est clair d'après les résultats obtenus que les teneurs les plus élevées en ces éléments ont été enregistrées au cours de l'année 2010, soient, 2.91 et 3.10 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et 3.15 et 3.20 mg g⁻¹ MS (Racines) respectivement pour les deux éléments.

L'analyse statistique, quant elle, a décelé deux groupes homogènes bien distincts pour ces deux éléments suivant le même ordre : le groupe (**a**) (2010) > le groupe (**b**) (2009 = 2011 = 2012) pour le sodium, et le groupe (**a**) (2010 = 2011) > (**b**) (2009 = 2012) pour le chlore.

Il est à mentionner que pour les trois facteurs étudiés individuellement, les teneurs en N, K⁺ et NO₃⁻ sont toujours en faveur des feuilles, alors que les racines se chargent plus en Ca⁺⁺, Na⁺ et Cl⁻.

En revanche, les teneurs en phosphore ne semblent pas varier significativement entre les deux organes de la plante durant les quatre années de l'essai.

2.4. Effets de l'interaction de la salinité, dose de fumier (FV) et année sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en éléments minéraux

➤ Interaction (Salinité × Année)

Les résultats présentés dans le tableau 7 (a, b) révèlent une variation significative de la teneur foliaire en N, Ca⁺⁺, Na⁺ et Cl⁻ entre les trois sites au cours des quatre années de l'essai. Les éléments K⁺, P et NO₃⁻ n'ont montré aucune différence significative pour cette interaction. Quant aux teneurs racinaires, l'analyse statistique a décelé des différences significatives sous l'effet de la salinité entre les quatre années de l'étude pour les quatre éléments (K⁺, Ca⁺⁺, Na⁺ et Cl⁻) de l'ensemble des sept éléments analysés (Tableau 7 a,b , Fig. 10).

Les résultats obtenus montrent que seulement les teneurs en phosphore ne semblent pas varier significativement entre les deux organes de la plante, ni en fonction des années, ni en fonction de la salinité ni en fonction de leur interaction. Seules des variations significatives ont été mises en évidence entre les différentes doses de fumier de volailles.

Concernant la teneur foliaire la plus élevée et la plus faible en Azote (N), elles ont été enregistrées au niveau de l'interaction (STS × Année (2009, 2012) et (SS × Année 2010), soient, 46.22 et 41.08 mg g⁻¹ MS respectivement pour les deux interactions. Toutefois, la teneur racinaire la plus élevée et la plus faible en cet élément, ont été enregistrées au niveau des interactions (STS × Année 2009) et (SS × Année 2010) respectivement, soient, 45.29 et 39.77 mg g⁻¹ MS.

Pour le potassium, la teneur foliaire la plus élevée a été obtenue au niveau du traitement (STS × Année (2009) (49.52 mg g⁻¹MS), alors que la plus faible a été enregistrée par l'interaction (SS × Année 2010) avec une teneur de 34.98 mg g⁻¹. Au niveau des racines, la teneur la plus élevée en cet élément a été enregistrée au niveau du traitement (STS × Année 2009) avec une valeur de 48.6 mg g⁻¹.

La plus faible teneur racinaire a été obtenue au niveau du traitement (SS × Année 2010) avec une valeur de 33.19 mg g⁻¹ MS.

La teneur foliaire la plus élevée en phosphore a été enregistrée au niveau du traitement (SS × Année 2009) avec une teneur de 4.04 mg g⁻¹MS. En revanche, la plus faible a été obtenue par le traitement (SS × 2012), soit une teneur de 3.85 mg g⁻¹MS. Le meilleur contenu racinaire en phosphore a été enregistré au niveau du traitement (SPS × Année 2011), soit une teneur de 3.71 mg g⁻¹ MS. Par contre, la plus faible teneur racinaire en cet élément a été observée au niveau du traitement (STS × Année 2010) avec une valeur de 3.54 mg g⁻¹ MS.

Concernant la teneur foliaire la plus élevée et la plus faible en calcium (Ca⁺⁺), elles ont été enregistrées au niveau de l'interaction (STS × Année 2012) et (SPS × Année 2012), soient des teneurs de 15.82 et 11.52 mg g⁻¹ MS respectivement pour les deux interactions. Toutefois, la teneur racinaire la plus élevée et la plus faible ont été enregistrées au niveau des interactions (STS × Année 2010) et (SPS × Année 2010) respectivement, soient des teneurs de 18.37 et 12.49 mg g⁻¹ MS.

La teneur foliaire la plus élevée en nitrates (NO₃⁻) a été enregistrée au niveau du traitement (STS × année 2011) (12.6 mg g⁻¹ MS), alors que la plus faible a été observée au niveau du traitement (SS × Année 2010) (10.46 mg g⁻¹ MS). La teneur racinaire, la plus élevée en cet élément (11.9 mg g⁻¹ MS) a été enregistrée par le traitement (STS × Année 2012) et la plus faible (9.99 mg g⁻¹ MS) au niveau de l'interaction (SS × Année 2011).

La teneur la plus élevée et la plus faible en chlore (Cl^-) ont été enregistrées par les mêmes traitements (SS \times Année 2010) et (STS \times Année 2009/2012), soient des teneurs de 3.48 et 2.72 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$ (Feuilles) et de 3.55 et 2.83 mg g^{-1} (Racines), respectivement pour les deux interactions.

Pour le sodium, la teneur foliaire la plus élevée a été obtenue au niveau du traitement (STS \times Année 2009) avec une teneur de 3.22 mg g^{-1} MS. La plus faible teneur a été enregistrée au niveau de l'interaction (SPS \times Année 2012) avec une teneur de 2.01 mg g^{-1} . La teneur racinaire la plus élevée en cet élément a été enregistrée au niveau du traitement (SS \times année 2010) (3.68 $\text{mg g}^{-1}\text{MS}$), alors que, la plus faible teneur a été obtenue au niveau du traitement (SPS \times Année 2011) (2.09 mg g^{-1} MS).

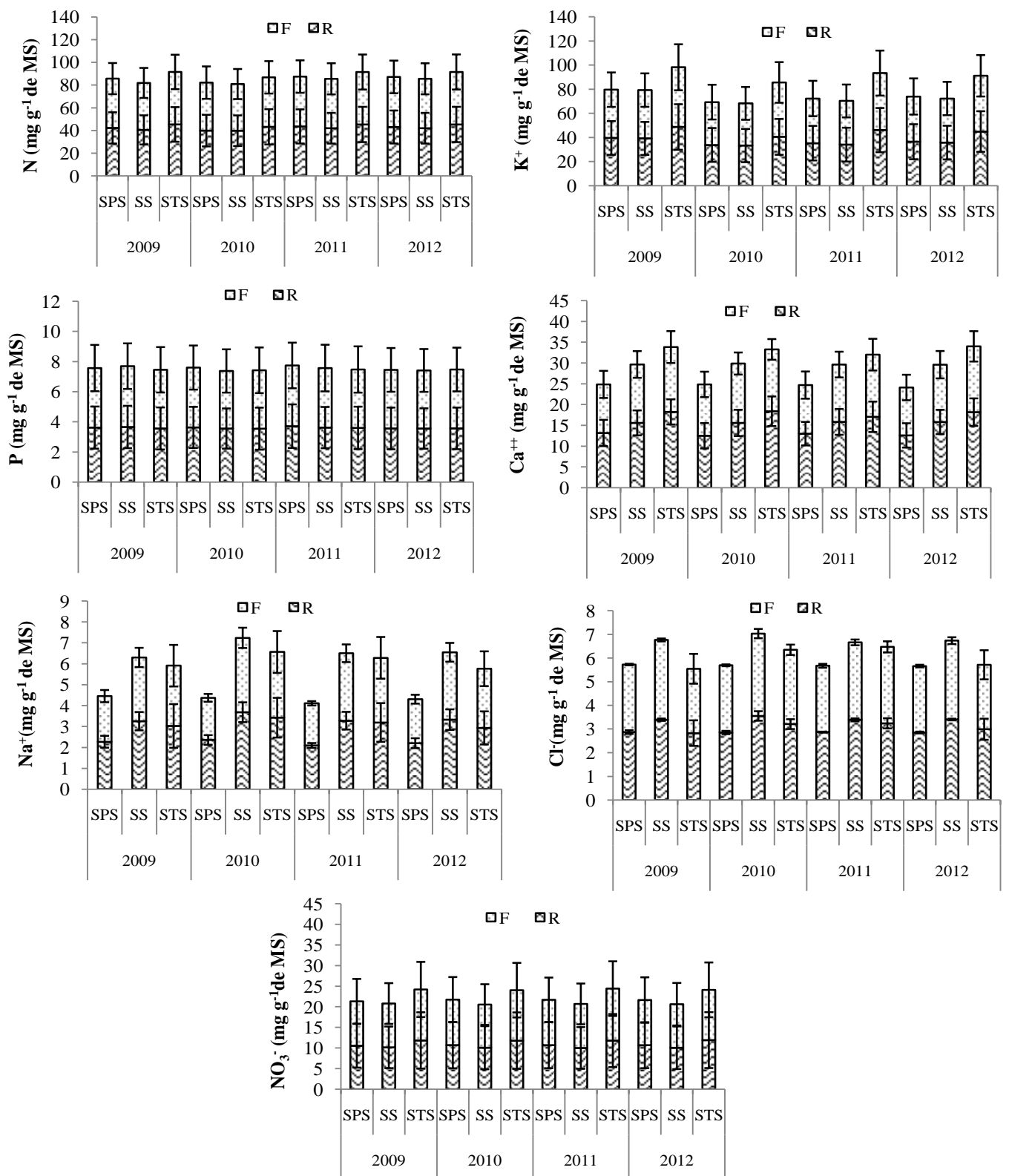


Figure 10. Effet de la salinité sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en Azote (N), Potassium (K), Phosphore (P), Calcium (Ca⁺⁺), Sodium (Na⁺), Nitrates (NO₃⁻), Chlorures (Cl⁻) (en mg g⁻¹ de MS) durant les quatre années de l'essai

➤ Interaction (Doses fumier volailles (FV) × Année)

Les résultats présentés dans le tableau 7 (a,b) ont révélé que les teneurs foliaires de la pomme de terre en éléments minéraux ont été statistiquement affectées par l'interaction (Dose fumier (FV) × Année). La variation de la teneur en N, K⁺, P, Ca⁺⁺, Na⁺, Cl et NO₃⁻ au niveau des feuilles et des racines en fonction des différentes doses de fumier de volailles au cours des quatre années de l'essai est présentée dans la figure 11.

À l'échelle des quatre années de l'étude, toutes les doses de fumier de volailles (FV) ont montré des concentrations significativement plus élevées en N, P, K⁺, Ca⁺⁺ et NO₃⁻ par rapport au témoin. En plus, les teneurs en ces éléments augmentent avec l'apport croissant de fumier de volailles (FV) au niveau des deux organes de la plante (Feuilles et racines).

Les teneurs en éléments nutritifs montrent une variation significative entre les doses de fumier de volailles (FV) (Tableau 7 a,b) . Les plus grandes fluctuations pour les teneurs foliaires ont été observées pour les éléments N, K⁺, Ca⁺⁺ et Cl⁻, alors que le Na⁺ et NO₃⁻ n'ont indiqué qu'une faible variation entre les doses.

En revanche, les teneurs racinaires ont montré des différences significatives seulement pour les N, K⁺ et Cl⁻. Pour le reste des éléments analysés, l'ANOVA n'a montré aucune différence significative pour l'interaction (Dose fumier (FV) × Année). Il est à signaler, qu'à l'échelle des quatre années de l'essai, une relative stabilité a caractérisé la teneur foliaire et racinaire en phosphore.

La teneur foliaire la plus élevée en azote (N) a été enregistrée au niveau du traitement (60 t ha⁻¹ × Année 2011 et 2012) (57.02 mg g⁻¹MS), et la plus faible au niveau du traitement (0 t ha⁻¹ × Année 2010) (17.29 mg g⁻¹ MS). La teneur racinaire la plus élevée en azote est de 57.15 mg g⁻¹ MS enregistrée au niveau du traitement (60 t ha⁻¹ × année 2011), et la plus faible est de 15.15 mg g⁻¹ MS enregistrée au niveau du traitement (0 t ha⁻¹ × Année 2010).

Pour le potassium (K), la teneur foliaire la plus élevée et la plus faible ont été enregistrées au niveau des traitements (60 t ha⁻¹ × 2009) et (0 t ha⁻¹ × Année 2011/2012) avec des valeurs respectives de 55.77 et 15.69 mg g⁻¹ MS. Tandis que, les teneurs racinaires, la plus élevée et la plus faible, ont été observées au niveau des traitements (60 t ha⁻¹ × Année 2009) et (0 t ha⁻¹ × Année 2010) avec des valeurs respectives de 55.08 et 14.39 mg g⁻¹ MS.

Les teneurs foliaires, la plus élevée et la plus faible en calcium (Ca^{++}), ont été enregistrées au niveau de l'interaction ($60 \text{ t ha}^{-1} \times 2012$) et ($0 \text{ t ha}^{-1} \times 2012$) avec des valeurs de 17.13 et 8.18 mg g^{-1} MS respectivement pour les deux interactions. Cependant, les teneurs racinaires, la plus élevée et la plus faible, ont été enregistrées au niveau des interactions ($60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2011}$) et ($0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2010}$) respectivement avec des valeurs de 18.65 et 9.96 mg g^{-1} MS.

Quant aux teneurs en phosphore, les teneurs foliaires, la plus élevée et la plus faible, ont été enregistrées au niveau des traitements : ($60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2012}$) et ($60 \text{ t ha}^{-1} \times 2012$) avec des teneurs de 5.86 et 1.78 mg g^{-1} MS respectivement pour les deux interactions. En revanche, les teneurs racinaires, la plus élevée et la plus faible, ont été observées au niveau des deux traitements ($60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2011}$) et ($0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009 et 2012}$) avec des valeurs respectives de 5.6 et 1.76 mg g^{-1} MS.

Pour les nitrates (NO_3^-), la teneur foliaire la plus élevée a été obtenue au niveau du traitement ($60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009}$) avec une valeur de 19.42 mg g^{-1} MS. La plus faible a été enregistrée au niveau de l'interaction ($0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009}$) avec une teneur de 4.52 mg g^{-1} . Au niveau des racines, la teneur la plus élevée a été enregistrée au niveau de l'interaction ($60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2012}$) avec une valeur de 19.04 mg g^{-1} MS, alors que la plus faible valeur a été obtenue au niveau de l'interaction ($0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{année 2012}$) avec une teneur 4.13 mg g^{-1} MS.

Le contenu foliaire le plus élevé en chlore (Cl^-) a été enregistré au niveau du traitement ($60 \text{ ha}^{-1} \times \text{Année 2009 et 2010}$) avec une teneur de 3.2 mg g^{-1} MS, tandis que la plus faible a été enregistrée au niveau du traitement ($20 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2012}$) avec une teneur de 2.74 mg g^{-1} MS.

Quant au contenu racinaire en cet élément, la teneur la plus élevée a été enregistrée au niveau du traitement ($60 \text{ ha}^{-1} \times \text{Année 2010}$) (3.25 mg g^{-1} MS), et la plus faible (2.85 mg g^{-1} MS) au niveau du traitement ($0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009}$).

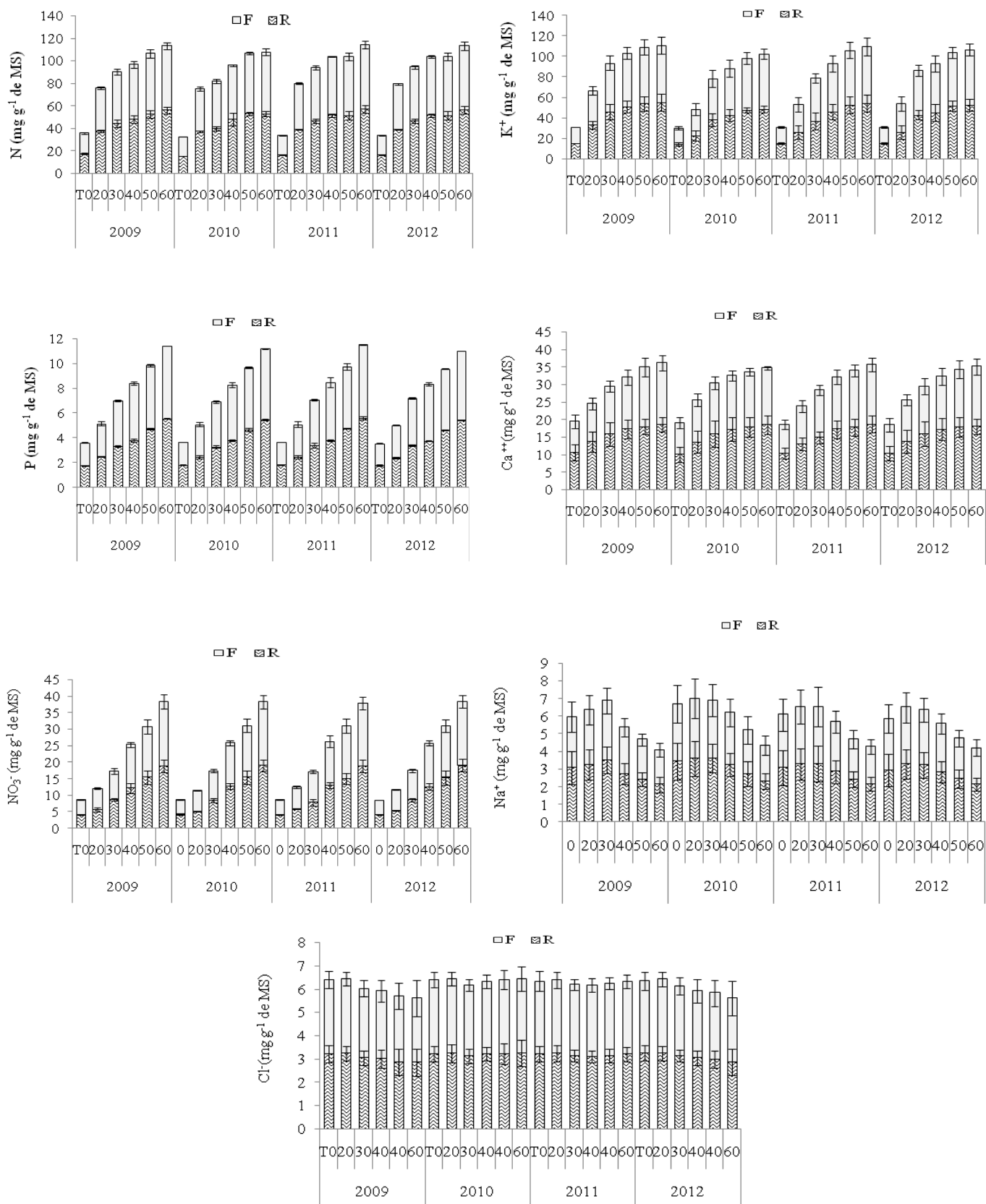


Figure 11. Effet des doses de fumier de volailles sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en Azote (N), Potassium (K), Phosphore (P), Calcium (Ca²⁺), Sodium (Na⁺), Nitrates (NO₃⁻), (Chlorures (Cl⁻)) (en mg g⁻¹ de MS) durant les quatre années de l'essai

➤ **Interaction (Doses fumier (FV) × Salinité)**

Les contenus foliaires et racinaires en N, K, NO_3^- , Ca^{++} , Na^+ et Cl^- ont été significativement ($P < 0.001$) affectés par l'effet combiné des doses de fumier de volailles et du degré de salinité au niveau des trois sites expérimentaux. Mais, aucune différence significative n'a été observée par cet effet pour les contenus foliaires et racinaires en phosphore (P) (Tableau 7a,b).

Les teneurs foliaires et racinaires les plus élevées en N, K, NO_3^- et Ca^{++} ont été enregistrées au niveau du sol très salé (STS) traité par la plus forte dose de fumier de volailles (60 t ha^{-1}).

Quant aux teneurs en Na^+ et Cl^- , les résultats obtenus montrent que ces deux éléments ont été significativement ($P < 0.001$) affectés par l'interaction (Doses (FV) × Salinité) au niveau des deux organes de la plante. Mais les teneurs les plus élevées ont été enregistrées au niveau des plants du sol très salé (STS) traité par les faibles doses de fumier de volailles (FV) (20 et 30 t ha^{-1}).

Ces résultats indiquent que le fumier de volailles (FV) n'a pas le même effet sur ces deux éléments, à chaque dose de fumier de volailles (FV) et à chaque niveau de salinité du sol.

L'influence du fumier de volailles (FV) peut être modifiée en fonction de la dose et du degré de la salinité du sol. En fait, les faibles doses de fumier de volailles (FV) augmentent les contenus foliaires et racinaires en Na^+ et en Cl^- , alors que les fortes doses tendent à les diminuer. Ces tendances doivent être prises en considération dans les programmes de fertilisation.

➤ **Interaction des trois facteurs (Salinité × Dose fumier (FV) × Année) étudiés sur la teneur des feuilles et des racines en éléments minéraux**

Les variations de la teneur foliaire et racinaire en éléments minéraux N, K^+ , P, Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et NO_3^- de la pomme de terre en fonction des effets combinés des doses de fumier de volailles (FV) et du niveau de la salinité du sol au cours des quatre années de l'essai sont illustrées par la figure 12.

L'interaction entre les trois facteurs (Salinité × Dose fumier (FV) × Année) sur les teneurs foliaires en éléments nutritifs n'a été significative que pour trois éléments de l'ensemble

des éléments analysés au niveau des deux organes de la plante (Tableau 7 a , b). Il s'agit des teneurs des feuilles et des racines en K^+ , Na^+ et Cl^- .

Généralement les concentrations foliaires et racinaires en éléments nutritifs sont présentées ci-dessous :

Les teneurs la plus élevées en azote (N) au niveau des feuilles et des racines ont été enregistrées par le traitement (STS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2012) avec les valeurs de 60.80 et 59.02 mg g⁻¹ MS respectivement. Les plus faibles teneurs foliaires et racinaires ont été obtenues par les traitements (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2011) et (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2010), soient des valeurs de 17.03 et 15.02 mg g⁻¹ MS respectivement.

Les teneurs les plus élevées en potassium (K) ont été enregistrées par le traitement (STS \times t 60 ha⁻¹ \times Année 2009) avec 65.38 et 64.87 mg g⁻¹ MS respectivement pour les feuilles et les racines. Tandis que, les plus faibles teneurs ont été obtenues par les traitements (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2010) avec 14.44 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et (SS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2010) (13 mg g⁻¹ MS) (Racines).

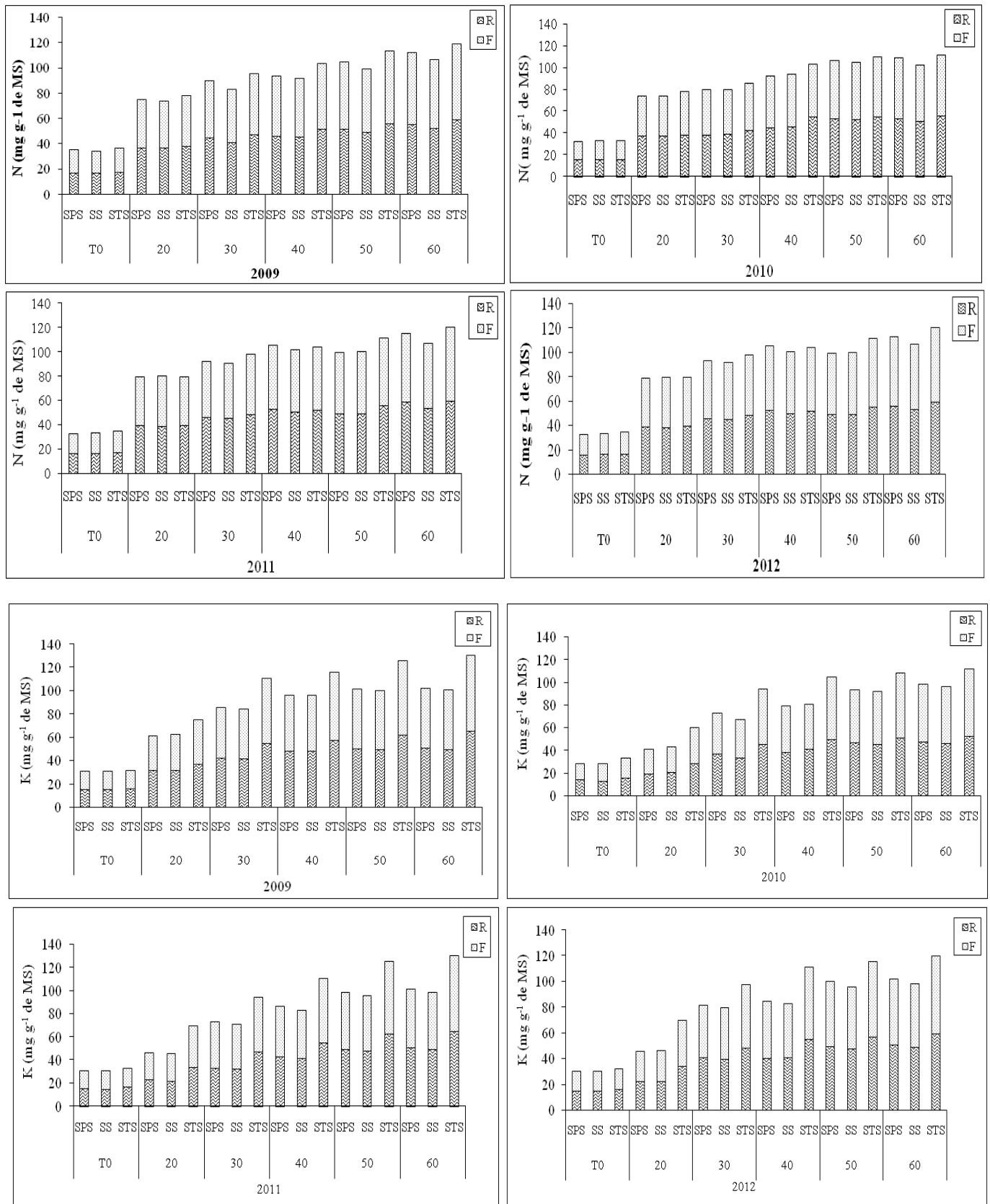
Les teneurs les plus élevées en phosphore (P) ont été enregistrées par le traitement (SPS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2009) avec 5.89 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et par le traitement (SPS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2011) avec 5.77 mg g⁻¹ MS (Racines). Les plus faibles teneurs ont été enregistrées par le traitement (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2011) avec 1.77 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et par le traitement (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2009) avec 1.75 mg g⁻¹ MS (Racines).

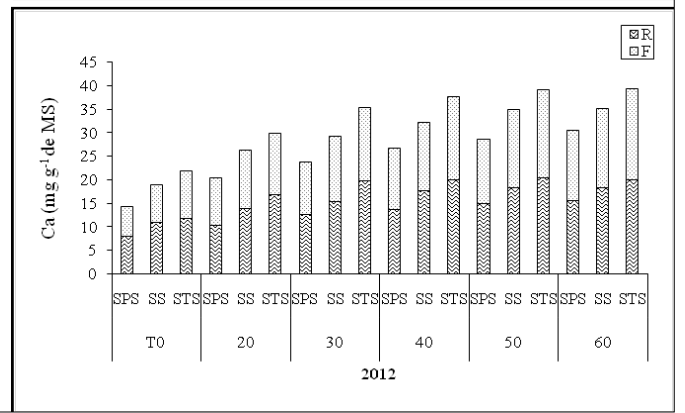
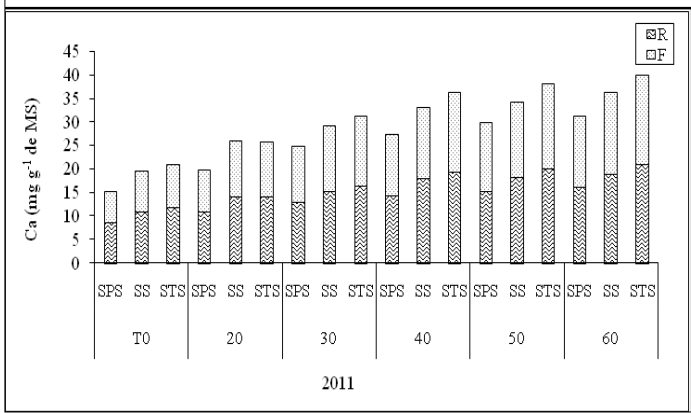
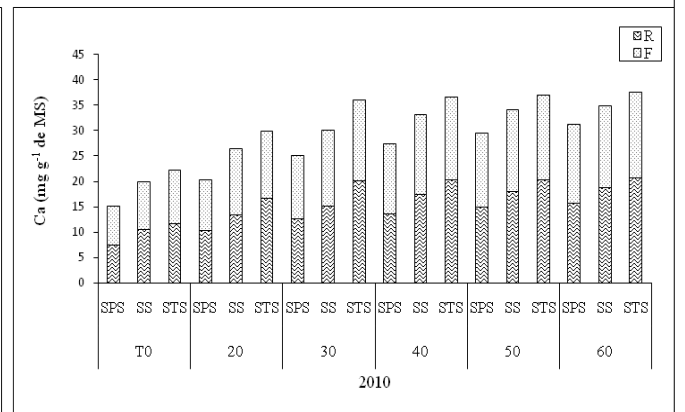
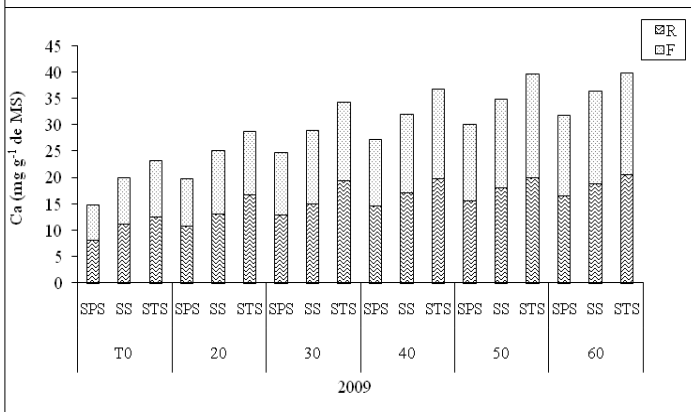
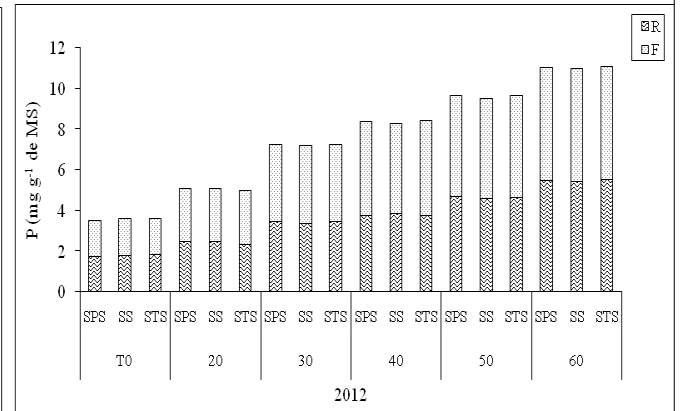
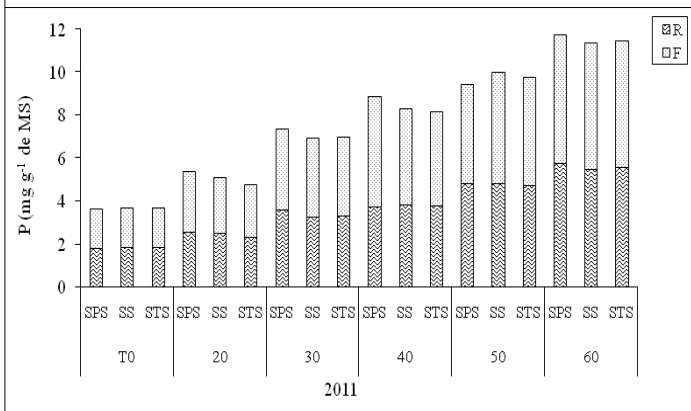
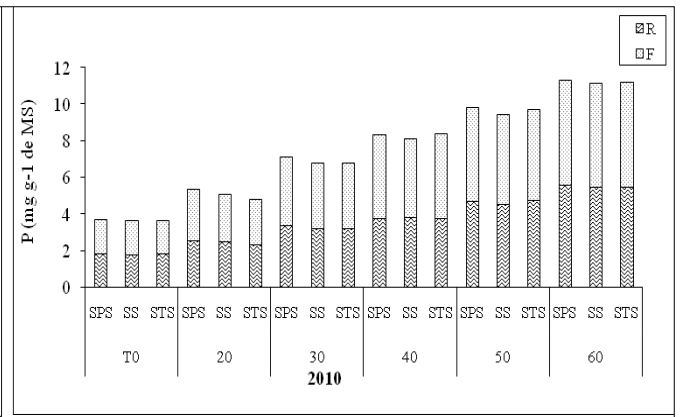
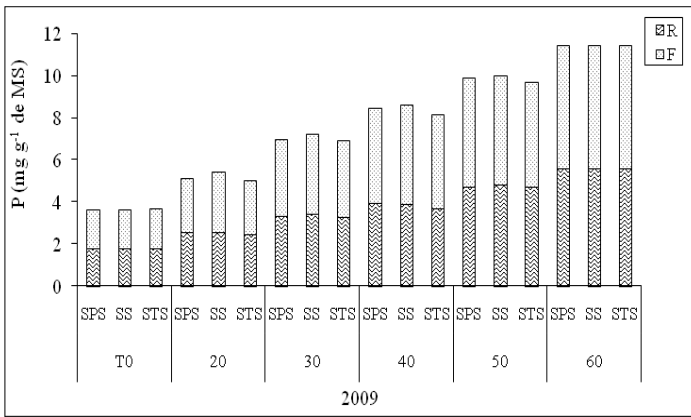
Pour le calcium (Ca^{++}), les teneurs les plus élevées ont été enregistrées par le traitement (STS \times 60 t ha⁻¹ Année \times 2012) avec 19.52 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et par le traitement (année 2011 \times STS \times 60 t ha⁻¹) avec 20.96 mg g⁻¹ MS (Racines). Quant aux plus faibles teneurs en cet élément, elles ont été enregistrées par le traitement (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2012) avec 6.34 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et par le traitement (SPS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2010) avec 7.56 mg g⁻¹ MS (Racines).

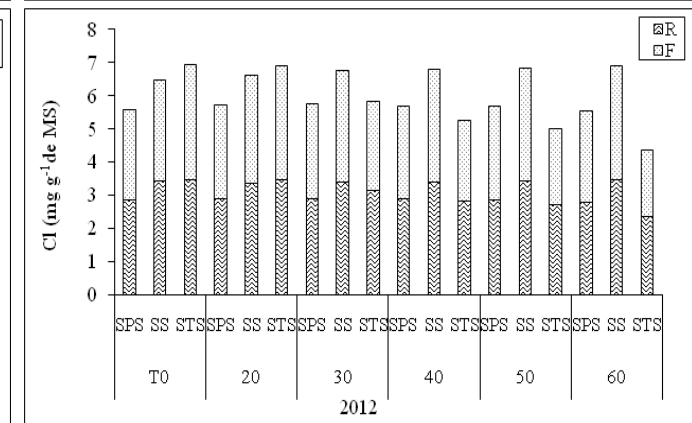
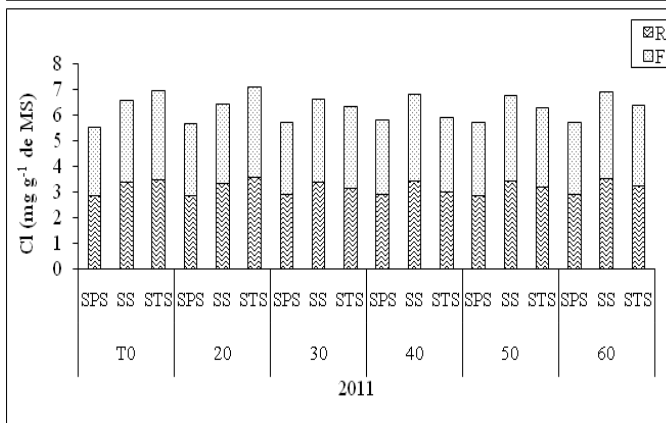
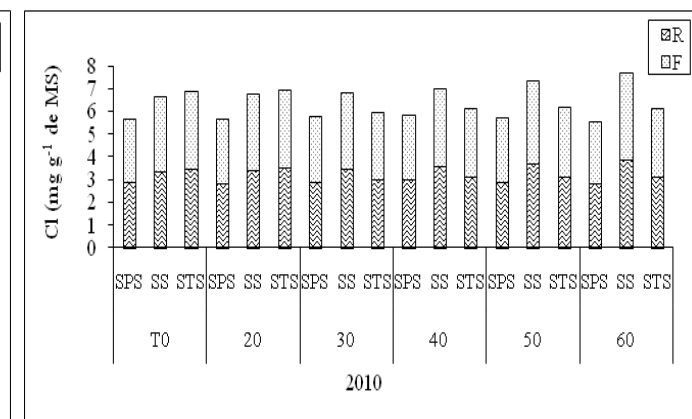
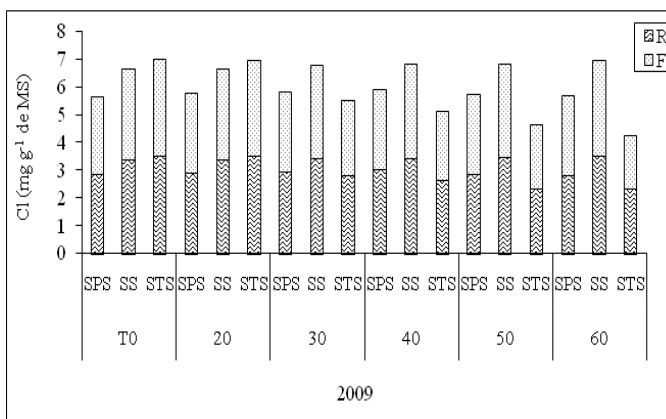
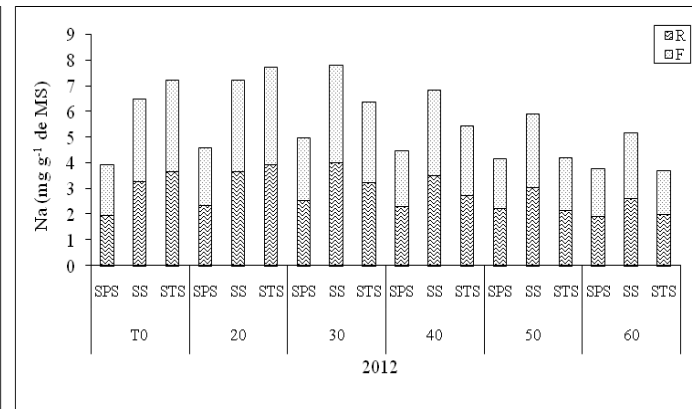
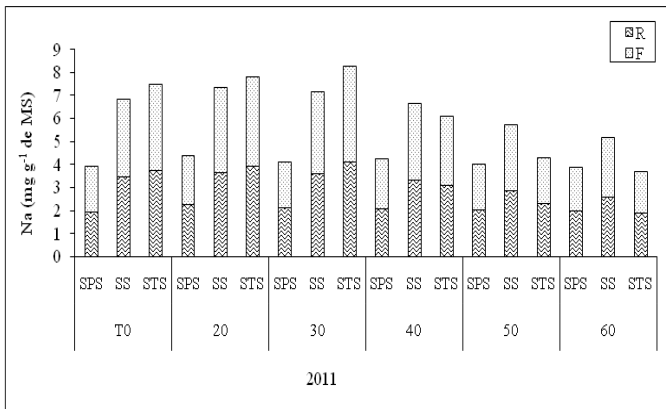
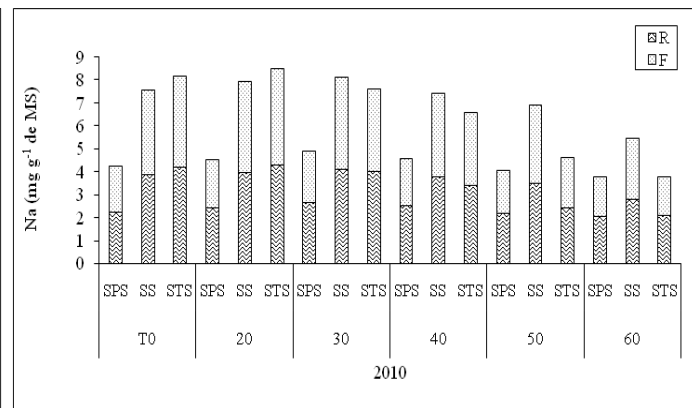
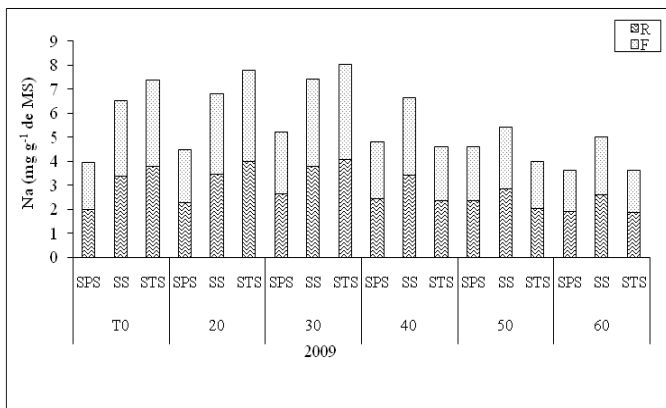
Les teneurs les plus élevées en sodium (Na^+) ont été enregistrées par le traitement (STS \times 20 t ha⁻¹ \times Année 2010) avec des teneurs de 4.20 et 4.32 mg g⁻¹ MS respectivement pour les feuilles et les racines. Les plus faibles ont été observées par le traitement (STS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2012) avec 1.7 mg g⁻¹ MS (Feuilles) et le traitement (SPS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2009) avec 1.87 mg g⁻¹ MS (Racines).

Les teneurs les plus élevées en nitrates (NO_3^-) ont été enregistrées par les traitements (STS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2009) et (STS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2012), soient des valeurs de 21.8 et 21.05 mg g⁻¹ MS mg g⁻¹ MS respectivement au niveau des feuilles et des racines. Toutefois, les plus faibles valeurs ont été observées au niveau des traitements (STS \times 0 t ha⁻¹ \times Année 2009)

et (SS × 0 t ha⁻¹ × 2009), soient des teneurs de 4.46 et 4.14 g⁻¹ MS g⁻¹ respectivement au niveau des deux organes de la plante.







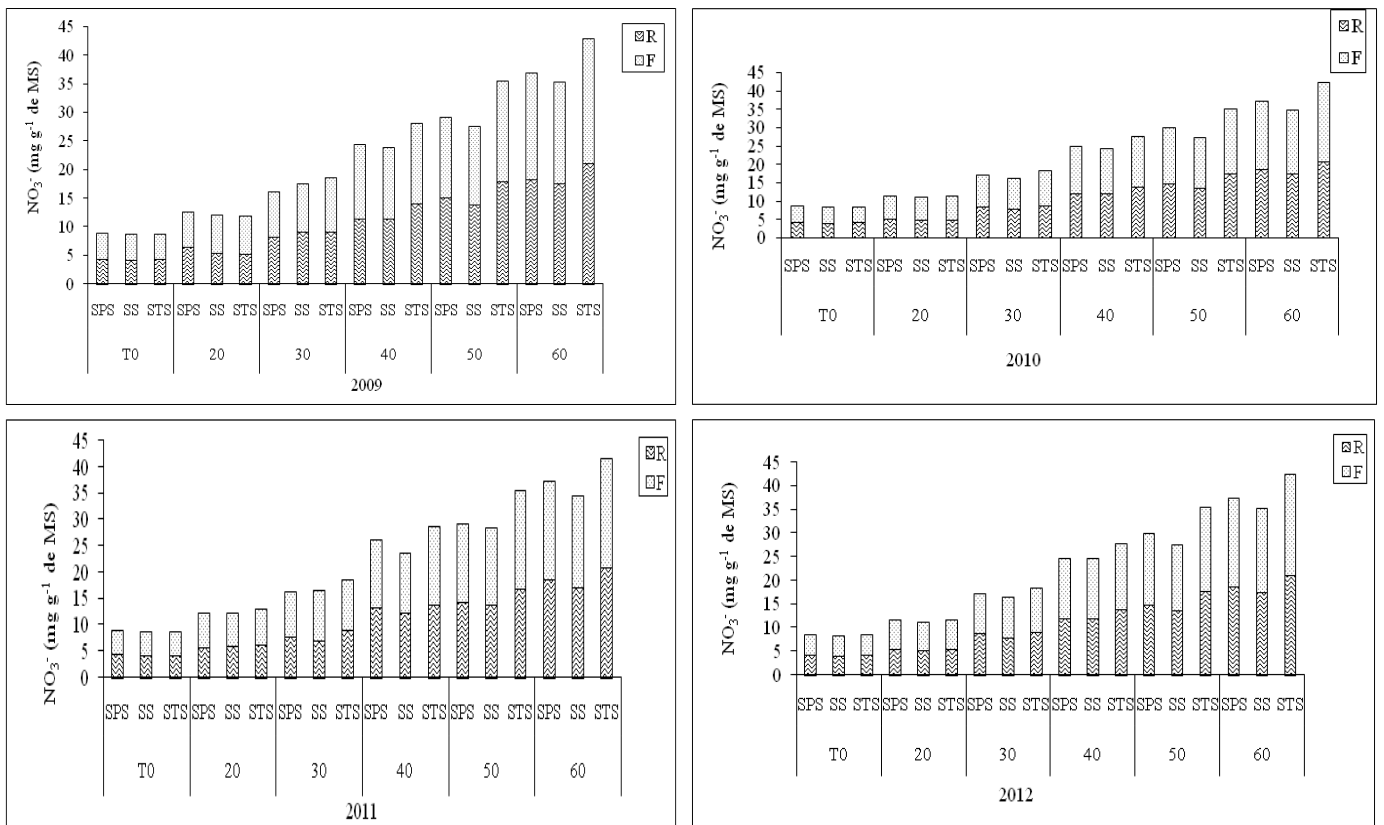


Figure 12. Effet des doses de fumier de volailles sur la teneur des feuilles et des racines de la pomme de terre en : Azote, Potassium ; Phosphore, Calcium, Sodium, Chlore et Nitrates dans les trois sites expérimentaux (mg g^{-1} de MS) durant les quatre années de l'essai

La corrélation de Pearson relative à l'état nutritionnel sous nos conditions expérimentales a mise en évidence également une :

- Une corrélation significative et négative entre la teneur en NO_3^- (Feuilles) et Na^+ (Feuilles et racines) avec ($r = - 0.54^{***}$) et ($r = - 0.52^{***}$).
- Une corrélation significative négative entre la teneur en NO_3^- et Cl^- (Feuilles) avec ($r = - 0.30^{***}$).
- Une corrélation significative négative entre la teneur en Ca^+/Na^+ (Feuilles) et Na^+ (Feuilles et racines) avec ($r = - 0.73^{***}$) et ($r = - 0.68^{***}$).
- Une corrélation négative entre le rendement total et le Na^+ et Cl^- dans les feuilles avec ($r = - 0.45^{***}$) et ($r = - 0.50^{***}$).
- Une corrélation négative entre la chlorophylle total et le sodium et le Cl dans les feuilles avec des coefficients de corrélation de respectivement ($r = - 0.31^{***}$) et ($r = - 0.45^{***}$).
- Une corrélation négative entre le phosphore et le Cl^- dans les feuilles et dans les racines avec le même coefficient de corrélation ($r = - 0.21^*$).

- Une corrélation négative entre le rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ feuilles et le sodium dans les feuilles et les racines avec $(r = -0.73^{***})$ et $(r = -0.67^{***})$ respectivement.
- Une corrélation positive entre rendement total et phosphore (Feuille) $(r = 0.66^{***})$.

2.5. Effet de la salinité, doses de fumier de volailles, année et de leur interaction sur les ratios ioniques

L'effet de la salinité, doses de fumier de volailles, année et de leur interaction sur les ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre durant les quatre années de l'étude sont présentés dans le tableau 7.c.

2.5.1. Effets des doses de fumier de volailles (FV) sur les ratios ioniques

L'augmentation de la teneur en K^+ , Ca^{++} et NO_3^- par rapport au Na^+ et au Cl^- induit une augmentation des ratios K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ dans les plantes traitées avec le fumier de volailles par rapport au contrôle, à la fois dans les feuilles et dans les racines de la pomme de terre (Tableau 7.c).

L'analyse de la variance a montré des différences significatives ($P < 0.001$) entre les doses de fumier de volailles sur l'ensemble des ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre (Tableau 7c).

Les doses croissantes de FV ont montré des ratios K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ plus élevés que le témoin. Toutefois, les ratios les plus élevés : K^+/Na^+ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ ont été enregistrés au niveau des feuilles des plantes traitées par la plus forte dose de FV (60 t ha^{-1}), soient des ratios de 26.16 et 6.88, tandis que le même ratio $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ (8.66) a été enregistré au niveau des deux organes. Les plus faibles ratios ont été enregistrés au niveau des racines des plantes non soumises à l'apport organique (0 t ha^{-1}), soient des ratios de 5.20 et 1.32 respectivement pour K^+/Na^+ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$. Par ailleurs, un ratio $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ plus élevé a été enregistré au niveau des racines (3.42) comparativement aux feuilles (2.96). Le test de classement des moyennes a dégagé six groupes homogènes pour les trois ratios étudiés au niveau des feuilles et des racines et, où chaque dose a formé un groupe à part. Le classement des moyennes suit l'ordre décroissant suivant : le groupe (a) 60 t ha^{-1} > le groupe (b) 50 t ha^{-1} > le groupe (c) 40 t ha^{-1} > le groupe (d) 30 t ha^{-1} > le groupe (e) 20 t ha^{-1} > (f) le groupe 0 t ha^{-1} .

2.5.2. Effets de la salinité sur les ratios ioniques

L'analyse statistique a indiqué des effets significatifs ($P < 0.001$) de la salinité sur les trois ratios ioniques au niveau des deux organes de la plante (Tableau 7.c). Les ratios les plus élevés ont été enregistrés au niveau du sol très salé (STS). Les valeurs correspondantes sont 19.02, 6.03 et 4.59 au niveau des feuilles, alors que, des ratios moins élevés de 17, 6.48 et 4.13 ont été observés au niveau des racines respectivement pour les trois ratios : K^+/Na^+ , Ca^{++}/Na^+ et NO_3^-/Cl^- .

Ces résultats ont été appuyés par le test de classement des moyennes, qui a révélé trois groupes homogènes pour le facteur salinité sur les ratios K^+/Na^+ et NO_3^-/Cl^- avec le même ordre de classement au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre : le groupe (a) présenté par le sol très salé (STS), suivi par le groupe (b) présenté par le sol peu salé (SPS) et en dernière position le groupe (c) présenté par le sol salé (SS). Toutefois, ce dernier a été classé en deuxième position pour le ratio Ca^{++}/Na^+ en secondant les deux sols (SPS et STS) au niveau des feuilles et le (STS) au niveau des racines.

Le sol peu salé (SPS) a occupé la deuxième position pour tous les ratios ioniques étudiés après le sol très salé (STS). Il est à noter également que pour les trois sites d'étude, les valeurs du ratio Ca^{++}/Na^+ au niveau des racines sont supérieures à celles enregistrées au niveau des feuilles de la pomme de terre.

2. 5.3. Effets de l'année sur les ratios ioniques

Les ratios ioniques ont enregistré des variations significatives entre les quatre années de l'étude ($P < 0.001$) (Tableau 7.c). Les meilleurs ratios ont été enregistrés durant l'année 2009, soient des ratios de 17.74 ; 5.59 et 4.06 (feuilles) et des ratios de 16.64, 5.97 et 3.78 (racines) respectivement pour K^+/Na^+ , Ca^{++}/Na^+ et NO_3^-/Cl^- .

Par ailleurs, le test de classement des moyennes a illustré une variation interannuelle plus significative pour le ratio K^+/Na^+ par rapport aux deux autres ratios au niveau des deux organes de la plante. Ce qui a permis de classer les quatre années en trois groupes homogènes bien distincts suivant l'ordre croissant suivant : (a) 2009 > (b) (2011 et 2012) > 2010 (c). Tandis que, seulement deux groupes ont été mis évidence pour les autres ratios Ca^{++}/Na^+ (Feuilles), NO_3^-/Cl^- (feuilles et racines) : (a) (2009 et 2012) > (b) (2010 et 2011).

Quant au ratio $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ (Racines), les trois années 2009, 2011 et 2012 ont été rassemblées dans le même groupe (a) occupant ainsi, toutes les trois, la première position suivi par l'année 2010 (b) en dernière position.

2.5.4. Effets de l'interaction de la salinité, dose de fumier (FV) et année sur les ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre

L'interaction de la salinité, dose de fumier (FV) et année a montré des effets significatifs ($P < 0.001$) (Tableau 7.c) sur les trois ratios ioniques au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre, mis à part, le ratio $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ aux racines qui n'a montré aucune différence significative entre traitements.

Les ratios les plus élevés ont été enregistrés au niveau des feuilles de la pomme de terre avec des valeurs de 36.94 pour le traitement ($\text{STS} \times 60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009}$), 11.48 pour le traitement ($\text{STS} \times 60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2012}$) et 11.35 pour le traitement ($\text{STS} \times 60 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2009}$) respectivement pour les ratios K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$.

Cependant, les plus faibles ratios ont été enregistrés au niveau des racines de la pomme de terre, soient des ratios de 3.36 pour le traitement ($\text{SS} \times \text{T0 t ha}^{-1} \times \text{Année 2010}$), 2.72 pour le traitement ($\text{SS} \times 0 \text{ t ha}^{-1} \times \text{Année 2010}$) et 1.21 pour le traitement ($\text{STS} \times \text{T0 t ha}^{-1} \times \text{Année 2009 et/ou 2012}$), respectivement pour les mêmes ratios ioniques K^+/Na^+ ; $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ et $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (Fig. 13. a, b, c).

La corrélation de Pearson (Tableau 7, Annexe III) a mis en évidence :

- Une corrélation significative et négative entre le ratio en K^+/Na^+ (Feuilles) et sodium (Na^+) (Feuilles et racines) de la pomme de terre, soient des coefficients de ($r = -0.72^{***}$) et ($r = -0.67^{***}$) respectivement pour les deux organes de la plante.
- Une corrélation significative et négative entre le ratio $\text{Ca}^{++}/\text{Na}^+$ (Feuilles) et le sodium (Na^+) (Feuilles et racines) de la pomme de terre avec des coefficients de ($r = -0.73^{***}$) et ($r = -0.68^{***}$) respectivement.
- Une corrélation significative et négative entre le ratio en $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (Feuilles) et Cl^- (Feuilles et racines) de la pomme de terre, soient des coefficients de ($r = -0.57^{***}$) et ($r = -0.52^{***}$) respectivement.
- Une corrélation significative et positive entre le potassium (Feuilles) et le calcium (Feuilles et racines) avec des coefficients de ($r = 0.9^{***}$) et ($r = 0.86^{***}$) respectivement.

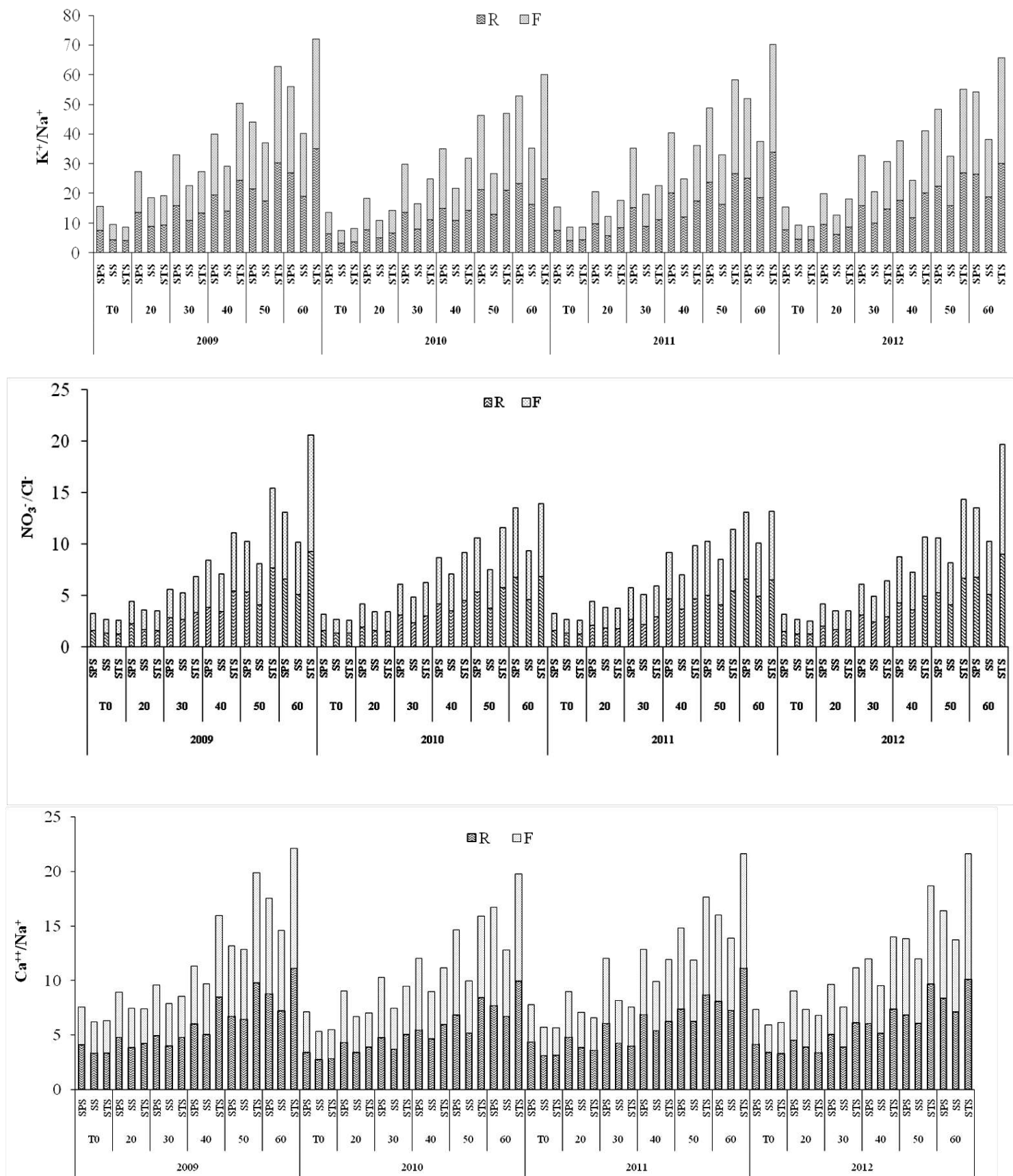


Figure 13. Effet de l'interaction (Salinité × Dose de fumier (FV) × Année) sur les ratios ioniques : K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ et NO_3^-/Cl^- au niveau des feuilles et des racines de la pomme de terre

3. Effet des doses de fumier (FV), salinité, année et de leur interaction sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline

La proline est un acide aminé accumulé dans les tissus des plantes en réponse aux types divers de stress (Ashraf et Foolad, 2007; Reddy, 2015). Sous stress salin, cet acide aminé peut agir comme un osmoticum dont l'accumulation cytoplasmique permet de neutraliser les effets ioniques et osmotiques de l'accumulation du sel dans la vacuole, en facilitant l'exclusion des sels des sites métaboliques. La présence de la proline est nécessaire pour contrecarrer le stress osmotique et salin pour assurer les fonctions vitales de la cellule. Son accumulation permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique (Hassani et al, 2008). Les effets des doses de fumier de volailles, de la salinité et leur interaction sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline durant les quatre années sont présentés dans le tableau 8.

3.1. Effets des doses de fumier (FV) sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline

La teneur en proline augmente proportionnellement et significativement ($P < 0.001$) avec l'apport croissant de fumier de volailles. En outre, toutes les doses ont montré des teneurs en proline plus élevées par rapport aux témoins. Néanmoins, la teneur la plus élevée a été enregistrée par la plus forte dose de fumier de volailles (60 t ha^{-1}). La teneur en proline passe de $1.16 \text{ (}\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MF)}$ à $3.98 \text{ (}\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MF)}$, lorsque la dose de fumier de volailles passe de 0 à 60 t ha^{-1} . Le test de classement des moyennes a réparti les doses de fumier de volailles (FV) en six groupes homogènes bien distincts, où chaque dose a formé un groupe à part (Tableau 8).

3.2. Effets de la salinité sur la teneur en proline

La teneur en proline augmente proportionnellement et significativement ($P < 0.001$) au degré de salinité du sol au niveau des trois sites expérimentaux (Tableau 8). Ainsi, la pomme terre accumule plus de proline dans les sols très salé (STS) et salé (SS) par rapport au sol peu salé (SPS). Les teneurs obtenues sont de 1.31, 3.32 et $3.72 \text{ }\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MF}$ respectivement pour le SPS, SS et le STS. Soit une augmentation de 3 et 2.5 fois respectivement par rapport au sol peu salé (SPS). Le test de classement des moyennes a dégagé trois groupes homogènes, où chaque sol a occupé un groupe à part dont l'ordre de classement s'établit comme suit : le groupe (a) STS > le groupe (b) SS > le groupe (c) SPS.

3.3. Effet de l'année sur la teneur en proline

Une variation interannuelle significative a été indiquée par l'analyse statistique ($P < 0.001$) en ce qui concerne la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline. La répartition des années suivant le classement des moyennes a fait ressortir trois groupes homogènes : (a) 2009 (3.01 mg g⁻¹MF) > (b) 2011 (2.79 mg g⁻¹MF) = 2012 (2.74 mg g⁻¹MF) > 2010 (c) (2.58 mg g⁻¹MF).

3.4. Effet de l'interaction de la salinité, doses fumier et année sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline

Les résultats mentionnés dans le tableau (8) révèlent que la teneur en proline au niveau des feuilles de la pomme de terre a été significativement ($P < 0.001$) affectée par l'interaction entre les facteurs étudiés analysés deux à deux : (Doses FV × Salinité), (Dose FV × Année) et (Salinité × Année). Ces résultats montrent que la teneur la plus élevée en proline a été enregistrée en conditions plus salines (STS), qu'à celle enregistrée en conditions peu salines (SPS). Cependant, elle augmente progressivement au fur et à mesure que les doses de fumier de volailles augmentent. Ces résultats sont similaires pour les quatre années de l'essai.

Quant à l'interaction entre les trois facteurs (Dose de FV × Salinité × Année), l'ANOVA a décelé des variations significatives ($P < 0.05$) de la teneur en proline entre traitements. La teneur la plus élevée en proline (6.01 μmol.g⁻¹ MF) a été enregistrée par le traitement (60 t ha⁻¹ FV × STS × Année 2009), alors que la plus faible teneur (0.88 μmol.g⁻¹ MF) a été enregistrée par le traitement (0 t ha⁻¹ × SPS × Année 2009, 2012) (Fig. 15).

Enfin, au cours de l'essai pluriannuel, les plus faibles teneurs en proline ont été observées au niveau du sol témoin, alors que les plus fortes teneurs ont été enregistrées au niveau de la dose 60 t ha⁻¹.

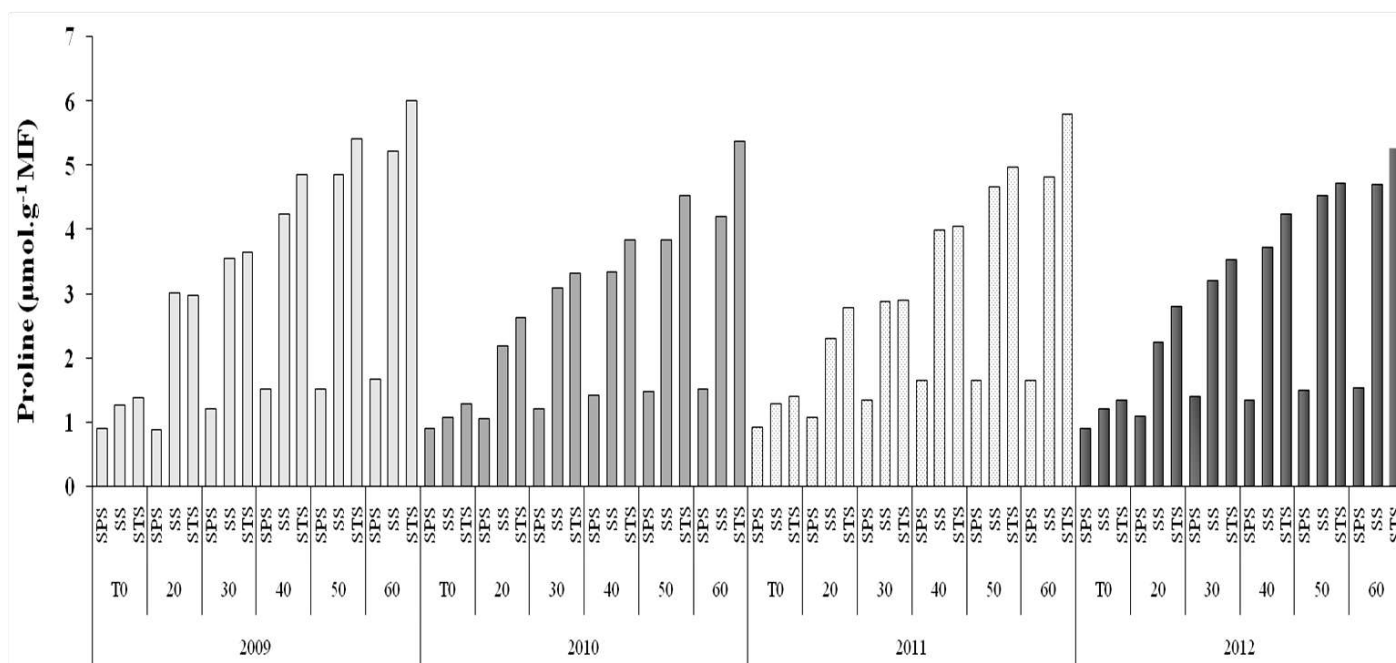


Figure 14. Effet de l'interaction (Dose FV × Salinité × Année) sur la teneur foliaire de la pomme de terre en proline ($\mu\text{mol.g}^{-1}$ MF)

3.5. Discussion générale

Le tableau 8 montre que la teneur en proline augmente linéairement et significativement avec l'apport croissant de fumier de volailles, ce qui reflète l'activation de l'accumulation et la biosynthèse de cet acide aminé à l'intérieur de la cellule en réponse à la fertilisation organique à base de fumier de volailles.

Quant aux effets de la salinité, les résultats obtenus ont montré que l'accumulation de cet acide aminé est proportionnelle au degré de la salure au niveau des trois sites expérimentaux, autrement dit que, l'accumulation la plus importante de cet acide aminé a été enregistrée au niveau du site le plus salé.

En général, la teneur des feuilles de la pomme de terre en proline augmente avec l'augmentation du niveau de la salinité du sol, ce qui suggère que la production de cet acide aminé est probablement une réponse commune du végétal sous les conditions salines (Teixeira *et al.*, 2007; Daneshmand *et al.*, 2010).

L'ajustement osmotique à travers l'accumulation des solutés organiques, telle que la proline, a été suggéré comme l'un des moyens possibles pour surmonter le stress osmotique

causé par la perte d'eau liée à la salinité chez d'autres espèces végétales (Maïs, melon, tomate) (Mousa et Abdel-Aziz, 2008 ; Redy, 2015).

Quant aux effets de l'interaction, les résultats obtenus mettent en évidence que le traitement indirect des plants de la pomme de terre avec le fumier de volailles (FV) (Comme fertilisant organique) augmente significativement la teneur foliaire en proline sous les conditions salines.

4. Effet des doses de fumier (FV), salinité, année et leur interaction sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en chlorophylle totale

La teneur en la chlorophylle est le critère le plus utilisé pour quantifier l'état général de la plante (Tripathi, 1999). La diminution dans le taux de biosynthèse de la chlorophylle s'accompagne par une diminution de l'assimilation chlorophyllienne, donc une diminution de l'élaboration de la matière organique ce qui entraîne une perte dans la croissance des espèces et par la suite des pertes de rendements.

Les effets des doses de fumier de volailles, de la salinité et leur interaction sur la teneur foliaire de la pomme de terre en chlorophylle durant les quatre années sont illustrés dans le tableau 8.

4.1. Effets des doses de fumier de volailles (FV) sur la teneur en chlorophylle totale

La concentration en chlorophylle totale dans les feuilles de la pomme de terre augmente significativement ($P < 0.001$) en réponse à l'apport croissant des doses de fumier de volailles (FV). Toutes les doses testées ont enregistré une augmentation significative de la teneur en chlorophylle totale par rapport au témoin. Les moyennes obtenues sont de 0.89, 2.44, 2.83, 3.11, 3.88 et 4.27 mg g⁻¹ MF respectivement pour les doses 0, 20, 30, 40, 50 et 60 t ha⁻¹. Ainsi, la plus forte dose de fumier de volailles (60 t ha⁻¹) a augmenté la teneur en chl total par rapport au témoin de 4.8 fois.

Le test de classement des moyennes a révélé six groupes homogènes distincts suivant l'ordre décroissant suivant : **(a)** 60 t ha⁻¹ > **(b)** 50 t ha⁻¹ > **(c)** 40 t ha⁻¹ > **(d)** 30 t ha⁻¹ > **(e)** 20 t ha⁻¹ > **(f)** 0 t ha⁻¹.

4.2. Effets de la salinité sur la teneur en chlorophylle totale

L'analyse statistique a indiqué une variation significative ($P < 0.001$) de la concentration en chlorophylle en fonction de degré de la salinité du sol au niveau des trois sites expérimentaux (Tableau 8). La concentration la plus élevée a été enregistrée à la fois au niveau du sol le plus salé (STS) et sol peu salé (SPS), soit une concentration moyenne de 2.9 mg g^{-1} MF. Quant au sol salé (SS), il s'est classé en deuxième position en enregistrant une concentration moyenne de 2.81 mg g^{-1} MF.

Le test de classement des moyennes a confirmé ces résultats en dégageant deux groupes homogènes : le groupe (**a**) présenté par les deux sols sol très salé (STS) et sol salé (SPS), et le groupe (**b**) présenté par le sol salé (SS).

4.3. Effets de l'année sur la teneur en chlorophylle totale

À l'échelle des quatre années de l'essai au champ, des variations significatives ont été mises en évidence par l'analyse statistique pour la teneur en chlorophylle totale au niveau des feuilles de la pomme de terre. Le test de classement des moyennes a fait ressortir deux groupes homogènes : le groupe (**a**) où figurent les deux années 2009 et 2012 qui ont enregistré respectivement les teneurs les plus élevées en chlorophylle (3.25 et 3.19 mg g^{-1} FW), et le groupe (**b**) où figurent les deux années 2010 et 2011 qui ont enregistré respectivement les plus faibles teneurs en chlorophylle (2.57 et 2.6 mg g^{-1} MF).

4.4. Effets de l'interaction des facteurs étudiés sur la teneur des feuilles de la pomme de terre en chlorophylle totale

Les résultats présentés dans le tableau 8 révèlent que la concentration foliaire de la pomme de terre en chlorophylle a été statistiquement ($P < 0.001$) affectée par l'interaction entre les facteurs étudiés analysés deux à deux (Dose fumier de volailles \times Année) et (Salinité \times Dose de FV) et (Dose FV \times Année).

Tandis que, l'interaction entre les trois facteurs (Salinité \times Dose de FV \times Année) n'a montré aucune différence significative entre traitements. Ces résultats tendent à confirmer nos observations antérieures relatives aux rendements total t ha^{-1} selon les quelles aucune différence significative n'a été décelée par l'analyse de la variance relative à l'effet de l'interaction entre des trois facteurs Salinité \times Doses fumier (FV) \times Année).

Par ailleurs, une corrélation significative et positive a été signalée entre la chlorophylle totale et le rendement total $t\ ha^{-1}$ ($r = 0.67^{***}$) par la matrice de corrélation de Pearson (Tableau 7, Annexe III).

Bien que, l'analyse de la variance ne quantifie pas la différence de l'effet de l'interaction des trois facteurs comme significative, une concentration foliaire plus élevée en chlorophylle totale a été enregistrée par le traitement : ($60\ t\ ha^{-1} \times STS \times$ Année 2009), soit une teneur de $5.14\ mg\ g^{-1}\ MF$, tandis que, la plus faible concentration a été enregistrée par le traitement : ($0\ t\ ha^{-1} \times SPS \times$ Année 2011 et 2010) avec une teneur de $0.80\ mg\ g^{-1}\ MF$ (Fig 17).

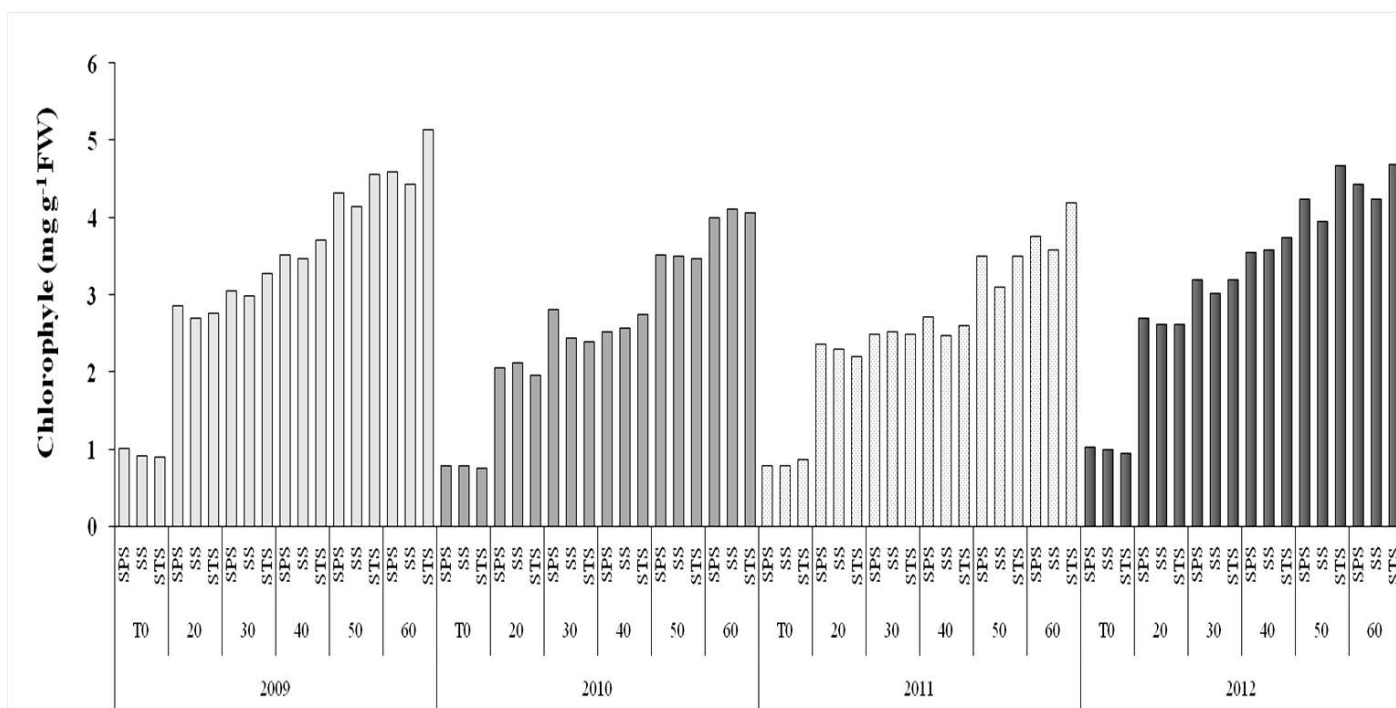


Figure 15. Effet de l'interaction des doses de fumier de volailles, salinité et année sur la teneur foliaire de la pomme de terre en chlorophylle ($mg\ g^{-1}\ MF$) durant les quatre années de l'essai.

4.5. Discussion générale

La chlorophylle totale augmente significativement avec l'application croissante de fumier de volailles dans les feuilles de la pomme de terre dans les trois sols étudiés, en particulier au niveau de la dose $60\ t\ ha^{-1}$ (Tableau 8). Des constats similaires ont été observés pour les quatre années de l'étude.

Ces résultats concordent avec la tendance généralement recensée dans la littérature voulant que l'apport organique améliore la synthèse de la chlorophylle par les plantes Fernández-Luqueño *et al.* (2010).

Des résultats similaires ont été obtenus par Arisha et Bradisi (1999) qui ont montré que l'apport organique améliore la synthèse de la chlorophylle chez la pomme terre.

Le fumier organique enrichi le sol en macronutriments et micronutriments soit directement, soit par suite de sa minéralisation. Les nutriments libérés par ce fumier sont adsorbés par les plantes et utilisés simultanément pour diverses activités métaboliques intervenant dans la synthèse des molécules de la chlorophylle.

D'après Dos Santos *et al.* (2006), l'azote, le phosphore, potassium et les oligo éléments sont impliqués dans la synthèse de la chlorophylle.

Ces résultats sont alignés avec ceux de Bojovic et Stojanovic (2005) Amujoyegbe *et al.* (2007) qui ont montré une forte relation linéaire entre la disponibilité des nutriments et la teneur des feuilles de blé en chlorophylle.

Ainsi, des corrélations positives ont été mises en évidence entre la concentration en chlorophylle totale et la teneur foliaire de la pomme de terre en azote, potassium et phosphore, soient des coefficients de corrélation de ($r = 0.91^{***}$), ($r = 0.82^{***}$) et ($r = 0.89^{***}$) respectivement pour les trois éléments (Tableau 7, Annexe III).

Le fumier de volailles contient également du Magnésium (Mg), qui est considéré comme l'élément capital de la structure de la chlorophylle (Suntoro, 2002).

La forte concentration en chl enregistrée par la plus forte dose de fumier de volailles (60 t ha^{-1}) s'explique par la forte libération des nutriments (macroéléments et microéléments) par cette dose comparativement aux autres doses.

Ces résultats concordent ceux de Costa *et al.* (2001) qui ont rapporté que les plants recevant plus de matières fertilisantes (notamment en azote) montrent des concentrations plus élevées en chlorophylle.

Les faibles concentrations en chlorophylle au niveau du traitement témoin (sans apport) sont probablement dues à une carence en éléments minéraux, ce qui peut avoir des répercussions négatives sur la synthèse de la chlorophylle.

La surface foliaire peu développée dans les traitements témoins contribué également à diminuer la teneur en chlorophylle.

Les résultats relatifs à l'effet de l'interaction (Salinité × Doses fumier) sur la teneur en chlorophylle rejoignent ceux de Yang *et al.* (2006) ; Ahmad et Jabeen (2009) ; Rady (2012), qui ont observé une augmentation de la concentration de la chlorophylle chez plusieurs espèces végétales (Tomato, Tournesol, Blé) soumises à l'effet combiné de la forte de salinité et la forte dose de fertilisants organiques. Alors qu'ils s'écartent de ceux de Ahmad *et al.* (2009) et Saeed et Ahmad (2009), qui ont constaté une forte accumulation de la chlorophylle sous l'effet combiné de la plus forte dose de l'apport organique, mais en conditions de faible salinité.

Quant à l'interaction des trois facteurs étudiés (Salinité, Doses FV et Année) sur la concentration en chlorophylle totale dans les feuilles de la pomme de terre, l'analyse statique n'a montré aucune différence significative entre traitements (Tableau 8). Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par le rendement total t ha⁻¹, où aucune variation significative n'a été mise en évidence pour l'effet de cette interaction.

La matrice de corrélation de Pearson a indiqué une corrélation significative et positive la chlorophylle totale et le rendement total t ha⁻¹ ($r=0.67^{***}$) (Tableau7, annexe III).

IV. Conclusion partie

L'objectif de cette partie de notre travail était d'optimiser la fertilisation organique à base de fumier de volailles de la culture de la pomme de terre (Variété Spunta), à travers l'étude des effets de doses croissantes de fumier de volailles sur certains paramètres biométriques (Paramètres de croissance végétative et de rendement), l'état nutritionnel et l'évaluation de la tolérance de la pomme de terre à la salinité en réponse à l'apport organique.

Cet objectif s'inscrit dans le contexte scientifique de la compréhension de la réponse morphologique, physiologique et biochimique de la pomme de terre à la fertilisation organique en conditions salines.

Les résultats obtenus ont montré une augmentation significative des paramètres de croissance végétative et ceux du rendement en présence des doses croissantes de fumier de volailles par rapport au témoin, et ceci quel que soit le niveau de la salinité dans les trois sites expérimentaux. Toutefois, cette augmentation a été plus marquée dans le cas du site 3 correspondant au fort niveau de salinité (Sol très salé).

L'effet d'interaction (Salinité × Dose FV) a montré que les meilleures performances en terme de croissance, de rendement, d'état nutritionnel et des contenus foliaires en proline et en chlorophylle ont été enregistrées au niveau du sol très salin (STS), traité avec la dose la plus élevée de FV (60 t ha⁻¹). Cela signifie que la fertilisation de la pomme de terre avec le fumier de volailles de manière significative encourage la capacité des plantes à produire de vigoureux caractères végétatifs.

Bien que l'ANOVA à trois critères de classification n'ait montré aucun effet significatif sur l'interaction des trois facteurs étudiés pour le rendement total t ha⁻¹, une tendance à une production plus élevée a été enregistrée au niveau de l'interaction (STS × 60 t ha⁻¹ × Année 2009), soit un rendement total de 45.9 t ha⁻¹.

L'évaluation de l'état nutritionnel de la plante au stade floraison a montré qu'à l'échelle de quatre années d'essai, l'apport croissant du FV entraîne une augmentation significative des concentrations foliaires et racinaires de la pomme de terre en potassium (K⁺), en calcium (Ca⁺⁺) et en nitrates (NO₃⁻), alors qu'il abaisse en parallèle leurs contenus en sodium (Na⁺) et en chlore (Cl⁻). Ce qui s'est traduit par de forts ratios K⁺/Na⁺, Ca⁺⁺/Na⁺ et NO₃⁻/Cl⁻ enregistrés par les traitements aux fumiers de volailles au niveau des deux organes de la plante dans le sol le plus salé. Ces résultats confirment l'amélioration de la stratégie d'absorption et la sélectivité des éléments nutritifs bénéfiques à la plante au détriment de ceux liés à l'excès de sels.

L'analyse de la variance relative à l'accumulation de la proline et de la chlorophylle au stade floraison a montré que les traitements du fumier de volailles ont augmenté les concentrations et les contenus foliaires en chlorophylle et en proline en particulier, au niveau du sol le plus salé, ce qui témoigne et confirme l'amélioration du niveau de la tolérance de la pomme de terre à la salinité suite à l'apport du fumier de volailles.

L'interaction entre la salinité et les doses de volailles de fumier était importante pour tous les paramètres de la plante laissant penser que ce fumier peut effectivement être utilisé comme une stratégie pour atténuer les effets négatifs de la salinité et de soutenir la croissance des plantes dans des conditions salines.

Le fumier de volailles a permis à la plante de poursuivre une stratégie d'adaptation à la contrainte saline, ce qui lui permet de maintenir une capacité photosynthétique élevée et par la voie de la biosynthèse des solutés organiques conduisant à l'ajustement osmotique nécessaire pour maintenir la turgescence et la croissance de la plante sous les conditions de forte salinité.

Sur le plan agronomique, les résultats obtenus nous permettent de recommander la dose de 60 t ha⁻¹ de fumier de volailles, comme une dose optimale sous les conditions salines des régions sahariennes. Néanmoins, pour bien exploiter ces résultats et maximiser la rentabilité du fumier de volailles sur la culture de la pomme de terre, une étude économique est donc indispensable afin de déterminer l'optimum économique et de rentabiliser l'utilisation de ce type de déchet comme fertilisant organique en agriculture saharienne.

Il est à recommander, d'autre part, de porter les autres facteurs de production à leur optimum, en particulier, le travail du sol qui doit être profond, le choix de la variété qui doit être adaptée à la salinité, la semence qui doit être saine et certifiée ainsi que l'entretien de la culture qui doit être intensif et efficace.

Cependant, il faut souligner certaines réserves ayant trait aux limites d'utilisation de ce type de fumier notamment sur le plan environnemental. Le fumier de volailles en dehors de sa richesse en éléments nutritifs, est caractérisé par un potentiel de minéralisation très fort, ce qui est en mesure de libérer des quantités élevées de nutriments.

Si ces éléments minéraux ne sont pas utilisés par les plantes, ils peuvent être lessivés et conduisent à la pollution de l'eau du sol. Par ailleurs, il est à signaler que les apports abusifs en fumier de volailles peuvent créer des déséquilibres au niveau du sol et des risques de phytotoxicité et de pollution du sol et des nappes d'eau.

La fertilisation organique à base de ce fumier sous les conditions arides doit être bien maîtrisée et optimisée, notamment par des apports fractionnés en fonction des besoins de chaque stade phénologique de la plante, en particulier sous les conditions pédoclimatiques sahariennes (Forte température, irrigation continue et texture sableuse filtrante).

Afin d'atténuer ces contraintes environnementales, nous recommandons l'utilisation de la technique de compostage des fumiers organiques, qui est en mesure de transformer ceux-ci en produits stabilisés, peu odorants, avec une très bonne valeur fertilisante pour les plantes et sans risque de contamination par les germes pathogènes.

Cette étude relative à l'amélioration des propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol, ainsi qu'à l'amélioration de la production des plantes sous les conditions salines des régions sahariennes par le biais de la fertilisation organique, nous a permis de cerner un certain nombre de points concernant l'importance des apports organiques pour l'amélioration de la productivité du sol salé et de contribuer à combler le déficit chronique en matière d'études pédo-biologiques et agronomiques dans ces régions.

Au terme de notre travail de recherche, nous jugeons utile de rappeler l'objectif scientifique essentiel qui consiste à apporter une contribution à l'étude des possibilités d'utilisation des matières organiques, pour l'amélioration de la réactivité physico-chimique, le fonctionnement microbologique et la production de la plante en conditions salines des régions sahariennes.

À cet effet, nous avons entrepris au prime abord une caractérisation détaillée des produits organiques sélectionnés dans le cadre de cette étude. Cette étape vise à déterminer la valeur agronomique (Valeur fertilisante et amendante) de cinq types de produits organiques à savoir le fumier de volailles (FV), le fumier de bovin (FB), le fumier de caprin (FC), le fumier de dromadaire (FD) et les résidus de palmier dattier (RPD). La valeur fertilisante a été estimée par la détermination de la teneur de ces produits en éléments fertilisants majeurs et par l'utilisation des coefficients équivalents engrais. La valeur amendante a été déterminée par la détermination du rapport C/N, la caractérisation biochimique de la matière organique, ainsi que, par le fractionnement humique de ces produits.

Dans un deuxième volet de notre étude, un essai en conditions semi contrôlées (Essai en pots) sur lequel l'accent a été mis sur l'influence des différents produits organiques (sus-cités) sur certaines propriétés physiques et physico-chimiques du sol salé, notamment celles qui posent des contraintes à la mise en valeur à savoir la forte conductivité électrique (CE), la faible capacité d'échange cationique (CEC), le pH élevé et la faible capacité de rétention en eau (CR).

Dans un troisième volet, nous nous sommes intéressés à l'activité microbologique du sol salé par l'étude de la dynamique de la minéralisation de l'azote et du carbone sous des conditions contrôlées, étant donné que ces deux éléments sont les facteurs militants par excellence à l'égard des microorganismes décomposeurs de la matière organique d'où l'intérêt d'une connaissance profonde de la cinétique de minéralisation de ces éléments majeurs au niveau des sols.

Ainsi, nous avons mis en évidence l'importance du rôle des substrats organiques, additionnés au sol et plus particulièrement, de leur composition biochimique, en tant que facteur

prépondérant dans les processus régissant l'évolution de la matière organique dans les sols sahariens.

Enfin, dans le but d'optimiser la fertilisation organique des sols sous les conditions salines des régions arides, suite à leur enrichissement en fumier de volailles, nous avons procédé à un essai pluriannuel au champ. L'objectif était d'optimiser la fertilisation organique à base de fumier de volailles sur la culture de la pomme de terre en conditions salines et ceci en étudiant l'effet des doses croissantes de ce fumier sur les paramètres biométriques (Paramètres de croissance végétative et de rendement), l'état nutritionnel et l'évaluation de la tolérance de la pomme de terre à la salinité en réponse à l'apport organique.

Principaux résultats de cette étude

Les résultats obtenus ont montré une nette richesse de fumier de volailles en éléments fertilisants par rapport aux autres produits. Cette richesse se remarque à la fois au niveau des éléments majeurs et en oligoéléments. Toutefois, les faibles teneurs en cellulose et en lignine enregistrées par ce fumier par rapport aux autres produits, nous amènent à apprécier sa valeur agronomique surtout en fonction de sa valeur fertilisante. En effet, l'intérêt agronomique pour ce fumier porte essentiellement sur l'apport de la matière fertilisante.

En revanche, les résultats relatifs à la composition biochimique ont été en faveur des autres produits testés qui ont montré des teneurs en cellulose et en lignine, quoique variables d'un produit à l'autre mais nettement supérieures à celles enregistrées par le fumier de volailles. Ces constats ont été confirmés par le degré de stabilité des produits testés, appréciés par la détermination des rapports C/N et AH/AF. Ces deux ratios ont montré une faible stabilité de fumier de volailles par rapport aux autres produits. L'épandage de ces produits peut donc permettre à long terme de combler un bilan organique déficitaire dans les régions sahariennes.

En comparaison aux autres produits organiques d'origine animale, les résidus de palmier dattier ont enregistré les plus faibles teneurs en éléments fertilisants. Toutefois, ce produit semble être plus riche en matière organique et en composés ligninolisiques que les autres produits testés. De ce fait, ces résidus peuvent jouer un rôle important comme amendement organique.

L'analyse des résultats globaux obtenus de cette partie de notre étude a montré clairement que la matière organique améliore les propriétés du sol salé. Elle exerce au même temps ses effets positifs comme source d'énergie et de nutriments, et fournit aux micro-organismes de bonnes conditions pédo-biologiques nécessaires à leur vie, en raison de l'amélioration de certaines propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés.

Cette étude a permis de mettre en évidence un effet favorable des produits organiques testés sur l'ensemble des paramètres physiques et physico-chimiques étudiés du sol. Cependant, des différences significatives entre les différents produits organiques testés ont été mises en évidence, tant que, sur leurs effets sur les caractéristiques physique et physico-chimiques, que sur leur dynamique de biodégradation dans le sol.

L'effet améliorant paraît en relation directe avec la composition biochimique de chaque produit et à la vitesse de sa biodégradation dans le temps.

Concernant leurs effets sur les propriétés physiques et physico-chimiques du sol, des modifications profondes sur l'ensemble des propriétés de ce dernier ont été illustrées en réponse à l'apport organique au sol salé au cours de l'essai. Toutefois, la tendance de différenciation qui a été observée entre les différents traitements est en relation directe avec la nature biochimique du produit apporté au sol, ainsi qu'en fonction de son rythme de biodégradation au cours du temps.

Alors que, les quatre types de fumier ont montré des effets plus importants sur le pH, la CEC, et la CE. Les résidus de palmier dattier (RDP) ont essentiellement augmenté la capacité de rétention en eau du sol (CR).

Tous les produits ont montré une réduction significative ($P < 0.001$) de la conductivité électrique (CE) au 56^{ème} jour de l'essai, néanmoins, la réduction la plus prononcée de ce paramètre a été enregistrée par le sol traité par le fumier de volailles (FV), soit un taux de réduction de 13.14 % contre des taux de réduction de 9.96, 6.65 et 3.49 % respectivement pour le fumier de dromadaire (FD), fumier de caprins (FC) et fumier de bovins (FB) comparés à l'état initial (au temps 0 jour).

L'augmentation la plus importante de la CEC a été également enregistrée par le FV au 7^{ème} jour de l'essai, soit des taux d'augmentation de 106.27, 34.29, 33.05 et 22.7% respectivement par rapport au témoin, fumier de caprins (FC), fumier de bovins (FB) et fumier de dromadaire (FD) pour la même période de prélèvement.

Par ailleurs, les valeurs du pH ont indiqué que le fumier de caprins (FC) et de bovins (FB) ont un effet basique sur la réaction du sol, alors le fumier de volailles (FV) et le fumier de dromadaire (FD) ont montré un effet légèrement acidifiant sur la réaction du sol salé.

En revanche, les faibles modifications des propriétés des sols enregistrées par les résidus de palmier dattier peuvent être expliquées par leur faible biodégradation au cours de l'essai, en raison de leurs fortes teneurs en lignine et en cellulose par rapport aux autres produits.

Les résultats de cette étude ont montré que les caractéristiques des produits organiques diffèrent et donc les recommandations sur leur utilisation devraient être spécifiques et basées sur une analyse précise et détaillée de la valeur fertilisante et amendante pour chaque type de produit organique avant son épandage au sol.

La mesure des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote des produits organiques en conditions contrôlées a montré que l'incorporation des différents types de matière organique provoque au bout de 56 jours d'incubation une augmentation significative de la minéralisation du carbone et de l'azote (par le biais de la mesure du CO₂ dégagé et de l'extraction des deux formes de l'azote minéral à savoir (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻), comparativement aux sols non traités.

Les tests respirométriques et l'extraction des deux formes d'azote *in vitro* ont montré un pouvoir minéralisateur en fonction du type de produit organique utilisé et du degré de salinité du sol. Cet effet est d'autant plus marqué que le niveau de la salinité du sol est faible et le produit organique est riche en composés facilement métabolisables.

Les émissions de C-CO₂, N-NO₃⁻ et N-NH₄⁺ cumulatives les plus élevées ont été enregistrées par le sol sableux non salé traité par le fumier de volailles.

La production d'azote minéral est essentiellement sous la forme nitrique, indiquant l'absence d'immobilisation de l'azote ammoniacal par suite de la faible CEC et à la texture grossière (texture sableuse) qui caractérisent les sols utilisés.

En ce qui concerne l'importance de la minéralisation, le meilleur effet a été observé dans le sol sableux non salé enrichi en fumier de volailles (faible C/N et faibles teneurs en composés ligninolisiques), et ce en raison de sa richesse relative en azote et en composés facilement décomposables. Quant aux autres produits organiques, leurs teneurs plus ou moins élevées en lignine et en cellulose (C/N relativement élevé) leur offre un potentiel de minéralisation relativement moins important par rapport au fumier de volailles.

D'autre part, les résultats obtenus montrent que l'ampleur de la réduction de l'activité respiratoire et de la nitrification par la salinité semble être contrôlée par sa nature biochimique du produit organique, plutôt que, par le niveau de la salinité du sol. Cette dernière diminue plus les émissions de CO₂ et de NO₃ dans les traitements reçus des produits riches en azote et en carbone facilement biodégradable.

En outre, les taux de minéralisation relativement élevés obtenus sous nos conditions expérimentales, que ce soit, pour les composés carbonés ou azotés sont en mesure d'expliquer la faible protection physique de la matière organique à cause de la texture sableuse des deux sols. Par ailleurs, la faible activité respiratoire enregistrée par les résidus de palmier dattier peut être expliquée par leur forte résistance à l'attaque microbienne par suite de leurs richesses en composés difficilement biodégradables.

La mesure des cinétiques de minéralisation de l'azote des produits organiques en conditions contrôlées a montré une forte disponibilité potentielle de l'azote du fumier de volailles par rapport aux autres produits. Cette tendance est soulignée par les résultats de l'essai au champ qui ont révèlent une valeur fertilisante azotée relativement élevée de ce produit pour la culture de la pomme de terre.

Concernant l'essai au champ, les résultats obtenus ont révélé une augmentation significative et proportionnelle de la plupart des paramètres de croissance végétative, de rendement, de l'état nutritionnel et de la teneur en proline et chlorophylle de la pomme de terre étudiés (biométriques, physiologiques et biochimiques) en réponse à l'apport croissant de fumier de volailles par rapport au témoin, quel que soit le niveau de salinité dans les trois sites expérimentaux. Toutefois, l'effet de l'interaction (Dose de fumier de volailles \times Salinité) a montré que les meilleures performances en terme de croissance, de rendement, d'état nutritionnel et du contenu foliaire en proline et en chlorophylle ont été enregistrées au niveau du sol le plus salé (STS) traité avec la dose la plus élevée de FV (60 t ha⁻¹).

Par ailleurs, bien que l'ANOVA à trois critères de classification n'a montré aucun effet significatif sur l'interaction des trois facteurs étudiés (Salinité \times Dose fumier de volailles (FV) \times Année) pour le rendement total t ha⁻¹, une tendance à une production plus élevée a été enregistrée au niveau de l'interaction (STS \times 60 t ha⁻¹ \times Année 2009) avec un rendement total de 45.9 t ha⁻¹.

L'évaluation de l'état nutritionnel de la plante au stade floraison a montré qu'à l'échelle de quatre ans de cette étude, l'apport croissant de fumier de volailles entraîne une augmentation significative des concentrations foliaires et racinaires de la pomme de terre en potassium (K⁺), calcium (Ca⁺⁺) et en nitrates (NO₃⁻), alors qu'il abaisse en parallèle leurs contenus en sodium (Na⁺) et en chlore (Cl⁻).

Cette tendance justifie bien les plus forts ratios K⁺/Na⁺, Ca⁺⁺/Na⁺ et NO₃⁺/Cl⁻ enregistrés par les traitements aux fumiers de volailles dans les deux organes de la plante notamment au niveau du sol le plus salé.

Ce qui témoigne bien et confirme l'amélioration du niveau de tolérance de la pomme de terre à la salinité en réponse à l'apport de fumier de volailles.

L'interaction entre la salinité et les doses de fumier de volailles était importante pour tous les paramètres de la plante laissant penser que ce fumier peut effectivement être utilisé comme une stratégie adéquate pour atténuer les effets négatifs de la salinité sur la croissance et le développement des plantes. Cette étude montre que la production de la pomme de terre dans les sols salés des régions arides peut être améliorée par une fertilisation organique raisonnée et bien conduite à base de fumier de volailles.

Étant donnée que cette étude est menée en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels, les résultats obtenus suggèrent que l'accroissement de la teneur en matière organique des sols semble être l'une des solutions agronomiques adéquates, non seulement pour atténuer les effets osmotiques et physiologiques liés au stress salin, mais également pour exploiter les eaux saumâtres dans ces régions.

Globalement, nous pouvons conclure de l'ensemble des résultats obtenus à l'issue de cette étude que l'interaction (Salinité \times Apport organique), est en général positive. Cela s'expliquerait par l'aptitude de la matière organique à masquer l'effet négatif de la salinité et d'atténuer ses effets indésirables sur l'ensemble des propriétés physiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol salé, ainsi que sur la production de la plante.

Limites et perspectives de recherches de cette étude

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont très intéressants et encourageants notamment que le domaine de fertilisation organique reste mal connu, par suite des rares travaux qui ont abordé cette thématique dans le contexte saharien. Néanmoins, cette étude présente certaines limites permettant de proposer des perspectives à ce travail et d'ouvrir la voie vers la poursuite et l'approfondissement de ces premières expériences sur les multiples niveaux abordés par la présente étude :

En conditions semi contrôlées

Les résultats obtenus de cette partie de notre travail a illustré seulement les effets liés à la matière organique fraîche sur les propriétés du sol salé. Les effets de la matière organique stabilisée n'ont pas pu être mis en évidence. En fait, la courte durée de l'essai en conditions semi contrôlées (6 mois) nous a constitué un obstacle pour la distinction de l'effet de la matière stabilisée sur les propriétés du sol. Cette durée expérimentale reste insuffisante pour l'observation

des améliorations importantes sur la fertilité physique et chimique du sol salé. Elle doit être complétée par des essais de longues durées dans les mêmes conditions afin de suivre l'évolution des effets des produits organiques stabilisés sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols salés.

En conditions contrôlées

Les cinétiques de minéralisation dans le cadre de cette étude ont été obtenues au laboratoire dans des conditions de température et d'humidité contrôlées. Les épandages au champ sont conditionnés par de différents paramètres pédoclimatiques. Ainsi, il est difficile d'extrapoler les résultats obtenus au laboratoire par rapport aux conditions réelles rencontrées sur le terrain.

L'extrapolation de ces résultats *in situ* (conditions au champ) mérite d'être vérifiée expérimentalement à plus long terme, pour faire des bilans avant de tirer des conclusions ou même des modèles sur ce sujet. Néanmoins, ces cinétiques permettent d'apprécier une tendance sur le comportement agronomique des différents produits organiques testés.

L'étude de l'impact des produits organiques en fonction de leur nature biochimique pourrait être appréhendée par une analyse particulière des populations microbiennes impliquées dans la biodégradation des composés carbonés et azotés contenus dans les produits organiques testés. Et ceci par un suivi de l'évolution de certains groupes fonctionnels (groupes physiologiques) intervenant dans la biodégradation du carbone et de l'azote tels que, les groupes physiologiques de la dégradation de la cellulose, des microorganismes ammonificateurs et des nitrificateurs, etc.

Essai au champ

Compte tenu du protocole adopté pour cette partie de notre étude, nos interprétations se sont limitées à l'analyse des effets de fumier de volailles sur la plante seulement à l'échelle de l'année culturale. Bien qu'il s'agisse d'un essai de longue durée (Essai répété sur quatre années), le changement de l'assiette des trois sites, chaque année culturale pour des raisons préventives et agronomiques ne nous a pas permis de suivre l'arrière effet de l'apport organique à long terme c-à-d après les quatre années de mise en culture.

D'autres études seraient nécessaires pour considérer l'arrière effet du fumier de volailles à long terme notamment ceux qui visent l'augmentation du statut organique du sol. Le prolongement de l'essai pourrait permettre de suivre l'effet cumulatif des produits organiques sur les propriétés

du sol d'une part, et pour une bonne maîtrise des programmes de fertilisation pour les plantes, d'autre part.

Les expérimentations de longue durée nous permettent d'avoir des informations sur quelques éléments qui n'ont pas pu être suivis lors de cette étude, à savoir, le fractionnement des composés humiques et l'estimation de l'indice d'humification des produits organiques apportés aux sols salés, sous le contexte écologique du milieu saharien.

À l'échelle des *perspectives de recherches*, les chercheurs intéressés par la fertilisation organique en conditions salines des régions arides, sont devant un défi de taille notamment en ce qui concerne la non compatibilité des normes disponibles dans la littérature aux contextes des régions sahariennes sur multiples plans. Ce qui leur impose de penser sérieusement à la détermination des normes spécifiques pour chaque région avant de lancer tout programme de fertilisation. Les réglementations et les normes sont toujours calquées sur les normes internationales qui sont réalisées dans des contextes environnementaux différents et dont leur application dans des régions différentes peut conduire à des résultats erronés. Il semble dès lors important de déterminer des normes de classification de la salinité du sol, de l'eau d'irrigation et des doses organiques, ainsi que l'élaboration des coefficients équivalents engrais des produits organiques en fonction des particularités édapho-climatiques de notre région, et ceci à travers des études poussées en plein champ et sous des conditions contrôlées, notamment pour les ressources organiques locales, tels que les résidus de palmier dattier et le fumier de dromadaire.

Dans cette perspective, les producteurs et leurs conseillers ont également besoin d'une méthode fiable de caractérisation des produits organiques de même que de « valeurs de référence » actualisées auxquelles pourront être comparés les résultats de la caractérisation à la ferme.

D'autre part, la bonne compréhension de l'équilibre nutritif des plantes sous nos conditions salines nécessite l'utilisation du marquage des éléments minéraux, ce qui facilite le suivi de leur mobilité du sol vers la plante et donnera une vision plus claire sur les interactions ioniques qui peuvent avoir lieu dans ces milieux extrêmes avec toute la complexité qui les caractérise (présence de gypse, calcaire, sels solubles, etc).

Perspectives d'application agronomique, environnementale et socioéconomique de cette étude

L'examen des résultats de cette étude, fait apparaître que l'apport des produits organiques est un moyen sûr et efficace pour assurer un niveau de production optimale des sols dégradés.

Un apport organique régulier sur ces sols pauvres s'avère donc une clé importante de l'augmentation de la production végétale, ce qui met bien l'accent sur la nécessité d'une optimisation du cycle des matières organiques au sein de l'exploitation, avec un recours éventuel, lorsque les conditions le permettent, à des sources exogènes de matières organiques.

Les informations obtenues de cette étude aideront à fournir des conseils sur la sélection des matières organiques pour l'amélioration du sol salé, tout en tenant compte des particularités pédoclimatiques de la région d'étude, de la nature du produit organique à apporter au sol et de l'objectif de l'agriculteur lui-même.

Ainsi, notre investigation fait ressortir en ce qui concerne les apports de carbone et d'azote tout l'intérêt économique de l'intégration rationnelle des résidus organiques pour la production végétale et le maintien ou l'amélioration du statut organique du sol et donc de sa fertilité, et ce en tenant compte, d'une multitude de facteurs d'ordres agronomique, écologique et socio-économique.

Sur le plan agronomique et écologique

Étant effectué dans des sols sahariens typiques, ce travail apporte des éléments de solution au problème de fertilité des sols. La gestion de ces dernières et la maîtrise de l'approvisionnement en intrants constituent donc des facteurs clés de l'intensification des cultures des sols salés en milieu aride pour parvenir à une augmentation de la production.

Devant les possibilités naturelles limitées d'augmenter le statut organique du sol dans l'agro-système saharien, dans la mesure où la sécheresse caractérisant le bioclimat de cet agro-système défavorise la production végétale, et par conséquent la part des matières organiques restituées au sol, l'agriculteur peut jouer donc, sur les vitesses de destruction de ces matières.

Dans ce cadre, nous recommandons de multiplier les surfaces destinées à la phoeniculture dans le but de créer un micro-climat (Écosystème *oasien*), susceptible de conserver la matière organique contre les aléas climatiques, et de la rendre plus accessible aux microorganismes plutôt qu'aux facteurs physico-chimiques. Dans le même cadre, il faudrait planter des arbres qui serviraient de brise-vent et de source d'énergie, influant sur le pédo-climat et permettant de conserver la matière organique dans le sol.

Dans les régions sahariennes, les sols salés présentent un grand risque de perte d'azote sous forme de nitrates et/ou sous forme d'ammoniac. Afin de minimiser ces pertes, nous recommandons ce qui suit :

- L'utilisation des inhibiteurs de nitrification synthétiques, pour réduire les pertes d'azote des sols en conservant l'azote minéral sous forme ammoniacale pendant les périodes où la disponibilité en azote nitrique n'est pas nécessaire. Ces inhibiteurs sont d'une grande nécessité pour les sols sableux à faible CEC faible (Fixation faible des ions NH_4^+ sur le complexe argilo-humique).
- Pour éviter les pertes en NH_3 gazeux très fréquentes en milieu saharien (forte alcalinité, températures élevées), il est recommandé de chercher d'obtenir une libération lente de celui-ci afin qu'il soit au fur et à mesure réutilisé par les végétaux et par les nitrificateurs. Dans ce but, on devrait se placer dans les conditions où le rapport C/N est élevé tel est le cas du fumier de bovins, caprins, fumier de dromadaires et les résidus de palmier dattier (Riches en cellulose et en lignine). Ces conditions pourraient être obtenues, soit par des apports fractionnés et régulés de matières organiques, soit en ajoutant à la fois de l'azote organique et un excès de carbone. D'autant plus, que cet excès de carbone permettra dans certaines conditions, le travail des fixateurs d'azote, par phases alternantes avec les ammonificateurs, d'où un gain supplémentaire en azote.

Par ailleurs, l'optimisation du taux d'application des apports organiques, doit être guidée par deux préoccupations principales. Tout d'abord, le taux d'application doit être suffisant pour répondre aux besoins nutritifs de la plante au moment des fortes exigences, tout en prenant en considération, de fournir aux agriculteurs des recommandations sur le taux d'application optimale, la période de l'apport et la manière d'épandage. En second lieu, l'application devrait être respectueuse de l'environnement sur le triple plan (préservation de la qualité du sol, de l'eau et de l'air).

Une bonne gestion de la fertilisation organique en conditions salines nécessite l'ajustement des doses de l'apport organique et des amendements aux besoins des cultures, en prenant en considération la valeur fertilisante du fumier considéré. Un intérêt particulier doit être apporté au fractionnement des apports organiques suivant les besoins de chaque stade phénologique de la plante envisagée. Il est indispensable de connaître que tout apport dépasse les besoins des cultures peut créer des problèmes agronomiques et/ou environnementaux notamment, en particulier s'il s'agit d'un fumier riche tel que, le fumier de volailles. À titre d'exemple, le problème d'épandage du fumier de volailles survient surtout lorsque les quantités épandues sont supérieures aux besoins des végétaux. Cela entraîne le lessivage des nitrates et la contamination des eaux souterraines. Dans ce cadre, l'apport de matière organique à rapport C/N élevé pourrait également être considéré comme moyen de contrôle de la pollution nitrique des eaux souterraines, si la reprise des phénomènes de transfert des nitrates, coïncide avec l'immobilisation maximale de l'azote. Cette

pratique permet d'immobiliser une partie de l'azote minéral résiduel et de diminuer ainsi le flux des nitrates vers la nappe.

En fait, c'est la fertilisation optimale qui doit être recherchée et non pas la fertilisation maximale.

Il est à signaler que les apports abusifs de fumier, quel que soit, leur origine peuvent à long terme conduire à la stérilisation du sol par l'augmentation de la salinité et de créer des risques de phytotoxicité et de pollution. La présence d'éléments traces métalliques (ETM, anciennement, métaux lourds) dans les fumiers peut provoquer des effets néfastes sur la santé humaine. Ces métaux peuvent s'accumuler dans le sol. Ils se retrouvent potentiellement tout au long de la chaîne alimentaire du sol, dans les nappes phréatiques et dans les plantes.

Afin d'atténuer ces contraintes, nous recommandons de renforcer les performances de traitement des produits organiques notamment, le recours à des procédés biologiques de stabilisation de la matière organique (Compostage), ce qui est en mesure de transformer ceux ci en produits stabilisés, peu odorants, à une très bonne valeur fertilisante pour les plantes.

Par ailleurs, l'utilisation de mélanges de produits avec l'idée d'ajouter les valeurs fertilisantes des uns avec les valeurs amendantes des autres est très probante. Cette piste d'étude semble prometteuse et peut être un outil à développer dans le cadre de l'amélioration des systèmes de culture. De ce fait, il semble dès lors important de penser à la combinaison entre les deux origines (végétale et animale) pour maximiser le bénéfice de cette combinaison dans l'amélioration du statut organique du sol salé.

En fait, des recherches supplémentaires devraient être menées pour optimiser à partir des données d'essais expérimentaux aux champs sur de longues durées, la proportion de mélange entre les résidus végétaux et animaux. En outre, l'intégration de l'origine végétale dans la stratégie de la fertilisation organique est très justifiable dans le but d'améliorer l'état humique du sol, que ce soit, dans des essais de plein champ ou dans une stratégie de compostage visant à accélérer la synthèse des composés humiques.

Cette combinaison mérite beaucoup d'attention, d'autant plus, que le fumier de ferme qui était traditionnellement utilisé comme principal apport organique dans l'agriculture devient de plus en plus cher et insuffisant pour augmenter tout seul le statut organique du sol en raison de leur faible teneur en précurseurs d'humus (Celluloses et lignine) comparativement aux résidus des végétaux.

Dans notre contexte saharien, la valorisation des sources locales de matière organique tels que les résidus de palmier dattier, réduit non seulement, les coûts de leur élimination hors palmeraies, mais produit également une alternative à leur incinération, ce qui est plus bénéfique à l'environnement.

La combinaison des fumures organiques et minérales peut crier de meilleures conditions de production pour les cultures. Cette combinaison, en dehors de ses effets nutritionnels, peut compenser les phénomènes d'immobilisation des éléments nutritifs par les microorganismes impliqués dans la minéralisation des intrants organiques.

Enfin, si la mise en valeur et la maintenance des sols salés sont conditionnées fondamentalement par l'apport organique, celui ci ne doit pas être une condition unique de mise en valeur. Il est à recommander de choisir les systèmes d'irrigation les plus économes et les plus adaptés aux conditions de la région (Cas du système d'irrigation localisée), la maîtrise des irrigations par des doses et des fréquences adéquates, l'installation d'un système de drainage adéquat. Une fois ces facteurs sont optimisés, le rôle de la fertilisation organique devient de plus en plus important et bénéfique.

Sur le plan socio-économique, il importe lors de l'emploi de la matière organique comme amendement ou engrais, d'en juger les incidences économiques et sociales locales sur le développement de l'agriculture. La vulgarisation de l'optimisation de l'utilisation des produits organiques et leur stabilisation dans le cadre d'un procédé de compostage nécessite des campagnes de vulgarisation et de communication avec les agriculteurs sur la base des résultats scientifiques fiables, consolidés par des fiches techniques spécifiques pour chaque culture et chaque région.

Cependant, si techniquement les apports organiques apparaissent nécessaires pour obtenir une production végétale importante, il reste à connaître la disponibilité des produits organiques et le coût engendré par leur utilisation. Les doses économiques optimales pour lesquelles l'utilisation des apports organiques est rentable dépendent surtout de la disponibilité des ressources. D'où l'importance de multiplier les recherches pour d'autres produits organiques locaux (disponibles) et de penser à intégrer l'élevage à l'agriculture à l'échelle de chaque exploitation agricole. À ce titre, il est intéressant d'entamer des études économiques détaillées afin de rentabiliser l'utilisation des produits organiques comme des fertilisants organiques en agriculture saharienne.

Enfin, les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont encourageants et ouvrent la voie vers la poursuite et l'approfondissement de ces premières expériences.

Ahmed, C.B., Rouina, B.B., Sensoy, S., Boukhriss, M., & Abdullah, F.B., (2010). Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *J. Agric. Food Chem.* (58), 4216-4222.

A.N.R.H., 2005. Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la wilaya de Ouargla,

Abd-el aziz, N. G., Mazher, A., & Mahgoub, M. (2011). Influence of using organic fertilizers on vegetative growth and flowering and chemical constituents of *Matthiola incana* plant growth under saline water irrigation. *World Journal of Agriculture Sciences*, 7(1), 47-54.

Abiven, S., Menasseri S., Chenu, C. (2008). The effects of organic input over time on soil aggregate stability – A literature analysis, *Soil Biol. Biochem.* 41, 1–12.

Abou El-Magd, M. M., Zaki, M. F., & Abou-Hussein, S. D. (2008). Effect of organic manure and different levels of saline irrigation water on growth, green yield and chemical content of sweet fennel. *Australian Journal of basic and applied sciences*, 2(1), 90-98.

Abou-Hussein, S.D. (1995). Studies on potato fertigation in newly reclaimed lands. Ph.D Thesis, Faculty of Agriculture, Ain Shams University, Cairo, Egypt.

Adden A.K. (2004). Evaluation quantitative de composts de biomasses diverses et leur phytotoxicité. Maîtrise. Université de Lomé. 44p.

Adekiya, A. O., & Agbede, T. M. (2016). Effect of methods and time of poultry manure application on soil and leaf nutrient concentrations, growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.

Adenawoola, A. R., & Adejoro, S. A. (2005). Residual effects of poultry manure and NPK fertilizer residues on soil nutrient and performance of jute (*Corchorus olitorius* L.). *Niger. J. Soil Sci*, 15, 133-135.

Adeniyi, O. N., & Ojeniyi, S. O. (2005). Comparative effectiveness of different levels of poultry manure with NPK fertilizer on residual soil fertility, nutrient uptake and yield of maize. *Moor Journal of Agricultural Research*, 4(2), 191-197.

Adeyemo, C. (2008). Effect of poultry manure on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of sorghum in southwest Nigeria. *Am. Eur. J. Sust. Agric.* 2(1):72-77.

AFNOR, 2005. Norme sur la méthode d'incubation en conditions contrôlées. Normalisation française XPU 44-163.

Agbede, T. M., & Adekiya, A. O. (2009). Tillage effects on soil properties and performance of sweet potato on an Alfisol in Southwestern Nigeria. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 3(3), 561-568.

Agrawal A.S., & Singh B.R., Kanehiro Y. (1980). Cultivation and soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 12, 29-33.

Agabriel, J. (2010). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux-Valeurs des aliments: Tables Inra 2010. Édition remaniée. Quae.

Ahmad, R., & Jabeen, N. (2009). Demonstration of growth improvement in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by the use of organic fertilizers under saline conditions. *Pak. J. Bot*, 41(3), 1373-1384.

- Ahmed, B. O., Inoue, M., & Moritani, S. (2010). Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat. *Agricultural Water Management*, 97(1), 165-170.
- Ahmed, B. O., Yamamoto, T., Rasiah, V., Inoue, M., & Anyoji, H. (2007). The impact of saline water irrigation management options in a dune sand on available soil water and its salinity. *Agricultural water management*, 88(1), 63-72.
- Ajithkumar, I. P., & Panneerselvam, R. (2013). Osmolyte accumulation, photosynthetic pigment and growth of *Setaria italica* (L.) P. Beauv. under drought stress. *Asian Pacific Journal of Reproduction*, 2(3), 220-224.
- Ajwa, H.A., & Tabatabai, M.A., (1994). Decomposition of different organic materials in soils . *Biology and Fertility of Soils*, 18 (3):175-182.
- Akroum C., (1985). Localisation et caractérisation de la matière organique des sols. Définition d'un modèle d'évolution. Thèse Doct, I.N.A, Paris, Grignon. 145 p.
- Alarcon J.J., Sanchez-Blanco M.J., Bolarin M.J., & Torrecillas A. (1994). Growth and osmotic adjustment of two tomato cultivars during and after saline stress. *Plant Soil*, Vol. 66: 75- 82.
- Albaladejo, J., Castillo, V., & Diaz, E. (2000). Soil loss and runoff on semiarid land as amended with urban solid refuse. *Land Degradation & Development*, 11(4), 363-373.
- Alburquerque, J. A., González, J., García, D., & Cegarra, J. (2007). Effects of a compost made from the solid by-product ("alperujo") of the two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrient content of ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology*, 98(4), 940-945.
- Al-Busaidi, K. T., Buerkert, A., & Joergensen, R. G. (2014). Carbon and nitrogen mineralization at different salinity levels in Omani low organic matter soils. *Journal of Arid Environments*, 100, 106-110.
- Alexander, M. ,(1994). Introduction to Soil Microbiology. John Wiley Eds. Library of congress catalog card number: 61-11512
- Alexander, M., (1982). Introduction to soil microbiology, 2^{ème} Edit. J.Wily and sons INC, 467 p.
- Alhagdow, M. M., Barthakur, N. N., & Donnelly, D. J. (1999). Salinity stress and sodium-potassium interactions in micropropagated potatoes. *Potato research*, 42(1), 73-78.
- Alkokaik, F. N., Khalil, A. I., & Alqumajan, T. (2011). Performance evaluation of a static composting system using date palm residues. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(6), 972-983.
- Al-Moshileh, A. M., & Motawei, M. I. (2005). Effect of biofertilization (chicken and pigeon manures) on growth and yield of potato under Central Saudi Arabia conditions. In *International Conference and Exhibition on Soilless Culture: ICESC 2005 742* (pp. 169-173).
- Al-Moshileh, A. R. M. M., El-Shinawy, M. Z., & Motawei, M. I. (2007). Evaluation of potato cultivars grown in Saudi Arabia by morphological characters and RAPD markers. *Sultan Qaboos University Research Journal-Agricultural and Marine Sciences*, 12, 35-42.

Al-Rawahy, S. A., Al-Dhuhli, H. S., Prathapar, S., & AbdelRahman, H. (2011). Mulching material impact on yield, soil moisture and salinity in saline-irrigated sorghum plots. *Inter. J. Agric. Res.*, 6(1), 75-81.

Álvarez, S., & Sánchez-Blanco, M. J. (2015). Comparison of individual and combined effects of salinity and deficit irrigation on physiological, nutritional and ornamental aspects of tolerance in *Callistemon laevis* plants. *Journal of plant physiology*, 185, 65-74.

Ammar, A.F.(1989). Plant growth in desert soils irrigated with sea water. Thèse El Azhar Univ 253 p.

Amujoyegbe, B. J., Opabode, J. T., & Olayinka, A. (2007). Effect of organic and inorganic fertilizer on yield and chlorophyll content of maize (*Zea mays* L.) and sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench). *African Journal of Biotechnology*, 6(16).

Amujoyegbe, B. J., Opabode, J. T., & Olayinka, A. (2007). Effect of organic and inorganic fertilizer on yield and chlorophyll content of maize (*Zea mays* L.) and sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench). *African Journal of Biotechnology*, 6 (16).

Andronov, E. E., Petrova, S. N., Pinaev, A. G., Pershina, E. V., Rakhimgalieva, S. Z., Akhmedenov, K. M., & Sergaliev, N. K. (2012). Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques. *Eurasian Soil Science*, 45(2), 147-156.

Annabi , M., (2004). Effets des apports d'origine urbaine sur les propriétés physiques des sols limoneux. Thèse de doctorat INA, Paris, 122p.

Annabi, B., Lachambre, M. P., Plouffe, K., Moumdjian, R., & Béliveau, R. (2009). Propranololadrenergic blockade inhibits human brain endothelial cells tubulogenesis and matrix metalloproteinase-9 secretion. *Pharmacological research*, 60(5), 438-445.

Annabi, M., Bahri, H., & Latiri, K. (2009). Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la Tunisie. *Base*.

Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., & Bissonnais, Y. L. (2007). Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 413-423.

Anne, P. (1945). Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron*, 2(1), 161-172.

Ano, A. O., & Agwu, J. A. (2006). Effect of animal manures on selected soil chemical properties (1). *Nigerian Journal of Soil Science*, 15(1), 14-19.

Arnon, D.I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta Vulgaris*, *Plant Physiol.* 24 ,1–15.

Arzani, A. (2008). Improving salinity tolerance in crop plants: a biotechnological view. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 44(5), 373-383.

Ashraf, M. (2009). Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotechnology advances*, 27(1), 84-93.

- Ashraf, M. Y., & Wu, L. (1994). Breeding for salinity tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 13(1), 17- 42.
- Ashraf, M., & Ali, Q. (2008) Relative membranep permeability and activities of some antioxidantenzymes as the key determinants of salttolerance in canola (*Brassica napus* L.).*Environ. Exp. Bot.* 63:266-273.
- Ashraf, M., & Foolad, M. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Asmalodhi, M. Arshad, F. Azam & Sajjad, M.H. (2009). Changes in mineral and mineralizable N of soil incubated at varying salinity, moisture and temperature regimes. *Pakistan Journal of Botany*, 41(2),pp: 967-980.
- Aubert C., Dole J.B., & Guingand N. (2010). Bonne pratiques environnementales en productions avicole, bovine et porcine : les choix techniques. pp 194.
- Aubert G., (1978). Méthodes d'analyse des sols .Edit: C.R.D.P., Marseille, 191 p.
- Aubert, G. (1960). Les sols de la zone aride: étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Coll. Généralités sur les problèmes des zones aide. Unesco, Paris, 30 p.
- Ayaba A., & Okicho B.M.,(1975). Paillage du sol pour améliorer et accroître la production végétale, bulletin pédologique de la F.A.O N° 27, Rome, pp: 105-115.
- Ayers R.S, & Westcot D.W. (1985). Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and drainage paper 29.174P. Rome, Italy.
- Ayers, R.S. & Westcot, D.W. (1976). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29, 1-96.
- Ayuso, M., Hernandez, T., Garcia, C., & Pascual, J. A. (1996). Biochemical and chemical-structural characterization of different organic materials used as manures. *Bioresource Technology*, 57(2), 201-207.
- Azam F., & Ifzal M. (2006). Microbial populations immobilizing NH₄-N and NO₃-N differ in their sensitivity to sodium chloride salinity in soil, *Soil Biol. Biochem.*38, 2491-2494.
- Azam, F., Müller, C., Weiske, A., Benckiser, G., & Ottow, J. (2002). Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 35(1), 54-61.
- Azeez, J. O., & Van Averbeke, W. (2010). Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *Bioresource technology*, 101(14), 5645-5651.
- Azeez, J. O., Van Averbeke, W., & Okorogbona, A. O. M. (2010). Differential responses in yield of pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) and nightshade (*Solanum retroflexum* Dun.) to the application of three animal manures. *Bioresource technology*, 101(7), 2499-2505.
- Bacyé, B., Moteau, R., & Feller, C. (1998). Decomposition d'une poudrette de fumier incorporée dans un sol sableux de versant et un sol argilo-limoneux de bas-fond en milieu soudano-sahélien (Burkina Faso). *Etude et Gestion des Sols*, 5, 83-92.

- Bachelier G., (1968). Contribution à l'étude de la minéralisation de carbone des sols. Edit: ORSTOM, Paris, 145p.
- Badiane, N. N. Y., Chotte, J. L., Pate, E., Masse, D., & Rouland, C. (2001). Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied soil ecology*, 18(3), 229-238.
- Bahri, H., Dignac, M. F., Rumpel, C., Rasse, D. P., Chenu, C., & Mariotti, A. (2006). Lignin turnover kinetics in an agricultural soil is monomer specific. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1977-1988.
- Baize D. et Jabiol B., 1995 - *Guide pour la description des sols*. Ed. AFESINRA,
- Bakayoko, S., Soro, D., Nindjin, C., Dao, D., Tschannen, A., Girardin, O., & Assa, A. (2009). Effects of cattle and poultry manures on organic matter content and adsorption complex of a sandy soil under cassava cultivation (*Manihot esculenta*, Crantz). *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(8), 190-197.
- Baldock, J. A., & Skjemstad, J. O. (2000). Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31(7), 697-710.
- Balesdent J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France, INRA, Paris, pp 245-260.
- Banu, M. N. A., Hoque, M. A., Watanabe-Sugimoto, M., Matsuoka, K., Nakamura, Y., Shimoishi, Y., & Murata, Y. (2009). Proline and glycinebetaine induce antioxidant defense gene expression and suppress cell death in cultured tobacco cells under salt stress. *Journal of Plant Physiology*, 166(2), 146-156.
- Bastianelli, D., Lescoat, P., Bouvarel, I., & Heryouet, C. (2007). Analyse des composés azotés des fumiers de volaille de chair par spectrométrie dans le proche infra-rouge (spir). Application à l'étude de la variabilité intra-et inter-élevage. *Septièmes Journées de la Recherche Avicole, Tours*, 59-63.
- Bastida, F., Kandeler, E., Moreno, J. L., Ros, M., García, C., & Hernández, T. (2008). Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*, 40(2), 318-329.
- Batra, L., & Manna, M. C. (1997). Dehydrogenase activity and microbial biomass carbon in salt-affected soils of semiarid and arid regions. *Arid Land Research and Management*, 11(3), 295-303.
- Bauder, J. W. & Brock, T. A. 2001. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching. *Arid Land Research and Management*, 15 (2), 101-113.
- Baumann, K., & Marschner, P. 2011. Effects of salinity on microbial tolerance to drying and rewetting *Biogeochemistry* DOI 10.1007/s10533-011-9672-1
- Benavides, M.P., & Marconi, P.L., Gallego, S.M., Comba, M.E., Tomaro, M.L., 2000. Relationship between antioxidant defence systems and salt tolerance in *Solanum tuberosum*. *Aust. J. Plant Physiol.* 27, 273–278.

- Bernal, M. P., Sanchez-Monedero, M. A., Paredes, C., & Roig, A. (1998). Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 69(3), 175-189.
- Birch, H. F. , (1958). The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability . *Plant and soil*, 10 (1), 9-31.
- Blagodatsky, S. A., Heinemeyer, O., & Richter, J. (2000). Estimating the active and total soil microbial biomass by kinetic respiration analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 32(1), 73-81.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Bernoux, M., Brauman, A., Chotte, J. L., Feller, C., & Sall, S. (2007). Organic matter and biofunctioning in tropical sandy soils and implications for its management.
- Bockman, O. C., Kaarstad, O., Lie, O. H., & Richards, I. (1990). *Agriculture et fertilisation: Les engrais, leur avenir*. Norsk Hydro. Division Agriculture.
- Bojović, B. M., & Stojanović, J. (2005). Chlorophyll and carotenoid content in wheat cultivars as a function of mineral nutrition. *Archives of Biological Sciences*, 57(4), 283-290.
- Bolan, N., Adriano, D., & Mahimairaja, S. (2004). Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34(3), 291-338.
- Bonneau M.,& Souchier B. (1979). Constituants et propriétés du sol. Edit, Masson et Cie, Paris, 459 p.
- Bossio, D., Critchley, W., Geheb, K., Van Lynden, G., Mati, B., (2007). Conserving Soil - Protecting Water. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture:
- Boudy P. ,(1952) . Guide du forestier en Afrique du nord. Ed. Librairie agricole, Paris, 428 p.
- Bradford, G. R., Page, A. L., Lund, L. J., & Olmstead, W. (1975). Trace element concentrations of sewage treatment plant effluents and sludges; their interactions with soils and uptake by plants. *Journal of Environmental Quality*, 4(1), 123-127.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). Soil water: Characteristics and behavior. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, New Jersey, 177-217.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). Soil water: Characteristics and behavior. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, New Jersey, 177-217.
- Bremner, J.M. , & Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen-total. In: AL-Page, R.H. Miller and D.R. Keeny (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part2: Chemical and Microbiological Properties*, Agronomy MonographNo. 9, 2nd edition, pp: 595–622. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Büßis, D., & Heineke, D. (1998). Acclimation of potato plants to polyethylene glycol-induced water deficit II. Contents and subcellular distribution of organic solutes. *Journal of Experimental Botany*, 49(325), 1361-1370.
- Bois, G. (2005). Écophysiologie de semis de conifères ectomycorhizés en milieu salin et sodique (Doctoral dissertation, Université Laval). 187p.

- Bustan, A., Sagi, M., De Malach, Y., & Pasternak, D. (2004). Effects of saline irrigation water and heat waves on potato production in an arid environment. *Field Crops Research*, 90(2), 275-285.
- Caballero, JI., Verduzco CV., Galan J., & Jimenez ESD. (2005). Proline accumulation as a symptom of drought stress in maize: A tissue differentiation requirement. *J. Exp. Bot.* 39: 889-897.
- Cai, Q. Y., Mo, C. H., Wu, Q. T., Zeng, Q. Y., & Katsoyiannis, A. (2007). Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 1063-1072.
- Calderon, F.J., G.W. McCarty, J.A. Van Kassel & Reeves, J.B. (2004). Carbon and nitrogen dynamic during incubation of manured soil. *Soil Sci. Soc. American J.*, 68: 1592–1599
- Calvet R., (2003). Le sol propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, Tome 1. Edit. France Agricole. 455p.
- Campbell, C. A., Leyshon, A. J., Zentner, R. P., LaFond, G. P., & Janzen, H. H. (1991). Effect of cropping practices on the initial potential rate of N mineralization in a thin Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 71(1), 43-53.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Okorokova-Façanha, A. L., & Façanha, A. R. (2002). Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiology*, 130(4), 1951-1957.
- Carter , B., & Chareau, C. (1975). Matière organique et propriétés biochimiques du sol dans la zone tropicale sèche d’Afrique occidentale, Bul, pédologique de la FAO, Rome. 27, 305-323.
- Carter M.R. (1993). Soil sampling and methods of analysis . Can. Soc. Soil sci. Ottawa. Ontario. CANADA. Lewis Publieshers. 507 - 511.
- Castany, G. (1982). Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal. Bull. BRGM 2 III, Vol. 2, 127-167.
- Catalisano, A. (1986). Le désert saharien, Ed. Bruno Masson et Cie, Paris, 127p.
- Celik, I., Ortas, I., & Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 59-67.
- Chabaliere F.P., & De kherchove V , Marcary H. S. (2006). Guide de la fertilisation organique à la réunion. 301p.
- Chadwick, D. R., John, F., Pain, B. F., Chambers, B. J., & Williams, J. (2000). Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *The Journal of Agricultural Science*, 134(02), 159-168.
- Chamani, E., Joyce D.C., & Reihanytabar A. (2008). Vermicompost effects on the growth and flowering of *Petunia hybrida* ‘Dream Neon Rose’. *Am-Euras. J. Agric. & Environ. Sci.* 3(3), 506-512
- Chambers JM., (1992) . Linear models Statistical Models Ed S. Wadsworth &Brooks/Cole, pp 197-216.

- Chao, C. C. (1993). Nitrification and nitrifying potential of tropical and subtropical soils. *Biology and fertility of soils*, 15(2), 87-90.
- Chao, W. L., Gan, K. D., & Chao, C. C. (1993). Nitrification and nitrifying potential of tropical and subtropical soils. *Biology and fertility of soils*, 15(2), 87-90.
- Chareau, C. (1975). Matière organique et propriétés biochimiques du sol dans la zone tropicale sèche d'Afrique occidentale, Bul, pédologie de la FAO, n0 27, Rome, pp 305-323.
- Chaussod, R. (1996). La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Étud. Gestion Sols*, 3, 261-277.
- Chaussod, R., Nicolardot, B., Catroux, G., & Chretien, J. (1986). Relations entre les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques de quelques sols cultivés. *Science du sol*, (2), 213-226.
- Chehma, A., Gaouar, A., Semadi, A., & Faye, B. (2004). Productivité fourragère des parcours camelins en Algerie cas des paturages a base de «drinn» *Stipagrostis pungens* (Desf.). *Sciences & Technologie C*, (21), 45-52.
- Chen, J., Zhang, Y., Wang, C., Lü, W., Jin, J. B., & Hua, X. (2011). Proline induces calcium-mediated oxidative burst and salicylic acid signaling. *Amino acids*, 40(5), 1473-1484.
- Chen, Y., Aviad, T. (1990). Effects of humic substances on plant growth. *Humic substances in soil and crop sciences: Selected readings*, (humicsubstances), 161-186.
- Cheverry, C. (1994). La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Etude et gestion des sols*, 1, 7-21.
- Chibane, A. (1999). La pomme de terre. Transfert de technologie en agriculture, M.A.D.R.P.M. <http://www.agrimaroc.net/bul52.htm>
- Chotte, J. L., Schwartzmann, A., Bally, R., & Monrozier, L. J. (2002). Changes in bacterial communities and Azospirillum diversity in soil fractions of a tropical soil under 3 or 19years of natural fallow. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(8), 1083-1092.
- Choudhary, O. P., Josan, A. S., Bajwa, M. S., & Kapur, M. L. (2004). Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions. *Field Crops Research*, 87(2), 103-116.
- Chowdhury, N., Marschner, P., & Burns, R. (2011). Response of microbial activity and community structure to decreasing soil osmotic and matric potential. *Plant and Soil*, 344(1-2), 241-254.
- Clark, G. J., Dodgshun, N., Sale, P. W. G., & Tang, C. (2007). Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2806-2817.
- Collignon, N., 2004, Etude de la dessiccation de produits organiques fermentescibles. Rapport
- Combe, L., & Picard, D. (1994). *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles*. Editions Quae.

- Cook, B. D., & Allan, D. L. (1992). Dissolved organic carbon in old field soils: total amounts as a measure of available resources for soil mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(6), 585-594.
- Core Team . (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Cornet, A. (1961). Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, 108p.
- Cornet, A., & Gouscov, N. (1952). Les eaux de Crétacé inférieur continental dans le Sahara Algérien (nappe dite "Albien"). In: "La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie". 19^{ème}. Congrès géologique international. T. II, 30p.
- Costa, C., Dwyer, L. M., Dutilleul, P., Stewart, D. W., Ma, B. L., & Smith, D. L. (2001). Interrelationships of applied nitrogen, SPAD, and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1173-1194.
- Cote M., 1998. Des oasis malades de trop d'eau. *Sécheresse*, 9 (2), 123 – 130
- Côté, D., Grenier, M., & Gasser, M. O. (2006). Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des effluents d'élevages de poulettes et de poules pondeuses: rapport de recherche à l'attention du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec,
- Cooper-Driver, G. A., & Bhattacharya, M. (1998). Role of phenolics in plant evolution. *Phytochemistry*, 49(5), 1165-1174.
- Coutinet S., (1965) .Méthodes d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. Analyse d'eaux. Agronomie tropicale. Ed. IRATCV, Paris: 1242-1253.
- CPCS. Classification française des sols , NRA. Paris 1967.
- Cuin, T. A., & Shabala, S. (2005). Exogenously supplied compatible solutes rapidly ameliorate NaCl induced potassium efflux from barley roots. *Plant and Cell Physiology*, 46(12), 1924-1933.
- Cuin, T. A., Miller, A. J., Laurie, S. A., & Leigh, R. A. (2003). Potassium activities in cell compartments of salt-grown barley leaves. *Journal of Experimental Botany*, 54(383), 657-661.
- Curtin, D., Selles, F., Wang, H., Campbell, C.A., & Biederbeck, V.O., (1998). Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1035–1041.
- D.P.A.T. (2010). Direction de Planification et l'aménagement de Territoire de Ouargla. Annuaire statistique de la wilaya de Ouargla
- Daneshmand, F., Arvin, M. J., & Kalantari, K. M. (2010). Physiological responses to NaCl stress in three wild species of potato in vitro. *Acta physiologiae plantarum*, 32(1), 91-101.
- Daoud, y. (1983) .Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre du Haut-Chelif! (Algérie). Thèse Doct-Ing. ENSA Université de Rennes, 194 p.
- Daoud, Y., & Halitim , A. (1994) . Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse* 5 (3), pp 151-160.

- Davet, P.,(1996). La vie microbienne dans le sol et la production végétale, INRA, Edit. Paris, 383 p.
- Delas, J., Juste C., & Goulas, J. P. (1973). Matières organiques et fertilité des sols. Contribution à l'étude des effets de la matière organique sur les rendements et la qualité des récoltes ainsi que sur l'évolution du milieu. Bull. Tech. Inf., Min. Agric., 285, 841-855.
- Delas,J. (1971). Evolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apports massifs et répétés de matières organiques dedifférentes origines. Ann. agron., 22, 585-610.
- Delgado, M., Rodriguez, C., Martin, J. V., de Imperial, R. M., & Alonso, F. (2012). Environmental assay on the effect of poultry manure application on soil organisms in agroecosystems. *Science of the total environment*, 416, 532-535.
- Dellal, A., & Halitim, A. (1992). Activités microbiologiques en conditions salines: cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie). *Cahiers Agricultures*, 1(5), 335-340.
- Dellal, A., (1994). Réactivité physicochimique, fonctionnement physiologique et microbiologique en conditions salines .Thèse Doct. ENASA de Rennes, 219p.
- Demir, K., Sahin, O., Kadioglu, Y. K., Pilbeam, D. J., & Gunes, A. (2010). Essential and non-essential element composition of tomato plants fertilized with poultry manure. *Scientia horticulturae*, 127(1), 16-22.
- Demolon ,A., 1968. Principe d'agronomie, croissances des végétaux cultivés. Edit: Dunod, Paris, 576 p.
- Diacono, M.,&Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(2), 401-422.
- Dianou, D., & Thiombiano , L. 1995. Variabilité de l'activité biologique des états de surface des sols de Katchari en milieu désertifié au Burkina Faso. INRA. Documents techniques 3. 9 p.
- Dlamini, P., Chivenge, P., Manson, A., & Chaplot, V. (2014). Land degradation impact on soil organic carbon and nitrogen stocks of sub-tropical humid grass lands in South Africa. *Geoderma*, 235, 372-381.
- D'Odorico,P., & Ravi, S. (2015). Land Degradation and Environmental Change. In: Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters.(Edi R. Sivanpillai and J.F.Shroder), pp. 219–227, Elsevier.
- Dommergues, Y. R. M., Dommergues, F. Y. R., & Mangenot, F. (1970). Ecologie microbienne du sol Masson et Cie Editeurs, Paris, 796 p .
- Dorado J., Zancada M.C., Almendros G., &López-Fando C. (2003) Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure and crop residues in dryland farming system,J. Plant Nutr. Soil Sc. 166, 31–38.
- Dordas, C. A., & Sioulas, C. (2008). Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use , efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. *Industrial Crops and Products*, 27(1), 75-85.

- Drahorad ,S., Felix-Henningsen, P., Eckhardt, K. U., & Leinweber, P. (2013). Spatial carbon and nitrogen distribution and organic matter characteristics of biological soil crusts in the Negev desert (Israel) along a rainfall gradient *Journal of Arid Environments* 94 .18-26.
- Dridi, B., & Toumi, C. (1999). Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. *Étud. Gestion Sols*, 6 (1), 7-14.
- Dridi, S., Romdhane, M. S., & Elcafsi, M. H. (2007). Seasonal variation in weight and biochemical composition of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* in relation to the gametogenic cycle and environmental conditions of the Bizert lagoon, Tunisia. *Aquaculture*, 263(1), 238-248.
- DSA (2009).Annuaire statistique agricoles (2009). Direction des services Agricoles.
- Dubost, D.,& Moguedet, G. (2002). La révolution hydraulique dans les oasis impose une nouvelle gestion de l'eau dans les zones urbaines. *Méditerranée* 3.4, 15 - 20.
- Duchaufour, PH. (1977).Pédologie, Tome I pédogenèse et classification, Edit: Masson et Cie, 28-67 p.
- Duchaufour, PH. (1980). Ecologie de l'humification et pédogenèse des sols forestiers in pesson (P), Edit ,Gautiers ,Villars , pp 177-200.
- Duchaufour, PH. (1985). La fertilité du sol: le point de vue du forestier. Le point de vue de l'agronome. *Comptes Rendus des Seances de l'Academie d'Agriculture de France*.
- Duchaufour, PH.(1997). Abrégé de pédologie .Sol, végétation, environnement .5^{ème} Edit. Coll. Enseignement des sciences de la Terre .Masson , Paris .291p.
- Durand, JH., 1983 . Les sols irrigables. Paris : Presses universitaires de France, 322 p.
- Dutil, P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse Doct. Es Sci. Naturelles, Univ. Strasbourg, Strasbourg, 346 p.
- Eigenberg, R.A., Doran, J.W., Nienaber, J.A., Ferguson, R.B., Woodbury, B.L., 2002. Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and cover crop. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88, 183–193.
- El Jaafari, S. (1993). Contribution à l'étude des mécanismes biophysiques et biochimiques de résistance à la sécheresse chez le blé.Thèse de doctorat.Univ.Gembloux.Belgique: 214p.
- El majdoub, B. & Marschner, P. (2015). Responses of soil microbial activity and biomass to salinity after repeated additions of plant residues. *Pedosphere*. 25(2): 177-185.
- El majdoub, B., & Marschner, P. (2013). Salinity reduces the ability of soil microbes to utilise cellulose. *Biology and fertility of soils*, 49(4), 379-386.
- Eleiwa Mona, E., Brahim, Manal, S. A., & Mohamed, F. (2012). Combined effect of NPK levels and foliar nutritional compounds on growth and yield parameters of potato plants (*Solanum tuberosum L.*) *African Journal of Microbiology Research*. 6 (24), 5100-5109.
- Elliott, L.F., & Lynch, J.M. (1994). Biodiversity and soil resilience. In: Greenland, D.J., Szabolc, I. (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Land use*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 353–364.

- El-Missery, M. M. A. (2003). *Effect of organic fertilization on yield and quality of some vegetable crops under saline conditions* (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis. Faculty of Agriculture, Ain Shams University, Cairo. Egypt).
- El-Shakweer, M. H. A., El-Sayad, E. A., & Ewees, M. S. A. (1998). Soil and plant analysis as a guide for interpretation of the improvement efficiency of organic conditioners added to different soils in Egypt. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 29(11-14), 2067-2088.
- El-Tantawy, I. M., El-Ghamry, A. M., & Habib, A. H. (2009). Effect of chicken manure and manure compost tea on potato yield and soil fertility. *J. Agric. Sci*, 34, 659-668.
- Emberger L., 1955. Projet d'une classification biologique des climats. L'année biologique, 3^{ème} série. T. 31 : 255-294.
- Empadinhas, N., & da Costa, M. (2008). Osmoadaptation mechanisms in prokaryotes: distribution of compatible solutes. *International Microbiology*, 11(3), 151-161.
- Eneji, A. E., Honna, T., Yamamoto, S., Saito, T., & Masuda, T. (2002). Nitrogen transformation in four Japanese soils following manure+ urea amendment. *Communications in soil science and plant analysis*, 33(1-2), 53-66.
- Enwall, K., Nyberg, K., Bertilsson, S., Cederlund, H., Stenström, J., & Hallin, S. (2007). Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(1), 106-115.
- Epstein, E. L., Taylor, J. M., & Chancy, R. L. (1976). Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality*, 5(4), 422-426.
- Epstein, E.. (1998) How calcium enhances plant salt tolerance. *Science* 280:1906-1907.
- FAO (1998). World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports. Food and Agricultural Organization, Rome, p. 98.
- FAO (2006) .World Reference Base for Soil Resources. A Framework for International Classification, Correlation and Communication. FAO, Roma, 145 pp.
- FAO (2008). Potato2008@fao.org (www.potato2008.org)
- FAO. (2009). Nourrir le monde, éliminer la faim. Sommet mondial sur la sécurité alimentaire, FAO, Rome, 16-18 novembre 2009.
- Faye, B., (1997). Guide de l'élevage du dromadaire. Editions SANOFI. Santé Nutrition animale. 126 p.
- Fayed, T. A. (2010). Response of four olive cultivars to common organic manures in Libya, American-
- Eurasian J. Agric. & Environ. Sci, 8 (3) , 275-291.
- Feller, C. (1994). La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1: 1: recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique (Doctoral dissertation).

- Feller, C., & Beare, M. H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79(1), 69-116.
- Fenn, L.B., R.M. Taylor, M.I. Binzel & Burks, C.M. (1991). Calcium stimulation of ammonium absorption in onion. *Agron. J.*, 83, 840-843.
- Fernández-Luqueño F., Reyes-Varela V., artínez-Suárez C., Salomón- Hernández G., Yáñez-Meneses J., Ceballos-Ramírez J.M. and Dendooven L. (2010). Effect of different nitrogen sources on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biores. Technol.* 101: 396-403.
- Figarol, M., (2001). Bien valoriser les fumiers de volailles. La France Agricole numéro 2916.
- Flowers, T. J., & T.D. Colmer. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytol.* 179: 945–963.
- Flowers, T. J., & Yeo, A. R. (1995). Breeding for salinity resistance in crop plants: where next?. *Functional Plant Biology*, 22(6), 875-884.
- Food and Agriculture Organisation, 2010. FAOSTAT database. <http://www.fao.org2010> Available from.
- Frankenberger, W.T.,& Bingham, F.T.(1982). Influence of salinity on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal* 46, 1173–1177.
- Fraser, H., (2001).Les caractéristiques du fumier ministère de l'agriculture. Fiche technique, 7p.
- Gadallah, M. A. A. (1995). Effect of water stress, abscisic acid and proline on cotton plants. *Journal of Arid Environments*, 30(3), 315-325.
- Gaffar, M.O., Ibrahim, Y.M., & Wahab D.A.A., (1992). Effect of farmyard manure and sand on the performance of sorghum and sodicity of soils, *J. Ind. Soc. Soil Sci.* 40, 540–543 .
- Gallali, T. (1980). Transfert sels- matière organique en zones arides méditerranéennes. Thèse Doct., INPL, Nancy, 202p.
- Garcia, C., Hernandez, T., Pascual, J. A., Moreno, J. L., & Ros, M. (2000). Microbial activity in soils of SE Spain exposed to degradation and desertification processes. Strategies for their rehabilitation. *Research and perspectives of soil enzymology in Spain. CEBAS-CSIC, Spain*, 93-143.
- Garcia-Gil, C. Plaza, P. Soler-Rovira & Polo, A. (2000). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbialbiomass, *Soil Biol. Biochem.* 32 (2000) 1907–1913.
- García-Gil, J. C., Plaza, C., Senesi, N., Brunetti, G., & Polo, A. (2004). Effects of sewage sludge amendment on humic acids and microbiological properties of a semiarid Mediterranean soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39(5), 320-328.
- Gardi, R., (1973). Sahara. Ed: Kummerly et Frey, Paris, 3ème edition. pp. 49-51.
- Gausson H. (1955). Détermination des climats par la méthode des courbes ombrothermiques, *C.r Acad.Sc.*, 240 p.

- Ghassemi, F., Jakeman, A.J., and Nix, H.A., (1995). Salinisation of land and waterresources: Human causes, extent, management and case studies: Wallingford, UK, CAB International, 544 p.
- Ghoulam, C., Foursy, A., & Fares, K. (2002). Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and experimental Botany*, 47(1), 39-50.
- Gilley, J. E., & Eghball, B. (2002). Residual effects of compost and fertilizer applications on nutrients in runoff. *Transactions of the ASAE*, 45(6), 1905.
- Gilley, J. E., & Risse, L. M. (2000). Runoff and soil loss as affected by the application of manure. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1583.
- Girija, C., Smith, B. N., & Swamy, P. M. (2002). Interactive effects of sodium chloride and calcium chloride on the accumulation of proline and glycinebetaine in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 47(1), 1-10.
- Giroux, M., & Audesse, P. (2004). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15(2), 107-110.
- Glenn, E.P., Brown J.J., & Blumwald E. (1999). Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Crit. Rev. Pl. Sci.*, 18, 227-255.
- Gobat J.M., Aragno M., & Matthey W. (2003). Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Edit. Presses polytechniques et universitaires romandes. 571P.
- Gobat, J., Aragno M., & Matthey W., (1998). Le sol vivant, base de pédologie, biologie des sols, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 519 p.
- Gobinathan, P., Murali, P. V., & Panneerselvam, R. (2009). Interactive effects of calcium chloride on salinity-induced proline metabolism in *Pennisetum typoides*. *Advances in Biological Research*, 3(5-6), 168-173.
- Goering, H. K., & Van Soest, P. J. (1970). Forage Fiber Analyses (Apparatus, Reagents, Procedures, and Some Applications). In: *Agric. Handbook No. 379. Jacket No. 387-598. ARS-USDA, Washington, DC.*
- Goldberger, J.R. (2008). Diffusion and adoption of non-certified organic agriculture: a case study from semi-arid Makueni District, Kenya. *J. Sustain. Agric.* 32 (4), 597–609.
- González-Ubierna, S., Jorge-Mardomingo, I., Carrero-González, B., de la Cruz, M. T., & Casermeiro, M. Á. (2012). Soil organic matter evolution after the application of high doses of organic amendments in a Mediterranean calcareous soil. *Journal of Soils and Sediments*, 12(8), 1257-1268.
- Grandy, A. S., Porter, G. A., & Erich, M. S. (2002). Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1311-1319.
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1998). Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1), 127-157.

- Grattan, S. R., Grieve, C. M., Poss, J. A., Robinson, P. H., Suarez, D. L., & Benes, S. E. (2004). Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems: III. Potential implications for ruminant mineral nutrition. *Agricultural water management*, 70(2), 137-150.
- Grattan, S. R., Grieve, C. M., Poss, J. A., Robinson, P. H., Suarez, D. L., & Benes, S. E. (2004). Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems: III. Potential implications for ruminant mineral nutrition. *Agricultural water management*, 70(2), 137-150.
- Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. *Annual review of plant physiology*, 31(1), 149-190.
- Gregorich, E. G., Beare, M. H., McKim, U. F., & Skjemstad, J. O. (2006). Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 70(3), 975-985.
- Grieve, C. M., & Shannon, M. C. (1999). Ion accumulation and distribution in shoot components of salt-stressed Eucalyptus clones. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(5), 559-563.
- Grissa, H., & Ben khedir M., (2000). Principes de base de l'agriculture biologique centre technique de l'agriculture biologique. 33p.
- Gros.A., (1979). Engrais : guide pratique de fertilisation, la maison rustique, 75006, Paris, 382 p.
- Guendouz A., Reghis Z., Moulla A.S., 1992. Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Rapport N° 1, 65 p.
- Gueydon C., 1992. Variations de la valeur fertilisante des fumiers et lisiers de bovins. Influence de la complémentation, du niveau de production et du type de déjections animales. 71p.
- Gulser, C., Demir, Z., & Ic, S. (2010). Changes in some soil properties at different incubation periods after tobacco waste application.
- Gobinathan, P., Murali, P. V., & Panneerselvam, R. (2009). Interactive effects of calcium chloride on salinity-induced proline metabolism in Pennisetum typhoides. *Advances in Biological Research*, 3(5-6), 168-173.
- Gupta, G., Borowiec, J., & Okoh, J. (1997). Toxicity identification of poultry litter aqueous leachate. *Poultry science*, 76(10), 1364-1367.
- Ha, KV, Marschner, P, & Bünemann, EK. (2008). Dynamics of C, N, P and microbial community composition in particulate soil organic matter during residue decomposition. *Plant Soil*, 303: 253-264.
- Hachicha, M., 2007. Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sécheresse* 18 (1), pp. 45–50.
- Hafsi, C., Lakhdhar, A., Rabhi, M., Debez, A., Abdelly, C., & Ouerghi, Z. (2007). Interactive effects of salinity and potassium availability on growth, water status, and ionic composition of *Hordeum maritimum*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(4), 469-473.
- Hagemann, M. (2011). Molecular biology of cyanobacterial salt acclimation. *FEMS microbiology reviews*, 35(1), 87-123.

- Hagemann, M. (2011). Molecular biology of cyanobacterial salt acclimation. *FEMS Microbiology Reviews*, 35(1), 87-123.
- Hahn, A. S., & Quideau, S. A. (2013). Long-term effects of organic amendments on the recovery of plant and soil microbial communities following disturbance in the Canadian boreal forest. *Plant and Soil*, 363(1-2), 331-344.
- Halilat, M. T., & Tessier, D. (2006). Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite. *Cahiers Agricultures*, 15(4), 347-353.
- Halitim A., (1988) . Sols des régions arides d'Algérie. O.P.U., Alger, 384 p.
- Halitim, A. (2011). Aridoculture et le développement durable. Algerian journal of arid environment 3 vol. 1, N° 1, Janvier: 3-9.
- Halitim, A., & Robert, M. (1992) .Genese of gypseous and calcareous formations in aride zone (Algérie). Dynamics and effects in soil properties. Worskhop on gypseous soils. Aleppo : Icarda-Fao ; 11 p .
- Hamdi Aïssa, B. (2001). Fonctionnement actuel et passé de sols du Nord du Sahara (cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique et minéralogique et variabilités spatiale. Thèse de doctorat, Institut National d'Agronomie Paris-Grignon (France), 310p.
- Hamdy, A. (2002). Saline irrigation management for a sustainable use. *Advances in soil salinity and drainage management to save water and protect the environment*, 253-304.
- Hamdy, A., (2000). Sustainable use and management of non-conventional water resources in the arid regions. In *International Symposium on Techniques to Control Salination for Horticultural Productivity 573* (pp. 159-174).
- Hamdy, A., Gadalla, A. M., El-Kholi, A. F., Galal, Y. G. M., & Ismail, M. M. (2008). Yield and Nitrogen Assimilation of Potato Varieties (*Solanum tuberosum* L.) as Affected by Saline Water Irrigation and Organic Manure.
- Hannachi, C., Debergh, P., Zid, E., Messaï, A., & Mehouchi, T. (2004). Tubérisation sous stress salin de vitroplants de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, 8(1), 9-14.
- Hanson, J.B., 1984. The function of calcium in plant nutrition. In: Tinker, P.B., Lauchi, A. (Eds.), *Adv. Plant Nutr.*, vol. 1. Praeger, NY, USA, pp. 149–208.
- Haouala, F., Ferjani, H., & El Hadj, S. B. (2007). Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na⁺, K⁺ et Ca²⁺) et du chlore (Cl⁻) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais du chiendent. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11(3). 235 -244.
- Harris, R.F. (1980). Effect of water potential on microbial growth and activity. Special Edition 9. In:
- Hartl, W., & Erhart, E. (2002). Effects of potassium carbonate as an alternative road de-icer to sodium chloride on soil chemical properties. *Annals of applied biology*, 140(3), 271-277.
- Hassani, A., Dellal, A., Belkhodja, M., & Kaid-Harche, M. (2008). Effet de la salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare*). *Eur. J. Sci. Res*, 23(1), 61-69.

- Hassine, A. B., Ghanem, M. E., Bouzid, S., & Lutts, S. (2008). An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. *Journal of Experimental Botany*, 59(6), 1315-1326.
- Hawkins, H. J., & Lips, S. H. (1997). Cell suspension cultures of *Solanum tuberosum* L. as a model system for N and salinity response effect of salinity on NO₃⁻ uptake and PM-ATPase activity. *Journal of plant physiology*, 150(1), 103-109.
- Haynes, R. J., & Naidu, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(2), 123-137.
- Henin S., Gras R., & Monnier G.(1969). Le profil cultural. État physique du sol et ses conséquences agronomique. Edit. Masson, Paris, 321p.
- Heuer, B. (2003). Influence of exogenous application of proline and glycinebetaine on growth of salt-stressed tomato plants. *Plant Science*, 165(4), 693-699.
- Heuer, B., & Nadler, A. (1995) .Growth and development of potatoes under salinity and water deficit, *Aust. J. Agric. Res.*46 1477–1486.
- Horswill, P., O'Sullivan, O., Phoenix, G. K., Lee, J. A., & Leake, J. R. (2008). Base cation depletion, eutrophication and acidification of species-rich grasslands in response to long-term simulated nitrogen deposition. *Environmental Pollution*, 155(2), 336-349.
- Huang, G. F., Wu, Q. T., Wong, J. W. C., & Nagar, B. B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresource Technology*, 97(15), 1834-1842.
- ITCMI, (2010). Fiche techniques valorisée des cultures maraîchères et Industrielles, La culture de pomme de Terre.10p.
- Jaarsma, R., de Vries, R. S., & de Boer, A. H. (2013). Effect of salt stress on growth, Na₊ accumulation and proline metabolism in Potato (*Solanum tuberosum*) cultivars. *PloS one*, 8(3), e 60183.
- Jacquin, F., Cheloufi, H., Sulce S., & Vong P.C. (1991). Cinétique d'immobilisation d'énergie azoté conséquences agronomique et environnementales. Actes de séminaire organise, pp: 209-222.
- Jalali, M., & Merrikhpour, H. (2008). Effects of poor quality irrigation waters on the nutrient leaching and groundwater quality from sandy soil. *Environ. Geol.* 53, 1289–129
- Jalali, M., & Ranjbar, F. (2009). Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. *Geoderma*. 153, 194-204.
- Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(5), 435-458.
- Jarrige, R., Grenet, E., Demarquilly, C., & Besle, J. M. (1995). Les constituants de l'appareil végétal des plantes fourragères. Nutrition des Ruminants Domestiques - Ingestion et digestion, Ed. INRA, Ch. 2, 25-81.

- Ji-ping, S, Z. Fu-dao, & Bao,L. (2002). Effects of long-term located fertilization on the physico-chemical property of soil humus. *Ag. Sci. China.* 1:424-431.
- Jorge-Mardomingo, I., Soler-Rovira, P., Casermeiro, M. Á., de la Cruz, M. T., & Polo, A. (2013). Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments. *Geoderma*, 206, 40-48.
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., VanZwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J., & Amonette, J.E. (2010). An investigation into the reactions of biochar in soil. *Aust.J. Soil Res.* 48, 501–515.
- Jouraihy, A., Amir, S., El Gharous, M., Revel, J. C., & Hafidi, M. (2005). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 56(2), 101-108.
- Juste C., & Spallacci P. (1991). European conference. Environment, Agriculture, stock farming in Europe Mantua (ITALY). Effect of animal effluent applications on soil behavior. Report of working group 2.2.
- Kahle, P., Belau, L., & Boelcke, B. (2002). Effects of 10 years of *Miscanthus* cultivation on different properties of mineral soil in North-east Germany. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 188(1), 43-50.
- Kahlon, U. Z., Murtaza, G., & Ghafoor, A. (2012). Amelioration of Saline-sodic Soil with Amendments using Brackish Water, Canal Water and their Combination. *International Journal of Agriculture & Biology*, 14(1).
- Kaira, Y.P., & Maynard, D.G., (1991). Method Manual for Forest Soil and Plant Analysis. For. Can., Northwest Reg., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-319.
- Kalra, Yash. , (1997). Handbook of reference methods for plant analysis. CRC Press. Kalra, Y. (Ed.). (1997). Handbook of reference methods for plant analysis. CRC Press.
- Kalyani M., Ramteke D.S., Paliwal L.J., Narendra K., & Naik C. (2013). Agronomic application of food processing industrial sludge to improve soil quality and crop productivity. *Geoderma* 207–208 205–211.
- Kandil, A. A., Attia, A. N., Badawi, M. A., Sharief, A. E., & Abido, W. A. H. (2011). Effect of water stress and fertilization with inorganic nitrogen and organic chicken manure on yield and yield components of potato. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 997-1005.
- Karami, A., Homae, M., Afzalnia, S., Ruhipour, H., & Basirat, S. (2012). Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 22-28.
- Kasongo, R. K., Verdoodt, A., Kanyankagote, P., Baert, G., & Ranst, E. V. (2011). Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. *Soil use and Management*, 27(1), 94-102.
- Katerji, N., Van Hoorn, J. W., Hamdy, A., & Mastrorilli, M. (2003). Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural water management*, 62(1), 37-66.

- Kaya, C., Tuna, A. L., Ashraf, M., & Altunlu, H. (2007). Improved salt tolerance of melon (*Cucumis melo* L.) by the addition of proline and potassium nitrate. *Environmental and Experimental Botany*, 60(3), 397-403.
- Keeney, D. R., & Nelson, D. W. (1982). Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, (methodsofsoilan2), 643-698.
- Keren, R., 2000. Salinity. In: Sumner, M.E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, pp. 3-25.
- Khadraoui A., 2006. *Eaux et Sols en Algérie (Gestion et impact sur l'environnement)*. Ed. EMPAC, Constantine, Algérie, 392 p.
- Khaleel, R., Reddy, K. R., & Overcash, M. R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality*, 10(2), 133-141.
- Khalil, M. I., Hossain, M. B., & Schmidhalter, U. (2005). Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(8), 1507-1518.
- Khan, M. G., & Srivastava, H. S. (1998). Changes in growth and nitrogen assimilation in maize plants induced by NaCl and growth regulators. *Biologia plantarum*, 41(1), 93-99.
- Khorshidi, M. B., Yarnia, M., & Hassanpanah, D. (2009). Salinity effect on nutrients accumulation in alfalfa shoots in hydroponic condition. *J. Food Agric. Environ*, 7, 787-790.
- Killian CH., & Feher D. (1939). Le rôle et l'importance de l'exploitation microbiologiques des sols sahariens. *Bulletin de la société de biographie* N° VI, pp 81-106.
- Knops, J. M., & Tilman, D. (2000). Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment. *Ecology*, 81(1), 88-98.
- Kouzmine, Y. (2007). *Dynamique et mutations territoriales du Sahara algérien, Vers de nouvelles approches fondées sur l'observation*. Thèse Doctorat en Géographie, Univ. Franche-Comté, France, 423 p.
- Koyro, HW., (2006) Effect of salinity on growth, photosynthesis, waterrelations and solute composition of potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environ Exp Bot*(56), 136–149
- Krief, T.L., Soroker, E., & Firestone, M.K., (1987). Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soils is wetted. *Soil Biology & Biochemistry* 19, 119–126.
- Kumar, P., Pandey, S. K., Singh, B. P., Singh, S. V., & Kumar, D. (2007). Effect of nitrogen rate on growth, yield, economics and crisps quality of Indian potato processing cultivars. *Potato Research*, 50(2), 143-155.
- Lakhdhar, A., Hafsi, C., Rabhi, M., Debez, A., Montemurro, F., Abdelly, Jedidi N., & Ouerghi, Z. (2008). Application of municipal solid waste compost reduces the negative effects of saline water in *Hordeum maritimum* L. *Bioresource technology*, 99(15), 7160-7167.
- Lakhdhar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of hazardous materials*, 171(1), 29-37.

- Lal, R., (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food quality. *Science* 303, 1623 - 1626.
- Lam, H. Q., Le Bigot, Y., Delmas, M., & Avignon, G. (2001). A new procedure for the destructuring of vegetable matter at atmospheric pressure by a catalyst/solvent system of formic acid/acetic acid. Applied to the pulping of triticale straw. *Industrial Crops and Products*, 14(2), 139-144.
- Larbi, M L., (2006). Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques. These Doc . Université de Neuchatel .138 p.
- Larney, F. J., & Angers, D. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), 19-38.
- Lauchli A., & Epstein E. 1990 . Plant response to salinity and sodic conditions, in: K.K.Tanji (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*, American Society of Civil Engineers, New York, Mann. Rep. Eng. Pract. 71 (71) 113–137.
- Läuchli, A. (1990). Calcium, salinity and the plasma membrane. In: Leonard, R.T., Stumpf, P.K. (Eds.), *Calcium in Plant Growth and Development*. American Society of Plant Physiology, Rockville MD, pp. 26–35.
- Lax, A., (1991). Cation exchange capacity, induced in calcareous soils by fertilization with manure. *Soil Sci.* 151, 174–178.
- Lax, A., Díaz, E., Castillo, V., & Albaladejo, J. (1994). Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendment. *Arid Land Research and Management*, 8(1), 9-17.
- Le Berre, M. (1990). Faune du Sahara. 2. Mammifères. Paris: Lechevalier, R. Chabaud
- Leff, J.W., Nemergut, D.R., Grandy, A.S., O'Neill, S.P., Wickings, K., Townsend, A.R., & Cleveland, C.C. (2012). The effects of soil bacterial community structure on decomposition in a tropical rain forest. *Ecosystems* 15, 284–298.
- Lesaint, C., & Coïc, Y. (1983). Cultures hydroponiques physiologie et besoins des plantes, les solutions nutritives et substrats, les différents systèmes hydroponiques.
- Levy, D. (1992) . The response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity: plant growth and tuber yields in the arid desert of Israel. *Ann. Appl. Biol.* 120, 547-555.
- Levy, D., & Tai, G. C. C. (2013). Differential response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity in an arid environment and field performance of the seed tubers grown with fresh water in the following season. *Agricultural water management*, 116, 122-127.
- Levy, D., & Veilleux, R.E., (2007). Adaptation of potato to high temperatures and salinity . *American Journal of Potato Research*, 84, 487–506.
- Li FH., & Keren, R. (2009). Calcareous soil reclamation as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study. *Pedosphere* 19(4), 465-475.

- Li, L. J., Han, X. Z., You, M. Y., Yuan, Y. R., Ding, X. L., & Qiao, Y. F. (2013). Carbon and nitrogen mineralization patterns of two contrasting crop residues in a Mollisol: Effects of residue type and placement in soils. *European Journal of Soil Biology*, 54, 1-6.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., & Grossman J. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1719–1730.
- Liang, Y., Si, J., Nikolic, M., Peng, Y., Chen, W., & Jiang, Y. (2005). Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(6), 1185-1195.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Linères, M., & Djakovitch, J. L. (1993). Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. *Matières organiques et agricultures. Gemas-COMIFER, Paris*, 59-68.
- Lipman, C. B. (1912). The distribution and activities of bacteria in soils of the arid region (Vol. 1). University of California Press.
- Lithellieux J. ,(1984). Ouargla cité saharienne des origines au début du XXème siècle. Librie orientale Paul Geutner, SA (paris).295p.
- Li-Xian, Y., Guo-Liang, L., Shi-Hua, T., Gavin, S., & Zhao-Huan, H. (2007). Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application. *Science of the total environment*, 383(1), 106-114.
- Long, F. N. J., & Gracey, H. L. (1990). Effect of fertilizer nitrogen source and cattle slurry on herbage production and nitrogen utilization. *Grass and Forage Science*, 45(4), 431-442.
- Longo-Hammouda, F. H., Siboukheur, O. E., & Chehma, A. (2007). Aspects nutritionnels des pâturages les plus appréciés par *Camelus dromedarius* en Algérie. *Cahiers Agricultures*, 16(6), 477-483.
- Lu, N., & Edwards, J. H. (1994). Poultry litter quantity influences collard growth in pots and affects cabbage growth and nutrient uptake. *HortScience*, 29(10), 1143-1148.
- M.A.T.E., 2000. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. Alger. pp 100-105.
- Maas, E. V. (1986). Salt tolerance of plants. *Applied agricultural research (USA)*.
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance\current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134.
- Maas, EV., & Grattan, SR. (1999). Crop Yields as Affected by Salinity, p. 55-108. In: Skaggs RW, Van Schilgaarde J (Eds.). Agricultural drainage . Agronomy Monograph 38, Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA.
- Mace, J. E., & Amrhein, C. (2001). Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1), 199-204.

- Madan, S., Nainawatee, H. S., Jain, S., Jain, R. K., Malik, M. S., & Chowdhury, J. B. (1994). Leaf position-dependent changes in proline, pyrroline-5-carboxylate reductase activity and water relations under salt-stress in genetically stable salt-tolerant somaclones of *Brassica juncea* L. *Plant and soil*, 163(2), 151-156.
- Mafongoya, P. L., Barak, P., & Reed, J. D. (2000). Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of tree leaves and manure. *Biology and Fertility of soils*, 30(4), 298-305.
- Magan, N., Lacey, J., 1988. Ecological determinants of mould growth in stored grain. *International Journal of Food Microbiology* 7, 245–256.
- Mahapatra, K., Ramteke, D. S., Paliwal, L. J., & Naik, N. K. (2013). Agronomic application of food processing industrial sludge to improve soil quality and crop productivity. *Geoderma*, 207, 205-211.
- Mahdy, A. M. (2011). Soil properties and wheat growth and nutrients as affected by compost
- Maithani, K., A. Arunachalam, R.S. Tripathi & Pandey H.N., (1998). Influence of leaf litter quality on N mineralization in soils of subtropical humid forest re-growths. *Biol. Fertil. Soils*, 27: 44–50.
- Malhi, S. S., Lemke, R., Wang, Z. H., & Chhabra, B. S. (2006). Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research*, 90(1), 171-183.
- Malhi, Y., Aragao, L. E. O., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., & ANTONIO, C. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15(5), 1255-1274.
- Mallouhi N., & Jacquin F. (1986). Influence of certain ions the biological properties of a salt enriched pelosol. *Agrokémia es Talajtan*, Tom 35 (1-2), 105-111.
- Mallouhi N., (1982). Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur l'évolution de la matière organique. Thèse d'oct. I, NNP Lancy. 127 p.
- Mallouhi, N., & Jacquin, F. (1985). Essai de corrélation entre propriétés biochimiques d'un sol salso-dique et sa biomasse. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(1), 23-26.
- Maltas, A., Oberholzer, H., Charles, R., Bovet, V., & Sinaj, S. (2012). Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse*, 3(3), 148-155.
- Martin, P. J., Stephens, W., Bullard, M. J., Christian, D. G., Knight, J. D., Lainsbury, M. A., & Parker, S. R. (2001). The potential for biomass production on restored landfill caps. *Aspects of applied biology*, (65), 337-344.
- Martineau, Y. , Lavoie, J. 1996. Poultry manure as a source of nitrogen in potato production: Part I: Agronomic evaluation. 1996 Adapt. Res. Abs. N. B. Dept. of Agric. And Aquaculture, Fredericton, NB.
- Martinez, F. O., Sica, A., Mantovani, A., & Locati, M. (2007). Macrophage activation and polarization. *Frontiers in bioscience: a journal and virtual library*, 13, 453-461.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., Benedicto, S., Lee, H., 2001. Humic substances to reduce salt effect on plant germination and growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*.33, 3–4.

- Mathieu, C., Pieltan, F., 2003. Analyse chimique des sols. Methodes choisies. 9^{eme} Edit. Lavoisier .Paris TEC & DOC .387p.
- McClung, G., & Frankenberger, W. T. (1985). Soil nitrogen transformations as affected by salinity. *Soil science*, 139(5), 405-411.
- McCormick, R. W., & Wolf, D. C. (1980). Effect of sodium chloride on CO₂ evolution, ammonification, and nitrification in a Sassafras sandy loam. *Soil Biology and Biochemistry*, 12(2), 153-157.
- Medina *et al.*, 2012, dans une expérience analogue ont rapporté une réduction augmentation graduelle du pH du même ordre de grandeur après apport organique au sols., *i.e.* de 7 à 8, pendant le compostage.
- Melero S., Madejon E., Ruiz J.C., Herencia J.F., 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization, *Eur. J. Agron.* (26) 327–334.
- Melillo, J. M., Aber, J. D., & Muratore, J. F. (1982). Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 63(3), 621-626.
- Melo, J.P.L., & De-Oliveira A.P.(1999). Garlic production as a function of different water levels and bovine manure in soil. *Horticultura, Brasileira*. 17, 11-15.
- Mengel K, Kirkby E A., 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. p. 846.
- Midmore, D. J., Ladha, J. K., Olk, D. C., & Schmidhalter, U. (2000). Legume decomposition and nitrogen release when applied as green manures to tropical vegetable production systems. *Agronomy Journal*, 92(2), 253-260.
- Mokolabate, M.S., Haynes, R.J., 2002. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. *Biology and Fertility of Soils* 35, 79–85.
- Moral, R., Moreno-Caselles, J., Perez-Murcia, M.D., Perez-Espinosa, A., Rufete, B., Paredes, C., 2005. Characterisation of the organic matter pool in manures. *Bioresour. Technol.* 96, 153–158.
- Morel. J. L, (1989). Les sols cultivés, dynamique générale de la matière organique. Edit. Lavoisier, pp:310-325.
- Motsara, M. R., & Roy, R. N. (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis* (Vol. 19). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Moussa, H. R., & Abdel-Aziz, S. M. (2008). Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. *Aust J Crop Sci*, 1(1), 31-36.
- Moustefaoui, A., Zitouni, A., Bouti K, Boudjella, H. & Sabaou N. (1998). Présence des actinomycètes rares dans les sols du Sahara Algérien : Etude de quelques genres. Séminaire: Zones arides" Rétrospectives, enjeux et stratégies "Adrar, 9 p.
- Moyin-Jesu, E. I. (2003). Incorporation of Agro-Industrial Biomass and Their Effects on Growth and Nutrient Content of Four Successive Crops of Amaranthus. *Pertanika journal of Tropical agricultural science*, 26(1), 49-58.

- Mufwanzala, N., & Dikinya, O. (2010). Impact of poultry manure and its associated salinity on the growth and yield of spinach (*Spinacea oleracea*) and carrot (*Daucus carota*). *International journal of agriculture and biology*, 12(4), 489-494.
- Muller J., 1965. Observations sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. 1. Action sur les rendements. *Ann. agron.*, 16, 301-321.
- Munns, R., (2002). Comparative physiology of salt and water stress, *Plant Cell Environ.* 25 ,239–250.
- Munns, R., James, R. A., & Läuchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1025-1043.
- Murtaza, G., Ghafoor, A., Owens, G., Qadir, M., & Kahlon, U. Z. (2009). Environmental and Economic Benefits of Saline-Sodic Soil Reclamation Using Low-quality Water and Soil Amendments in Conjunction with a Rice–Wheat Cropping System. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(2), 124-136.
- Mustin M., (1987). *Le composte, gestion de la matière organique*. Edit. François Dubusc. Paris. 954p.
- Mylavarapu, R. S., & Zinati, G. M. (2009). Improvement of soil properties using compost for optimum parsley production in sandy soils. *Scientia Horticulturae*, 120 (3), 426-430.
- Naidu, R., & Rengasamy, P. (1993). Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. *Soil Research*, 31(6), 801-819.
- Nakhone, L. N., & Tabatabai, M. A. (2008). Nitrogen mineralization of leguminous crops in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(2), 231-241.
- Naman F., Saoudi B., Chiang C., 2001. Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi –arides au Maroc: Etude de gestion du sol. 8(4), 269-277.
- N'dayegamiye, A., & Isfan, D. (1991). Chemical and biological changes in compost of wood shavings, sawdust and peat moss. *Canadian Journal of Soil Science*, 71(4), 475-484.
- Ndira, N., 2006. Substances humiques du sol et du compost analyse elementaire et groupements atomiques fictifs .vers une approche thermodynamique: l'institut national polytechnique de Toulouse.p 268 .
- Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Générumont, S., Morvan, T., Hénault, C., Flura, D., Robert, P., rcoverchio, F., Linères, M., & Morel, C. (2003). Disponibilité en azote des effluents urbains, agro-industriels et issus d'élevage. *Les dossiers de l'environnement, spécial AGREDE*, Ed. INRA, Paris, 15-26.
- Nicolardot, B., Recous, S., & Mary, B. (2001). Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228(1), 83-103.
- Nicolas ,C., Hernandez T., Garcia C., 2012 .Organic amendments as strategy to increase organic matter in particle-size fractions of a semi-arid soil. *Applied Soil Ecology* (57) 50– 58.

- Niu, X., R. A. Bressan, P. M. Hasegawa & J. M. Pardo. (1995). Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiol.* 109:735-742.
- Nourbakhsh, F., & Dick, R. P. (2005). Net nitrogen mineralization or immobilization potential in a residue-amended calcareous soil. *Arid Land Research and Management*, 19(4), 299-306.
- Nourbakhsh, F., & Sheikh-Hosseini, A. R. (2006). A kinetic approach to evaluate salinity effects on carbon mineralization in a plant residue-amended soil. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(10), 788-793.
- AOAC (1997). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists International, 16th ed., vol. 972, AOAC International, Arlington, VA, p.
- Oagile Dikinya & Namasiku Mufwanzala. (2010). Chicken manure-enhanced soil fertility and productivity: Effects of application rates *Journal of Soil Science and Environmental Management* Vol. 1(3), pp. 46-54.
- O'hallorans, J. M., Muñoz, M. A., & Colberg, O. (1993). Effect of chicken manure on chemical properties of a Mollisol and tomato production. *The Journal of agriculture of the University of Puerto Rico (USA)*.
- Okoruwa, E. A. (1998). Effects of NPK fertilizer and Organic manure on the growth and yield of maize (*Zea mays* L.) Hybrid. *Crop Sci*, 22, 119-124.
- Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate.
- Omeira, N., Barbour, E. K., Nehme, P. A., Hamadeh, S. K., Zurayk, R., & Bashour, I. (2006). Microbiological and chemical properties of litter from different chicken types and production systems. *Science of the Total Environment*, 367(1), 156-162.
- O.N.M., 2013. Fiches de données météorologiques de Ouargla entre 2002-2012. Office National de la Météorologie de Ouargla à Aïn Beida, 5p.
- ONM., 2005. Rapport sur les données climatiques Ouargla. Report of the National Office of Meteorology (NOM), Ouargla, Algeria. Ouargla, 5 p.
- Oren, A. (2008). Microbial life at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity. *Saline systems*, 4(2), 13.
- Orsini, L., & Remy, J. C. (1976). Utilisation du chlorure de cobaltihexammine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol. Science du Sol*.
- Osman, A. S., & Ewees, M. S. (2008). The possible use of humic acid incorporated with drip irrigation system to alleviate the harmful effects of saline water on tomato plants. *Fayoum J. Agric. Res. Dev*, 22, 52-70.
- Ouni, Y., Lakhdar, A., Scelza, R., Scotti, R., Abdelly, C., Barhoumi, Z., & Rao, M. A. (2013). Effects of two composts and two grasses on microbial biomass and biological activity in a salt-affected soil. *Ecological Engineering*, 60, 363-369.

Oustani M., Halilat M. T., 2010. Etude de l'influence des fertilisants organique sur l'amélioration et la conservation du fonctionnement microbiologique des sols dans les régions sahariennes in : Revue des zones arides - Médenine - Tunisie vol N° ISSN 0330 – 7956, Novembre 2010, pp. 1027-1043

Oustani, M. (2011). A Pilot Study to Evaluate the Use of Date Palm Residues (Leaves, Lif, Kornav) as Organic Fertilizer in the Desert Areas. In *I International Symposium on Date Palm 994* (pp. 117-124).

Oustani, M., (2006). Contribution à l'étude de l'influence des amendements organiques (fumier de volailles et fumier de bovins) sur l'amélioration des propriétés microbiologiques des sols sableux non salés et salés dans les régions Sahariennes (Cas de Ouargla), Mémoire de Magister en Agronomie Saharienne, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 187p.

Oustani, M., Halilat, M. T., & Chenchouni, H. (2015). Effect of poultry manure on the yield and nutriments uptake of potato under saline conditions of arid regions. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(1), 106-120.

Ozenda P., .1991. Flore et végétation du Sahara. 2ème édition. Ed. C.N.R.S. Paris. 622 P.

Ozenda P., 1958 .La flore de Sahara septentrional et central. Ed. CNRS, Paris, 486 p.85.

Pannikov,V.U ; Mineev,V.V., 1977. The effect of soil, climate, potato's Fertilization on yield,Moscow . ed " kolos ", pp 308-316.

Paredes, C., Bernal, M. P., Cegarra, J., & Roig, A. (2002). Bio-degradation of olive mill waste water sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 85(1), 1-8.

Parida, A.K. and A.B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotox. Paris,796 p.

Pascual C. , Garcia T. , Hernandez T. , 1999.Lasting microbiological and biochemical effects of the addition of municipal solid waste to an arid soil, Biol. Fertil. Soils 30 , 1–6.

Pasternak, D., De Malach, Y., Borovic, I., 1986. Irrigation with brackish water under desert conditions . VII. Effects of time of application of brackish water on production of processing tomatoes (*Lycopersicum esculentum* Mill.). *Agric. Water Manage.* 12, 149–158.

Patel, R.M., Prasher, S.O., Donnelly, D., Bonnell, R.B., 2001. Effect of initial soil salinity and subirrigation water salinity on potato tuber yield and size . *Agric. Water Manage.* 46, 231–239.

Pathak, H., & Rao, D. L. N. (1998). Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(6), 695-702.

Paul, E. A., Clark, F. E.? 1989. Reduction and transport of nitrate. *Soil microbiology and biochemistry*, 9, 81-85.

Pedra, F., Plaza, C., Fernández, J. M., García-Gil, J. C., & Polo, A. (2008). Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on chemical and spectroscopic properties of humic acids from a sandy Haplic Podzol and a clay loam Calcic Vertisol in Portugal. *Waste management*, 28(11), 2183-2191.

- Perrenoud, S. 1993. Fertilizing for High Yield Potato. IPI Bulletin 8. 2 nd Edition. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Perucci, P., 1992. Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. *Biology and Fertility of Soils* 14, 54-60.
- Peters, J.B; Combs, S; Hoskins, B. Jarman, J; Kovar J., Watsan ,M., Wolf, A.,& Wolf, N. (2003).Recommended method of manure analysis. Cooperative extension publishing. 58 p.
- Pieri, C., (1989). *Fertilité des terres de savanes: bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Ministère de la Coopération et du Développement. Montpellier, France.
- Pochon J, DE Berjac H, 1Ladjudie J.(1957).Recherche sur la microflore des sols sahariens. Ann, Inst, Pasteur, Paris, pp: 833-836.
- Prévot AR .,1970. Humus .Biogenèse, Biochimie Edit, Tourelle, Saint -Mandé.342p.
- Puniran-Hartley, N., Hartley, J., Shabala, L., & Shabala, S. (2014). Salinity-induced accumulation of organic osmolytes in barley and wheat leaves correlates with increased oxidative stress tolerance: in planta evidence for cross-tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 32-39.
- Qadir, M, Qureshi, A.S, Cheraghi, S.A.M., 2008. Extent and characterisation of salt affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Deg. Dev.* 19, 214–227.
- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2001). Use of saline–sodic waters through phytoremediation of calcareous saline–sodic soils. *Agricultural Water Management*, 50(3), 197-210.
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, 96, 197-247.
- Qiu, S., McComb, A.J., Bell, R.W., 2008. Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilisation-mineralization and N availability in nutrientamended sandy soils in southwestern Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127,93–99.
- Radhouane, L., 2008. Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains chez quelques écotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) autochtones de Tunisie. *Comptes Rendus Biologies*, 331(4), 278-286.
- Rady, M. M. (2012). A novel organo-mineral fertilizer can mitigate salinity stress effects for tomato production on reclaimed saline soil. *South African Journal of Botany*, 81, 8-14.
- Rafat S; Rafiq A, 2009. Vegetative growth and yield of tomato as affected by the application of organic mulch and gypsum under saline Pak. *J. Bot.*, 41(6),3093-3105.
- Rahmoune, C., Maâlem, S., & Bennaceur, M. 2004. Etude comparative de rendement en matière sèche et en matière azotée totale de trois espèces de plantes steppiques du genre *Atriplex*. *Options Méditerranéennes*, 219-221.
- Rahmoune, C., Maalem, S., Kadri, K., & Bennaceur, M. (2008). Etude de l'utilisation des eaux fortement salées pour l'irrigation des plantes du genre *Atriplex* en zones semi arides. *Revue des régions arides*, (21), 924-929.

- Raj Setia R, Marschne, P., (2013). Carbon mineralization in saline soils as affected by residue composition and water potential. *Biol. Fertil. Soils* 49(1):71-77.
- Rao, D. L. N., & Pathak, H. (1996). Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Land Research and Management*, 10(4), 311-319.
- Rasio A., Sorrentinio G., Cedola M.C., Pastore D. & Wittner G. (1987). Osmotic and elastic adjustment of durum wheat leaves under stress conditions. *Genetic Agr.* 41: 427 - 436 p.
- Rasool, R., Kukal, S. S., & Hira, G. S. (2008). Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize–wheat system. *Soil and Tillage Research*, 101(1), 31-36.
- Rath, K. M., & Rousk, J. (2015). Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 108-123.
- Rauthan, B. S., & Schnitzer, M. (1981). Effects of a soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Plant and Soil*, 63(3), 491-495.
- Reddy, P. S., Jogeswar, G., Rasineni, G. K., Maheswari, M., Reddy, A. R., Varshney, R. K., & Kishor, P. K. (2015). Proline over-accumulation alleviates salt stress and protects photosynthetic and antioxidant enzyme activities in transgenic sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Plant Physiology and Biochemistry*. 94, 104–113.
- Reinoso, H., Sosa, L., Ramírez, L., & Luna, V. (2004). Salt-induced changes in the vegetative anatomy of *Prosopis strombulifera* (Leguminosae). *Canadian journal of botany*, 82(5), 618-628.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *J. Exp. Bot.* 57: 1017-1023.
- Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613-620.
- Reyes-Reyes, B. G., Zamora-Villafranco, E., Reyes-Reyes, M. L., Frías-Hernández, J. T., Olalde-Portugal, V., & Dendooven, L. (2003). Decomposition of leaves of huisache (*Acacia tortuosa*) and mesquite (*Prosopis spp*) in soil of the central highlands of Mexico. *Plant and soil*, 256(2), 359-370.
- Rezgui, M., Bizid E., Ben mechlia, N., 2004. Etude de la sensibilité au déficit hydrique chez quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivées en conditions pluviales et irriguées en Tunisie. *Revue des Régions Arides*.1, 258-265.
- Rhoades, J. D., & Loveday, J. (1990). Salinity in irrigated Agriculture Irrigation of Agricultural crops-Agronomy monograph.
- Richards, B. G. (1965). *Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique, using thermistors* (No. pp 39-46).
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, U. S. Department of Agriculture Handbook, Vol. 60, Washington D. C., (USA) 160 p.
- Rietz, D.N., & Haynes, R.J. (2003) . Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biol. Biochem.* 35, 845-854.
- Rivkind, L., (1929). Etude des terres du Sahara. *Ann. Ins. Pasteur, Alger*, 7(1), pp: 88-103.

- Robert M., 1996 . Le sol : Interface dans l'environnement, ressource pour le développement .Masson, Paris, 241 p.
- Robin, D. (1997). Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organominéraux. *Agronomie*, 17(3), 157-171.
- Rodier J., Bazin C., Broutin J.-P., Chambon P., Champsaur H., & Rodi L. (2005). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8 ème Ed. Dunod, Paris, 1384 p.
- Romani, M., Bezzala, A., & Lakhdhari, F. 2007. Valorisation des sous produits du palmier dattier comme amendements des sols. *Journal Algérien des régions arides* . N°6 .2007.
- Rousseaux P., 1988. Heavy metals in household refuse: origins, chemical foons. contents. RID Programmeon Recycling and utilization of waste. Ed. Commision des cQmmunautés Européennes. DG XII 123 p.
- Rouvillois-Brigol, M. (1975). Le Pays de Ouargla, Sahara algérien: variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique (Vol. 2). Département de géographie de l'Université de Paris-Sorbonne.
- Rubinigg, M., Wenisch, J., Elzenga, J. T. M., & Stulen, I. (2004). NaCl salinity affects lateral root development in *Plantago maritima*. *Functional plant biology*, 31(8), 775-780.
- Saeed, R., & Ahmad, R. (2009). Vegetative growth and yield of tomato as affected by the application of organic mulch and gypsum under saline rhizosphere. *Pak. J. Bot*, 41(6), 3093-3105.
- Sairam, R K, Rao K V, Srivastava, G C. 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science*. 163, 1037-1046.
- Saleh, A. L., & El-Fattah, A. A. (1997). Response of nutrients uptake and dry weight of sorghum to application of FYM, Poultry manure and their combination with chemical fertilizers. *Egypt. J. Appl. Sci*, 12(12), 271-278.
- Saleh, A. L., & El-Fattah, A. A. (1997). Response of nutrients uptake and dry weight of sorghum to application of FYM, Poultry manure and their combination with chemical fertilizers. *Egypt. J. Appl. Sci*, 12(12), 271-278.
- Sall, S. N. (2004). Importance des relations " Résidus végétaux-Communautés microbienne" sur les processus de décomposition dans un sol ferrugineux tropical (Sénégal): effet de la disponibilité de l'azote Thèse de doctorat. Paris 12.
- Sall, S. N., Ndour, N. Y. B., Diédhiou-Sall, S., Dick, R., & Chotte, J. L. (2015). Microbial response to salinity stress in a tropical sandy soil amended with native shrub residues or inorganic fertilizer. *Journal of environmental management*, 161, 30-37.
- Sanchez P. A., Gichuru M.P., Kartz L.B. 1982 . Organic matter in major soils of tropical and temperate regions, in Non –symbiotic nitrogen fixation and organic matter in the tropics. *Trans. Soil Sci* N°10 , pp: 99-114.

- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (1999). Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. *Bioresource Technology*, 70(2), 193-201.
- Sarag, H. (1980). Essai de caractérisation de la matière organique dans quelques sols du nord de l'Algérie, Ann, agro, (El harrach), Vol VI, N° 2, pp: 33-35.
- Sarah, P. (2006). Soil organic matter and land degradation in semi-arid area, Israel. *Catena*, 67(1), 50-55.
- Sardinha, M., Muller, T., Schmeisky, H. & Joergensen, R.G.(2003). Microbial performance in soils along a salinity gradient under acidic conditions. *Appl. Soil Ecol.* 23, 237–244.
- SAS , 2001. SAS ® 9.1 Qualification Tools User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC).
- Sasson, A., (1967). Recherches écophysiologicals sur la flore bactérienne de sols de régions arides du Maroc., ISC et de la Faculté des Sciences, Série botanique et biologique végétale n° 30 – Rabat-Maroc, 230 p.
- Schimel, J., Balsler, T.C., & Wallenstein, M. (2007). Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology* 88, 1386-1394.
- Schnitzer, M. (1978). Humic substances: chemistry and reactions. In *Soil organic matter* (Vol. 8, p. 47). Elsevier Amsterdam.
- Schnitzer, M. (1991). Soil organic matter-The next 75 years. *Soil Science*, 151(1), 41-58.
- Shabala, L., Cuin, T. A., Newman, I. A., & Shabala, S. (2005). Salinity-induced ion flux patterns from the excised roots of Arabidopsis sos mutants. *Planta*, 222(6), 1041-1050.
- Senoussi A., 1999. Gestion de l'espace saharien en Algérie: symbiose ou confrontation entre systèmes productifs en milieu agricole et pastoral ? "Cas de la région de Ouargla». Thèse Sci. Naturelles, Univ. Strasbourg, , 346 p.
- Servant J., 1975 .contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes, exemple des sols salés du sud et du sud ouest de la France, thèse Dr. Sc. ENSA, Montpellier
- Skiredj, A. 2007. Fertigation guide pour améliorer la productivité des cultures. Raisonement du plan de fumures de la pomme de terre. URL:www.fertigation-s.com
- Shabala, L., Cuin, T. A., Newman, I. A., & Shabala, S. (2005). Salinity-induced ion flux patterns from the excised roots of Arabidopsis sos mutants. *Planta*, 222(6), 1041-1050.
- Setia, R., Marschner, P., Baldock, J., Chittleborough, D., & Verma, V. (2011). Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 667-674.
- Setia, R., Smith, P., Marschner, P., Gottschalk, P., Baldock, J., Verma, V., ... & Smith, J. (2012). Simulation of salinity effects on past, present, and future soil organic carbon stocks. *Environmental science & technology*, 46(3), 1624-1631.
- Shainberg, I.,& Singer, M.J. (1990). Soil response to saline and sodic conditions . In: Tanji, K.K. (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE, NY, pp. 91–112.

Singh, S., Mishra, R., Singh, A., Ghoshal, N., Singh, K.P., 2009. Soil physico-chemical properties in a grassland and agroecosystem receiving varying organic inputs. *Soil Science Society of America Journal* 73, 1530e1538.

Skiredj, A., 2007. Raisonement du plan de fumures de la pomme de terre. Département d'Horticulture/IAV Hassan II/ Rabat/ Maroc.

Slama, F., 1982 . Effect of NaCl on the growth and the mineral nutrition: Comparative study of six cultivated species. Academic Dissertation (Thesis), Tunisia, pp. 241.

Smith, S. V., & Marsh, J. A. (1973). Organic carbon production on the windward reef flat of Eniwetok Atoll. *Limnol. Oceanogr*, 18(6), 953-961.

Snoussi S.A, & Halitim A., 1998 .Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantescultivées : cas de la tomate et du haricot. *EGS*. 5, 4,289 – 298.

Stamatiadis, S., Werner, M., & Buchanan, M. (1999). Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, 12(3), 217-225.

Stevenson, D. J. (1982). Formation of the giant planets. *Planetary and Space Science*, 30(8), 755-764.

Soltner, D., (2003). Les bases de la production végétale, Tome I, le sol. Edit collection science technique agricole. 472 p.

Soudi, B., & Chian, C.N. (1990) .Nitrogen mineralization in semi arid and area of Morocco: Rate constant variation with depth .*Soil Sci .Soc . Am .J* .54: pp756-761.

Sharma, D.W. Rains (Eds.), *Crop Production in Saline Environments: Global and Integrative Perspectives*, Haworth Press, NewYork, , pp. 131–162.

Soumare, M., Tack, F. M. G., & Verloo, M. G. (2003). Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali. *Bioresource technology*, 86(1), 15-20.

Sommers, L. E., Nelson, D. W., Kirleis, A. W., Strachan, S. D., Inman, J. C., Boyd, S. A., & Behel, A. D. (1984). Characterization of sewage sludge and sewage sludge; soil systems. In *Characterization of sewage sludge and sewage sludge; soil systems*.

Soudi B.,& Chian C.N. 1990. Nitrogen mineralization in semi arid and area of Morocco: Rate constant variation with depth .*Soil Sci .Soc. Am. J*.54, 756-761.

Soumare, M., Tack, F.M.G., Verloo, M.G., 2003. Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali. *Bioresour. Technol.* 86, 15–20.

Stevenson F.J., 1982. Humics chemistry. John Wiley el Sons (eds), New-York. 441 p.

Stamatiadis, S., Werner, M., & Buchanan, M. (1999). Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, 12(3), 217-225.

- Stewart, W. D. P. (1986). Organic solute accumulation in osmotically stressed cyanobacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 39(1-2), 51-56.
- Stewart, C. R., Hanson, A. D., Turner, N. C., & Kramer, P. J. (1980). Proline accumulation as a metabolic response to water stress. *Adaptation of plants to water and high temperature stress.*, 173-189.
- Srivastava, A.K., Rai, A.N., Patade, V.Y., Suprasanna, P., 2013. Calcium signaling and its significance in alleviating salt stress in plants. In: Ahmad, P., Azooz, M.M., Prasad, M.N.V. (Eds.), *Salt Stress in Plants: Signaling, Omics and Adaptations*. Springer Science+Business Media, New York, pp. 197–218.
- Stoorvogel, J. J., & Smaling, E. M. A. (1990). *Assessment of soil nutrient depletion in Sub-Saharan Africa: 1983-2000* (Vol. 1). Wageningen: Winand Staring Centre.
- Saeed, R., & Ahmad, R. (2009). Vegetative growth and yield of tomato as affected by the application of organic mulch and gypsum under saline rhizosphere. *Pak. J. Bot.*, 41(6), 3093-3105.
- Suganya, S., Sivasamy, R., 2006. Moisture retention and cation exchange capacity of sandy soil as influenced by soil additives. *Journal of Applied Sciences Research* . 2, 949-951.
- Sumner M., 2000. *Handbook of soil science*. Boca Raton: CRC Press. 2148 p.
- Sivakumar, P., Sharmila, P., & Saradgi, P.P., (2000). Proline accumulation alleviates salt stress induced enhancement in ribulose-1,5-bisphosphate oxygenase activity. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* (279), 512-515.
- Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization In *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*, D.L., Sparks, J.M., Bartels & J.M. Bigham eds, pp. 1011-1069, Soil Sci. Soc. Am. Book Series: 5, Madison.
- Tai, H. S., & He, W. H. (2007). A novel composting process for plant wastes in Taiwan military barracks. *Resources, conservation and recycling*, 51(2), 408-417.
- Tavernier, R., Van Wambeke, A. ,1976. Determination du regime hydrique des sols du Maghreb d'après Newhall. *Pedologie*, 26, 168-178.
- Teixeira, J., & Pereira, S. (2007). High salinity and drought act on an organ-dependent manner on potato glutamine synthetase expression and accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, 60(1), 121-126.
- Tejada M, Gonzalez J., 2005. Beet vinasse applied to wheat under dry land conditions affects soil properties and yield. *European Journal of Agronomy* (23):336–347.
- Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2004). Effects of application of a by-product of the two-step olive oil mill process on maize yield. *Agronomy Journal*, 96(3), 692-699.
- Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2005). Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. *European Journal of Agronomy*, 23(4), 336-347.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., & Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1413-1421.

- Tejada, M., Gonzales, J.L., 2007. Influence of organic amendments on the soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil Tillage Res.* 93, 197–205.
- The Sludge (Use in Agriculture) Regulations, Public Health, England, Wales and Scotland. 1989.SI 1263, as amended by The Sludge (Use in Agriculture) (Amendments) Regulations, Public Health, England Wales and Scotland, SI 880, UK.
- Thorne, W., & Peterson, H. B. (1967). Salinity in United States waters. *agriculture and the quality of our environment, Amer. Assoc. Adv. of Science, Pub.* (85), 221-239.
- Thuriès, L., M. Pansu, C. Feller, P. Herrmann and J.C. Re´my, 2001. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil. *Biol. Fertil. Soils*, 33: 997–1010.
- Thuriès, L., Arrufat, A., Dubois, M., Feller, C., Herrmann, P., Larré-Larrouy, M. 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. *Étude et gestion des sols*, 7(1), 73-87.
- Thuriès, L., Pansu, M., Larré-Larrouy, M. C., & Feller, C. (2002). Biochemical composition and mineralization kinetics of organic inputs in a sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(2), 239-250.
- Toutain F., (1981). Humus forestiers, structures et modes de fonctionnement, rev, forest, Franç (6), pp: 449-464.
- Toutain G., (1979). Elément d'agronomie saharienne. De la recherche au développement. Ed. Inst. Rech. Sah., cel . zone ar., Paris, 276 p.
- Trinsoutrot, I., S. Recous, B. Bentz, M. Linères, D. Chèneby & Nicolardot B. 2000. Biochemical Quality of Crop Residues and Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics under Non-limiting Nitrogen Conditions. *Soil. Sci. Soc. American J.*, 64: 918–926
- Tripathi, S., Kumari, S., Chakraborty, A., Gupta, A., Chakrabarti, K., & Bandyapadhyay, B. K. (2006). Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biology and fertility of soils*, 42(3), 273-277.
- Troll W et Lindsey J.,1954. A photometric method for the determination of proline Received for publication, October 21, 1954.
- Tunstall, B. R. 2005. Dry land salinity implications of interactions between clay, organic matter, salt and water in soils. URL: www.eric.com.au/docs/research/dryland/matter_interactions.pdf
- Turkan, I., Demiral, T., 2009. Recent developments in understanding salinity tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 1 (Special Issue), 2–9.
- U.N.E.S.C.O., 1972. Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. plaquette 1, France, 116p.
- UNESCO, 1972 . Etude des ressources eau du Sahara Septentrional (Etude ERESS). Rapport Technique 6-44 pp.
- UNESCO. 1972. Projet reg 100. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris. 78p.

- U.S.D.A., 1998 .Keys to soils taxonomy technique nomography N°13, satus, Washington.
- U.S.S.L., 1954 . Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Salinity
- Van Soest, P. U., & Wine, R. H. (1967). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Off. Anal. Chem*, 50 (1), 50-55.
- Vaughan, D., Malcolm, R. E., & Ord, B. G. (1985). Influence of humic substances on biochemical processes in plants. In *Soil organic matter and biological activity* (pp. 77-108). Springer Netherlands.
- Veeken, A., Nierop, K., de Wilde, V., & Hamelers, B. (2000). Characterisation of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology*, 72(1), 33-41.
- Veeresh, H., Tripathy, S., Chaudhuri, D., Ghosh, B., Hart, B., & Powell, M. (2003). Changes in physical and chemical properties of three soil types in India as a result of amendment with fly ash and sewage sludge. *Environmental geology*, 43(5), 513-520.
- Verlinden, S., & McDonald, L. (2007). Productivity and quality of static (Limonium sinuatum cv. Soiree Mix) and cockscomb (Celosia argentea cv. Chief Mix) under organic and inorganic fertilization regiments. *Scientia horticultrurae*, 114(3), 199-206.
- Viellefont, J., (1979). Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. Cahier ORSTOM, ser, péd, vol XVII N°3, pp :195-223.
- Vullioud, P., Neyroud, J. A., & Mercier, E. (2006). Efficacité de différents apports organiques et d'un engrais minéral azoté à Changins (1976-2004). *Revue suisse d'agriculture*, 38(4), 173-183.
- Walker, D. J., & Bernal, M. P. (2008). The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource technology*, 99(2), 396-403.
- Walker, D. J., Clemente, R., & Bernal, M. P. (2004). Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. *Chemosphere*, 57(3), 215-224.
- Wang, L., Sun X., Li S., Zhang T., & Zhang W. (2014). Application of Organic Amendments to a Coastal Saline Soil in North China: Effects on Soil Physical and Chemical Properties and Tree Growth. *PLoS ONE* 9(2): e89185. doi:10.1371/journal.pone.0089185.
- Wang, L.N., Zhao H., Xue D., (2010). Effects of jute straw and organic fertilizer on the biological properties of the coastal saline soil, *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* 34 (34) 39-42.
- Westcott, M. P., & Wraith, J. M. (1995). Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint 1. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 26(9-10), 1481-1490.
- Wichern, J., Wichern, F., & Joergensen, R. G. (2006). Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. *Geoderma*, 137(1), 100-108.
- Wu, Y., Li, Y., Zheng, C., Zhang, Y., & Sun, Z. (2013). Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil. *European Journal of Soil Biology*, 54, 32-40.

- Yadav, K., Jha, K.K., Prasad, C.R., Sinha, M.K., (1989). Kinetics of carbon mineralization from poultry manure and sewage sludge in two soils at field capacity and submergence moisture. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 37, 240-243.
- Yamaguchi, T., & Blumwald, E. (2005). Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends in plant science*, 10(12), 615-620.
- Yan, N., & Marschner, P. (2012). Response of microbial activity and biomass to increasing salinity depends on the final salinity, not the original salinity. *Soil Biology and Biochemistry*, 53, 50-55.
- Yang, Y., Fang, J., Tang, Y., Ji, C., Zheng, C., He, J., Zhu, B. (2008). Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 14(7), 1592-1599.
- Yang, Y. M., Liu, X. J., Li, W. Q., & Li, C. Z. (2006). Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilonggang region of North China. *Journal of Zhejiang University Science B*, 7(11), 858-867.
- Yousif, A. M., & Abdalla, M. A. (2009). Variations in nitrogen mineralization from different manures in semi-arid tropics of Sudan with reference to salt-affected soils. *Int. J. Agric. Biol*, 11, 515-520.
- Yuan, B-C., Li, Z-Z., Liu, H, Gao M., & Zhang, Y-Y.(2007). Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *Appl Soil Ecol* 35:319-328.
- Yang, Y. M., Liu, X. J., Li, W. Q., & Li, C. Z. (2006). Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilonggang region of North China. *Journal of Zhejiang University Science B*, 7(11), 858-867.
- Zahran H. H., (1997). Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments . *Biology and Fertility Soils*. 25: 211-223.
- Zahran, H.H., Moharram, A.M., & Mohammad, H.A., (1992). Some ecological and physiological studies on bacteria isolated from salt affected soils of Egypt. *J. Basic Microbiol.* 35, 269-275.
- Zaman-Allah, M., Sifi, B., L'Taief, B., & El Aouni, M. H. (2009). Paramètres agronomiques liés à la tolérance au sel chez le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)/Agronomical traits associated with salinity-tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(1), 113.
- Zhang, C.S., Lu, Q., & Verma, D.P.S., (1997). Characterization of 1-pyrroline-5-carboxylate synthetase gene promoter in transgenic *Arabidopsis thaliana* subjected to water stress. *Plant Sci.* 129, 81-89.
- Zhu, J. K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current opinion in plant biology*, 6(5), 441-445.
- Zitouni, A. (1995). Les genes *Nocardioopsis* et *Saccharothrix* (Actinomycetales) dans les sols sahariens: taxonomie numérique ; extraction ; purification et caractérisation de quelques antibiotiques synthétisés. Magister de microbiologie, E.N.S. de Kouba, 177 p.

Zombre N., (2006). Variation de l'activité biologique dans les zipella (sols nus) en zone subsaharienne du Burkina Faso et impact de la technique du zaï (techniques des poquets) *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* ; 2 : 139-148.

Zougmoré, R., Ouattara, K., Mando, A., & Ouattara, B. (2004). Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 41-48.

Zuang H. (1982). *La fertilisation des cultures maraîchères*. Paris : CTIFL, 395 p.

Annexe I

Contexte écologique et problématique

Tableau 1. Données climatiques de la région de Ouargla (2002– 2012) (O.N.M, 2013)

Facteur	Tmn	Tmx	Tmoy	V.V	H	P	Eva	In (h)
Mois	(°C)	(°C)	(°C)	(m/s)	(%)	(mm)	(mm)	
Janvier	5.05	18.60	11.82	3.27	60.67	8.71	101.62	273.45
Février	6.86	21.19	14.03	3.66	51.85	0.72	139.51	288.64
Mars	11.21	24.82	18.02	4.34	45.15	5.17	223.58	244.69
Avril	15.30	30.03	22.66	4.77	39.64	1.25	280.07	272.29
Mai	19.98	34.79	27.39	4.71	35.56	0.64	353.97	289.95
Juin	24.86	40.07	32.47	5.02	30.29	0.55	432.32	276.43
Juillet	28.36	43.74	36.05	4.42	27.54	0.20	484.26	338.23
Août	27.7	42.7	35.20	3.78	30.8	1.67	450.88	329.31
Septembre	23.64	37.44	30.54	3.81	40.9	3.45	311.25	269.56
Octobre	17.87	31.98	24.93	3.76	47.96	5.86	233.55	244.9
Novembre	10.31	23.95	17.13	3.16	57.21	5.78	132.96	235.62
Décembre	6.20	19.34	12.77	3.01	60.51	1.76	98.63	258.91
Moy .Ann	16.44*	30.72*	23.58*	3.98*	44.01*	35.77*	3242.62**	3321.98**

Cumul annuel; *Moyenne annuelle; **Tmn : Température moyenne minimale; **Tmx** : Température moyenne maximale; **Tmoy** : Température moyenne annuelle; **H** : Humidité; **P**: Pluviométrie; **V.V** Vitesse de vent. **E** : Evaporation; **In (h)** : Insolation.

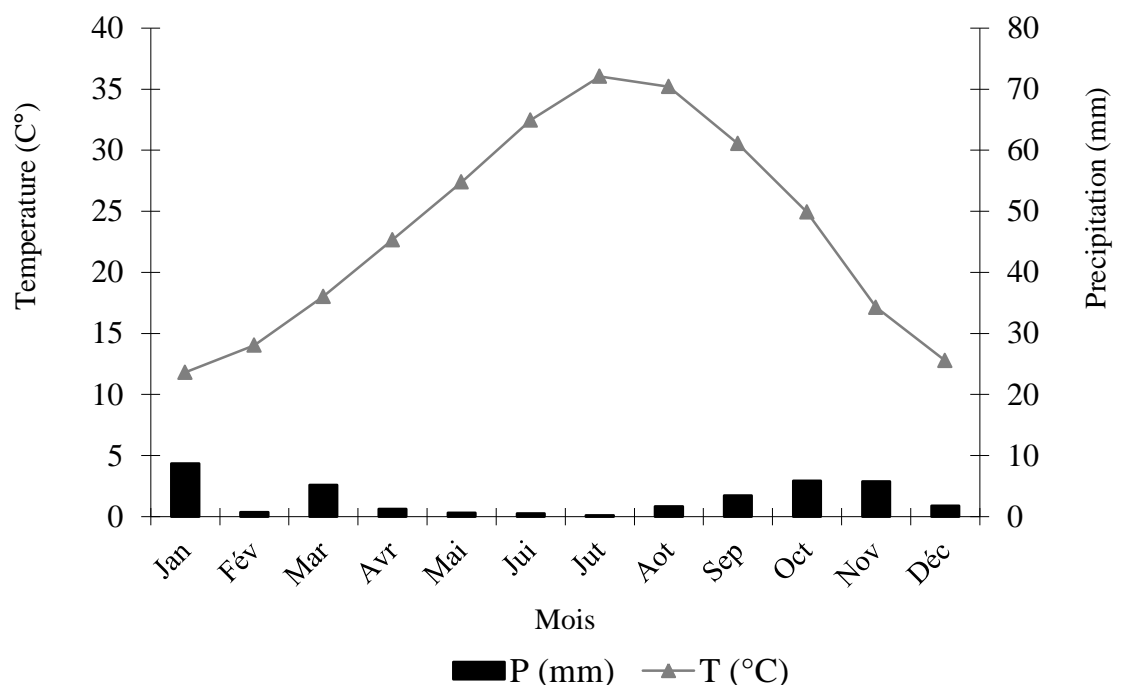


Figure 1 . Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausen de la région de Ouargla (2002-2012)

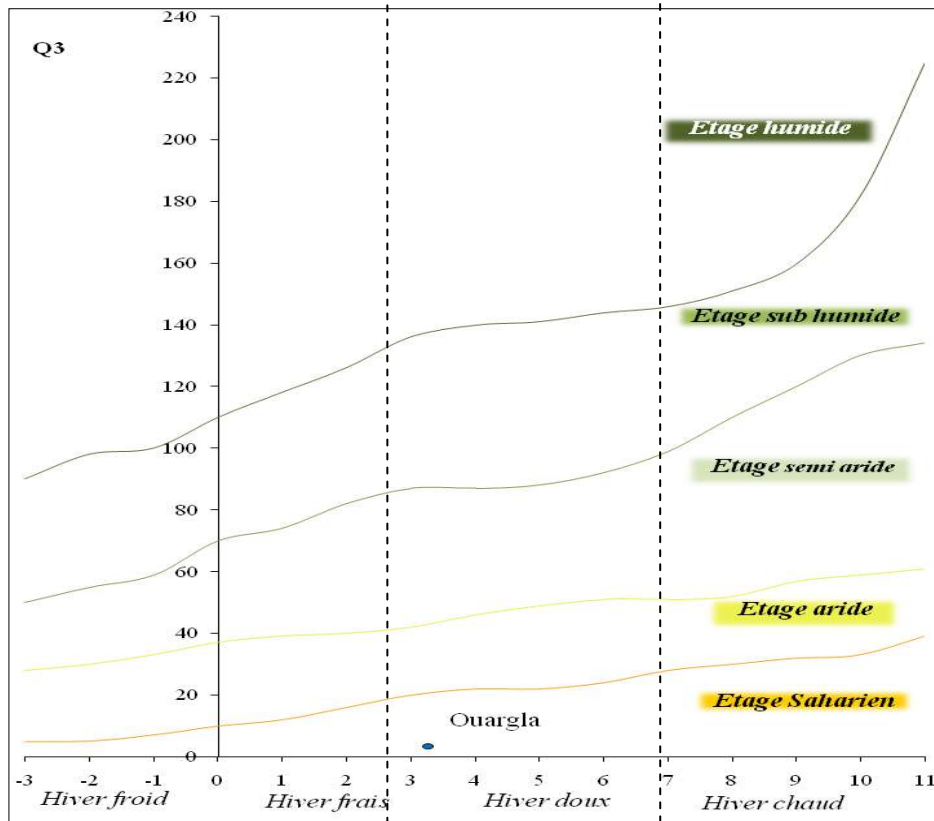


Figure 2. Etage bioclimatique de la région de Ouargla selon le Climagramme d'Emberger (2002-2012)

Annexe II

1. Caractérisation des produits organiques utilisés

1.1. Niveaux de MO en fonction de la teneur en argile et en Matière organique

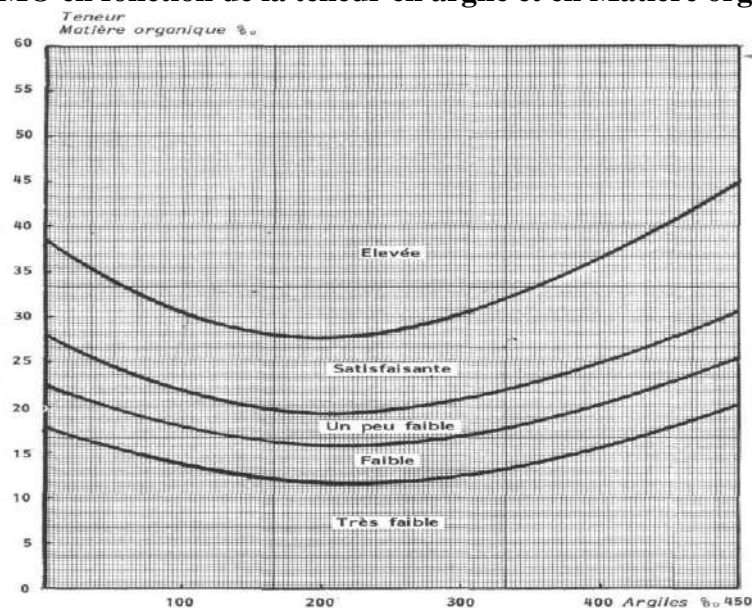


Figure 1. Niveaux souhaitables des MO en fonction de la teneur en argile et en MO (Soltner, 2003)

1.2. Valeurs limites en éléments traces métalliques

Tableau 1 . Valeurs limites en éléments traces métalliques
E.T.M) NF U 44-051 (2006)

E.T.M	Valeurs limites (mg kg ⁻¹ MS)
Cu	300
Zn	600
As	18
Cd	3
Cr	120
Hg	2
Ni	60
Pb	180
Se	12

1.3. Méthode d'estimation de l'équivalence engrais minéral dans certains produits organiques testés

En pratique, on estime la fourniture réelle en éléments fertilisants à la culture, en multipliant la teneur totale d'élément fertilisant apportée par le coefficient d'équivalence engrais minéral (Keq) spécifique pour chaque produit.

- N assimilable (%) = $CE - N \times N_{Total}$ (Kg/t)
- P₂O₅ assimilable (%) = $CE - P_2O_5 \times P_2O_5_{Total}$ (Kg/t)
- K₂O assimilable (%) = $CE - K_2O \times K_2O_{Total}$ (Kg/t)

Facteurs de conversion des éléments nutritifs en forme oxydée :

- ✓ $P \times 2.291 = P_2O_5$
- ✓ $K \times 1.205 = K_2O$
- ✓ $Ca \times 1.39 = CaO$
- ✓ $Mg \times 1.65 = MgO$

1.4. Fractionnement biochimique de la matière organique des composts (Norme AFNORXPU 44-162).

* Principe

Le fractionnement biochimique de la matière organique inspiré du fractionnement Van Soest et al(1967) consiste en un fractionnement de la matière organique en quatre familles biochimiques, sur la base de leur solubilisation successive dans des réactifs d'extraction : substances solubles (SOLU), Hémicellulose (HEMI), Cellulose (CELL) et Lignine (LIGN).

*** Préparation des creusets**

Trois creusets (porosité de 0.45 mm) contenant 2 g d'adjuvant de filtration (sable de Fontainebleau au calciné) sont mis à dessécher 2 heures à 105°C, puis pesés après refroidissement. 10g de produit organique sec et broyé à 0.5 mm est ajouté dans chaque creuset. Les creusets pleins sont alors pesés.

***Détermination du contenu en composés organiques insolubles dans le détergent neutre**

Les trois creusets sont placés sur l'extracteur. 100 mL d'eau chaude et quelques gouttes d'antimousse (octanol) sont ajoutés par creuset. L'ensemble est maintenu à ébullition durant 30 minutes. Après cette période, la solution est éliminée par filtration sous vide, et le résidu de compost est rincé 5 fois à l'eau chaude. Aussitôt 100 mL de détergent neutre (30 g de dodécylsulfate de sodium + 18.61 g d'éthylènediamine tétra acétate dihydraté + 6,81 g de tétraborate de sodium décahydraté + 4,46 g d'hydrogène phosphate de sodium + 10 mL de triéthylglycol sont mélangés à 400mL d'eau, la solution est ensuite ajustée à 1 L) chaud et quelques gouttes d'antimousse sont ajoutés par creuset et maintenus à ébullition. Après 1 heure, la solution est éliminée par filtration sous vide, et le résidu est rincé 10 fois à l'eau chaude puis 3 fois à l'acétone hors extracteur. Le résidu d'un des trois creusets est pesé après séchage à 105°C (16 heures) puis après calcination à 480°C (6 heures). On obtient ainsi la fraction NDF (Neutral Detergent Fiber).

***Détermination des composés organiques insolubles dans le détergent acide**

Les deux creusets restants sont disposés sur l'extracteur. 100 mL de détergent acide (200 g d'hexadécyltriméthyl-ammonium bromure + 49.1 g d'acide sulfurique sont mélangés à 800 mL d'eau, la solution est ensuite ajustée à 1L) et quelques gouttes d'antimousse sont ajoutées par creuset qui seront maintenus à ébullition pendant 1 heure. Après cette période, la solution est évacuée par filtration, et le résidu est rincé 10 fois à l'eau chaude puis 3 fois à l'acétone hors extracteur. Un des deux creusets est pesé après séchage à 105°C (16 heures), puis après calcination à 480°C (6 heures). On obtient ainsi la fraction ADF (Acid Detergent Fiber).

***Détermination des composés organiques insolubles dans l'acide sulfurique**

Le dernier creuset est immergé pendant 3 heures dans un cristalliseur contenant de l'acide sulfurique 72%.

Après ce traitement, le creuset est rincé 10 fois à l'eau chaude. Après une vérification au papier pH du pH qui devrait être proche de 7, le creuset est rincé 3 fois à l'acétone. Ensuite le creuset est pesé après séchage à 105°C (16 heures) puis après calcination à 480°C (6 heures). On obtient ainsi la fraction ADL (Acid Detergent Lignin).

***Expression des résultats**

Les fractions NDF, ADF et ADL sont exprimés en pourcentage de la teneur en matière organique totale de l'échantillon (MOT). Les quantités des composés solubilisés au cours des différentes attaques sont obtenues par différences et exprimées en pour-cent de la MOT du produit organique :

- Soluble % : $SOLU = 100 - NDF$
- Hémicellulose % : $HEMI = NDF - ADF$
- Cellulose % : $CELL = ADF - ADL$
- Lignine % : $LIGN = ADL$
- Cellulose +Lignine % = $CELL + LIGN = ADF$

1.5. Dosage de carbone des fractions humiques

Un volume d'échantillon de 0.25 à 5 ml est additionné de 20 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) et de 10 ml de dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ 1N. Le mélange réagit pendant 30 minutes sous hotte aspirante, et la réaction est stoppée par 200 ml d'eau distillée. L'ajout de 20 ml de H_2SO_4 , 10 ml d'acide orthophosphorique (H_3PO_4), 20 ml de sel de Mohr (Sel ferreux : $FeSO_4(NH_4)_2SO_4 \cdot 6 H_2O$) et 2 ml d'indicateur coloré permet le titrage retour de la solution au $K_2Cr_2O_7$. Le titre du mélange réactionnel est déterminé goutte à goutte à l'aide d'une burette graduée jusqu'à obtention d'un virage coloré vert violet. Le volume V_1 de $K_2Cr_2O_7$ ajouté permet d'oxyder 1-2 ml d'indicateur coloré (diphénylamine sulfonate de Baryum à 0.25%). La concentration de carbone de l'échantillon est calculée selon la méthode d'Anne.

1.6. Classification de teneurs des produits organiques en en éléments fertilisants

Tableau 3. Classement des fumiers en fonction de la teneur en N en %

Teneur en N en %	Riche à très riche	Moyenne	Pauvre
0 > MS < 0.4			X
0.5 > MS < 1.4		X	
1.5 > MS < 5	X		

Tableau 4. Classement des fumiers en fonction de la teneur en P₂O₅ en %

Teneur en P ₂ O ₅ en %	Riche	Moyenne	Pauvre
0 > MS < 0.4			X
0.5 > MS < 1.5		X	
1.6 > MS < 3.2	X		

Tableau 5. Classement des fumiers en fonction de la teneur en K₂O en %

Teneur en K ₂ O	Très riche	Riche	Moyenne	Pauvre
0 > MS < 0.4				X
0.5 > MS < 1			X	
1.1 > MS < 1.4		X		
1.5 > MS < 2.6	X			

(Chabelier et *al.*, 2006)

1.7. Norme de classification des produits organiques en fonction de leurs teneurs en éléments nutritifs

Norme NFU 44-051: Amendements organiques : le contenu de la norme spécifié certaines propriétés du produit :

- Teneur en MS \geq 30% de MB,
- Teneur en MO \geq 20% ou 25% de MB, selon les dénominations,
- Teneur totale en N et P₂O₅ et K₂O < 3% de MB,
- Teneur en N + P₂O₅ + K₂O < 7% de MB,
- C/N > 8.

Norme NFU 42-001 : Engrais organiques : Teneur en un des éléments N ou P₂O₅ ou K₂O > 3% de MB.

2. Effets des produits organiques sur l'amélioration de certaines propriétés physiques, physico- chimiques du sol salé

Analyse des variances des effets des facteurs étudiés (Type de produit organique et temps de prélèvement) sur les propriétés physiques et physicochimiques du sol salé

Tableau 6. a .Analyse des variances : CE

CE	SS	Df	F-value	P	
Temps	56.20	9	62.51	<0.001	***
Type.PO	244.67	5	489.92	<0.001	***
Temps ×Type. PO	40.06	45	8.91	<0.001	***
Residuals	11.99	120			

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5%

Tableau 6.b . Effet type de produit organique sur CE

8.57	A	30	3
8.28	B	30	2
7.83	C	30	4
7.18	D	30	1
5.86	E	30	0
5.50	F	30	5

Tableau 6.c. Effet temps sur la CE

7.91	A	18	3 j
7.87	A	18	2 j
7.84	A	18	4 j
7.74	A	18	1 j
7.26	B	18	5 j
6.98	C	18	6 j
6.76	D	18	7 j
6.61	D	18	8 j
6.54	D	18	9 j
6.54	D	18	10 j

Tableau 7.a. Analyse de la variance : pH du sol

pH	SS	Df	F-value	P	
Temps	1.94	9	2.42	0.015	*
Type.PO	19.77	5	44.38	<0.001	***
Temps ×Type. PO	2.14	45	0.53	0.991	NS
Residuals	10.69	120			

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5%

Tableau 7.b. Effet type de produit organique sur le pH

8.33	A	30	3
8.31	A	30	2
8.29	A	30	0
7.94	B	30	4
7.83	C	30	5
7.78	D	30	1

Tableau 7.c. Effet temps sur le pH

8.29	A	18	1j
8.13	B A	18	10 j
8.12	B A	18	9 j
8.10	B A	18	8 j
8.11	B A	18	7 j
8.03	B A	18	5 j
8.08	B A	18	6 j
7.97	B	18	2 j
7.95	B	18	3 j
7.98	B	18	4j

Tableau 8.a. Analyse des variances : CR

CR	SS	Df	F-value	P	
Temps	162.87	9	7.38	<0.001	***
Type.PO	3023.29	5	246.48	<0.001	***
Temps ×Type. PO	61.06	45	0.55	0.987	NS
Residuals	294.38	120			

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5%

Tableau 8.b. Effet type de produit organique sur la CR

34.03	A	30	5
29.75	B	30	4
27.74	C	30	2
27.67	C	30	3
24.73	D	30	1
20.77	E	30	0

Tableau 8.c. Effet temps sur la CR

28.40	A	18	4 j
28.35	A	18	3 j
28.29	A	18	5 j
28.23	A	18	2 j
27.94	A	18	1 j
27.90	A	18	6 j
27.00	BA	18	7 j
26.32	B	18	8 j
26.04	B	18	9 j
25.99	B	18	10 j

Tableau 9. a. Analyse de la variance : CEC

CEC	SS	Df	F-value	P	
Temps	95.67	9	72.20	<0.001	***
Type.MO	882.60	5	1198.95	<0.001	***
Temps ×Type. PO	66.36	45	10.02	<0.001	***
Residuals	17.52	119			

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5%

Tableau 9.b. Effet produit organique sur la CEC

13.94	A	30	1
11.54	B	30	4
10.57	C	30	3
10.41	C	30	2
7.61	D	30	5
7.59	D	30	0

Tableau 9.c. Effet temps sur la CEC

11.22	A	18	2 j
11.06	A	18	3 j
11.05	A	18	4 j
11.03	A	18	1 j
10.57	B	18	5 j
9.75	C	18	8 j
9.68	C	18	6 j
9.51	C	18	7 j
9.46	C	18	9 j
9.43	C	18	10 j

3. Effets des fertilisants organiques sur l'amélioration du fonctionnement microbiologique des sols salés

3. 1.Description morphologique et données analytiques des deux sols

Profil 1 : Sol sableux salé

Horizon H1: 0 – 29 cm : 7.5 YR 5/6 (Bright Brown), très friable à l'état humide, non compact ; texture sablo - limoneuse, structure grenue, quelques racines de palmier dattier, faible effervescence à L'HCL, quelques amas gypseux blanc au niveau de l'horizon, activité biologique réduite, transition nette et régulière

Horizon H2 : 29 – 49 cm : 7.5 YR 5/6 (Orange), peu compact, texture sablo limoneuse, structure massive, porosité moyenne ; nombreuses racine de palmier dattier, très faible effervescence à l'HCL, transition nette et régulière.

Horizon H3 : > 49 cm : 7.5 YR 6/6 (Orange), très compact, texture limoneux, à structure massive, pas d'effervescence à l'HCL, transition nette et régulière, encroûtement gypseux.

Profil 2 : Sol sableux non salé

Horizon H1: 0 – 20 cm : 7.5 YR 6/6 (Orange) sec; texture particulière faiblement compacte; forte effervescence à l'HCL ; bonne porosité ; racines fines. Nodules de calcaire ; graviers et gravions

Horizon H2 : 20 – 40 cm : 10 YR 7/6 (Bright yellow brown); frais ; texture sableuse; structure particulière meuble; poreux ; forte effervescence à HCL; quelques racines fines ; nodules de calcaires ; graviers et gravillons; transition nette.

Horizon H3 : 40 - 60 cm : couleur 7.5 YR 5/6 (Bright); frais ; texture sableuse ; structure particulière à poudreuse faiblement compacte ; bonne porosité; forte effervescence à HCL ; nodules de calcaire ; graviers et gravillons.

Tableau .10. Résultats analytiques du profil du sol sableux salé (SS)

Caractéristiques		Horizons (cm)		
		0 – 29	29-49	49>
Granulométrie	A (%)	7.11	10.91	10.33
	L.F(%)	8.69	21.99	11.36
	L.G(%)	17.1	6.43	13.00
	S.F(%)	32.65	35.81	29.36
	S.G(%)	34.45	24.86	35.95
Densité apparente (%)		1.36	1.07	1.27
Gypse (%)		22.02	28.57	30.14
Calcaire (%)		2.57	1.5	1.9
Salinité globale CE dS m ⁻¹		2.35	3.37	4.02
Réaction du sol (pH :1/2.5)		8.03	8.25	8.48
Caractéristiques biochimiques	C (%)	0.36	0.3	0.28
	Azote (%)	0.006	0.0030	0.0032
	MO (%)	00.62	0.51	0.48
Complexe adsorbant (cmol ⁺ /Kg)	Mg ⁺⁺	1.01	0.69	0.65
	Ca ⁺⁺	4.33	4.27	4.21
	Na ⁺	1.55	1.47	1.62
	K ⁺	0.48	0.35	0.12
	CEC (T)	7.37	6.94	6.6
Bilan anionique de l'extrait 1/5 meq /l) (Solution du sol	Cl ⁻	12.8	11.12	14.10
	SO ₄ ⁻	13.67	12.67	9.14
	HCO ₃ ⁻	0.7	0.9	0.8
	CO ₃ ⁻	-	-	-

Tableau .11. Résultats analytiques du profil du sol sableux non salé

Caractéristiques		Horizons (cm)		
		0 – 20	20 – 40	40 – 60
Granulométrie	A (%)	5.94	7.46	7.64
	L.F (%)	05.96	2.02	2.02
	L.G (%)	10.38	3.80	3.14
	S.F (%)	41.70	56.5	30.12
	S.G (%)	36.02	30.22	57.08
Densité apparente (%)		1.56	1.52	1.44
Gypse (%)		Traces	Traces	Traces
Calcaire (%)		12.94	15.88	17.01
Salinité globale CE dS m ⁻¹		00.55	0.65	0.58
Réaction du sol (pH :1/2.5)		8.03	8.23	8.47
Caractéristiques biochimiques	C (%)	0.32	0.3	0.29
	Azote (%)	0.0053	0.0027	0.0024
	MO (%)	0.55	0.51	0.5
Complexe adsorbant (cmol ⁺ /Kg)	Mg ⁺⁺	0.92	0.62	0.67
	Ca ⁺⁺	5.04	5.43	5.60
	Na ⁺	0.35	0.40	0.22
	K ⁺	0.39	0.13	0.19
	CEC (T)	6.7	6.58	6.68
Bilan anionique de l'extrait 1/5 meq /l) (Solution du sol	Cl ⁻	4.7	4.8	5.06
	SO ₄ ⁻	4.52	5.02	5.16
	HCO ₃ ⁻	0.8	0.85	0.8
	CO ₃ ⁻	-	-	-

3. 2. Analyse des variances

Tableau.12. Dégagement de CO₂.

	SS	Df	F-value	P	
Type_Sol	317939	1	766,38	0,000	***
Type_Type_PO	15904050	5	7667,22	0,000	***
Temps	6562086	8	1977,21	0,000	***
Type_Sol:Type_PO	428236	5	206,45	0,000	***
Type_Sol:Temps	32053	8	9,66	0,000	***
Type_Type_PO:Temps	2202192	40	132,71	0,000	***
Type_Sol:Type_PO:Temps	56133	40	3,38	0,000	***
Residuals	89609	216			

Tableau.13. Ammonification (NH₄⁺)

	SS	Df	F-value	P	
Type_Sol	0,9	1	22,15	0,000	***
Type_Type_PO	1094,5	5	5165,58	0,000	***
Temps	215,6	10	508,74	0,000	***
Type_Sol:Type_PO	0,5	5	2,57	0,027	*
Type_Sol:Temps	0,0	10	0,10	0,999	NS
Type_Type_PO:Temps	53,4	50	25,22	0,000	***
Type_Sol:Type_PO:Temps	0,3	50	0,15	0,999	NS
Residuals	11,2	264			

Tableau.14. Nitrification (NO₃⁻)

	SS	Df	F-value	P	
Type_Sol	122,1	1	1618,69	0,000	***
Type_Type_PO	3037,6	5	8056,99	0,000	***
Temps	895,0	10	1186,98	0,000	***
Type_Sol:Type_PO	140,0	5	371,28	0,000	***
Type_Sol:Temps	11,7	10	15,50	0,000	***
Type_Type_PO:Temps	220,1	50	58,39	0,000	***
Type_Sol:Type_PO:Temps	25,0	50	6,63	0,000	***
Residuals	19,9	264			

Tableau 15. Minéralisation de l'azote (N.NH₄⁺+ N.NO₃⁻)

	SS	Df	F-value	P	
Type_Sol	144,1	1	741,56	0,000	***
Type_Type_PO	7748,8	5	7974,58	0,000	***
Temps	1981,9	10	1019,82	0,000	***
Type_Sol:Type_PO	156,0	5	160,56	0,000	***
Type_Sol:Temps	12,6	10	6,48	0,000	***
Type_Type_PO:Temps	481,2	50	49,52	0,000	***
Type_Sol:Type_PO:Temps	26,0	50	2,68	0,000	***
Residuals	51,3	264			

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5%

Tableau 16. a .Salinité

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	NS	393.163	A
2	2SS	328.512	B

Tableau.16. b. Type de Produit organique

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	FV	784.954	A
2	FD	413.966	B
3	FC	350.796	C
4	FB	312.105	D
5	RPD	216.463	E
6	OPO	60.741	F

Tableau.16.c. Temps

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
9	56	513.911	A
8	49	489.598	B
7	42	466.764	C
6	35	444.052	D
5	28	403.837	E
4	21	360.358	F
3	14	300.449	G
2	7	206.811	H
1	1	52.757	I

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5% (Ammonification (NH₄⁺)

Tableau 17.a. Salinité

F1	Libelles	Moyennes	Groupeshomogènes
1	NS	3.05586	A
2	SS	2.95848	B

Tableau. 17.b. Type de Produit organique

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	FV	5.73864	A
2	FD	3.77909	B
3	FC	3.23864	C
4	FD	3.15500	D
5	RPD	1.74182	E
6	OPO	0.38985	F

Tableau. 17.c. Temps

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
11	56	3.83389	A
10	49	3.76722	A
9	42	3.52583	B
8	39	3.42333	C
7	28	3.42333	D
6	21	3.27139	E
5	14	3.01528	F
4	11	2.70333	G
3	7	2.38278	H
2	3	2.09333	I
1	Z	1.42556	J

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5% (Nitrification (NO_3^-))

Tableau 18. a. Salinité

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	NS	6.17758	A
2	SS	5.06722	B

Tableau 18.b. Type de Produit organique

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	FV	9.73697	A
2	FD	6.96394	B
3	FC	6.22788	C
4	FB	6.13409	D
5	RPD	3.92682	E
6	OPO	0.74470	F

Tableau 18.c. Temps

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
11	56	7.09222	A
10	49	6.97667	A
9	42	6.81667	B
8	39	6.65500	C
7	28	6.46000	D
6	21	6.21056	E
5	14	5.83861	F
4	11	5.38361	G
3	7	4.70583	H
2	3	3.57861	I
1	Z	2.12861	J

Test de NEWMAN-KEULS - seuil = 5% de l'azote minéral ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)

Tableau 19.a. Salinité

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	NS	9.23212	A
2	SS	8.02561	B

Tableau 19.b. Type de Produit organique

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
1	FV	15.47530	A
2	FD	10.74303	B
3	FC	9.46652	C
4	FD	9.28530	D
5	RPD	5.66864	E
6	OPO	1.13439	F

Tableau 19.c. Temps

F3	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes
11	56	10.9261	A
10	49	10.7439	A
9	42	10.4536	B
8	39	10.1781	C
7	28	9.8833	D
6	21	6.21056	E
5	14	9.4819	F
4	11	8.8533	G
3	7	8.0864	H
2	3	5.6717	I
1	Z	3.5478	J

Essai de l'optimisation de la fertilisation organique (à base de fumier de volailles) de la culture de la pomme de terre en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels

1. Description botanique de la pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) appartient à la famille des Solanacées, plantes à fleurs gamopétales, dicotylédones (Darpoux, 1967).

Système aérien

- Le système aérien est annuel
- Les tiges aériennes, au nombre de 2 à 10, parfois plus, et ont un port plus au moins dressé et une section irrégulière ;
- Les feuilles composées qu'elles portent permettent, par leurs différences d'aspect et de coloration, de caractériser les variétés.
- Les fleurs, dont la couleur et le nombre caractérisent les variétés. Sont généralement autogames, mais souvent stériles.
- Les fruits ou baies qu'elles produisent contiennent des graines dont l'intérêt est nul en culture (Soltner, 1979).

Système souterrain

Le système souterrain porte des tubercules vivaces.

- Les racines, nombreuses et fines, fasciculées et peuvent pénétrer profondément le sol, s'ils sont suffisamment meubles.
- Les tiges souterraines ou rhizomes, ou stolons, sont courtes et leurs extrémités se renflent en tubercules
- Les tubercules sont les organes de conservation qui permettent de classer la pomme de terre parmi les plantes vivaces à multiplication végétative (Fig 1.)

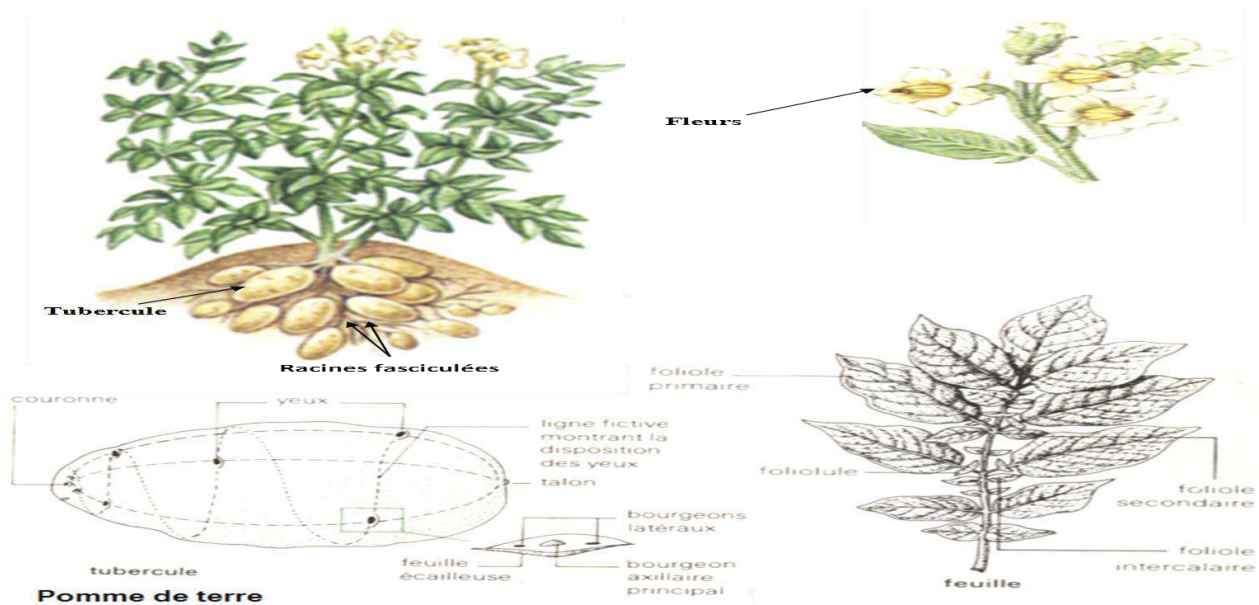


Figure 1. Morphologie de la pomme de terre (Soltner, 1979).

2. Cycle de développement de la pomme de terre

La figure 2 illustre les différentes étapes du cycle de développement de la pomme de terre. Les stades végétatifs sont énumérés de façon détaillée ci-dessous:

- Germination et émergence de la plantule: A la fin du repos végétatif, le germe rentre en croissance s'il n'y a pas dormance induite par les conditions du milieu .
- Développement des feuilles (30 à 40 jours après l'émergence (JAE)) : À partir des germes produits par le tubercule, se forment des tiges feuillées puis des stolons et des rameaux.
- Formation des tubercules et émergence de l'inflorescence (50 à 60 JAE) : Au bout d'un certain temps, variable selon les variétés et le milieu, les extrémités des stolons cessent de croître et se renflent pour former, en une ou deux semaines, les ébauches des tuberculés : c'est la tubérisation. Elle se prolonge jusqu'au fanage de la plante, par la phase de grossissement
- Floraison et développement des tubercules (60 à 80 JAE) :
- Croissance des tubercules est très lente pendant la première phase, s'accélère à partir des 55^{ème} et 65^{ème} jours et atteint une vitesse plus importante que celle de la partie verte .
- Développement des fruits et la poursuite du développement des tubercules (70 à 90 JAE).
- Sénescence des feuilles et arrêt de développement des tubercules (85 à 130 JAE)

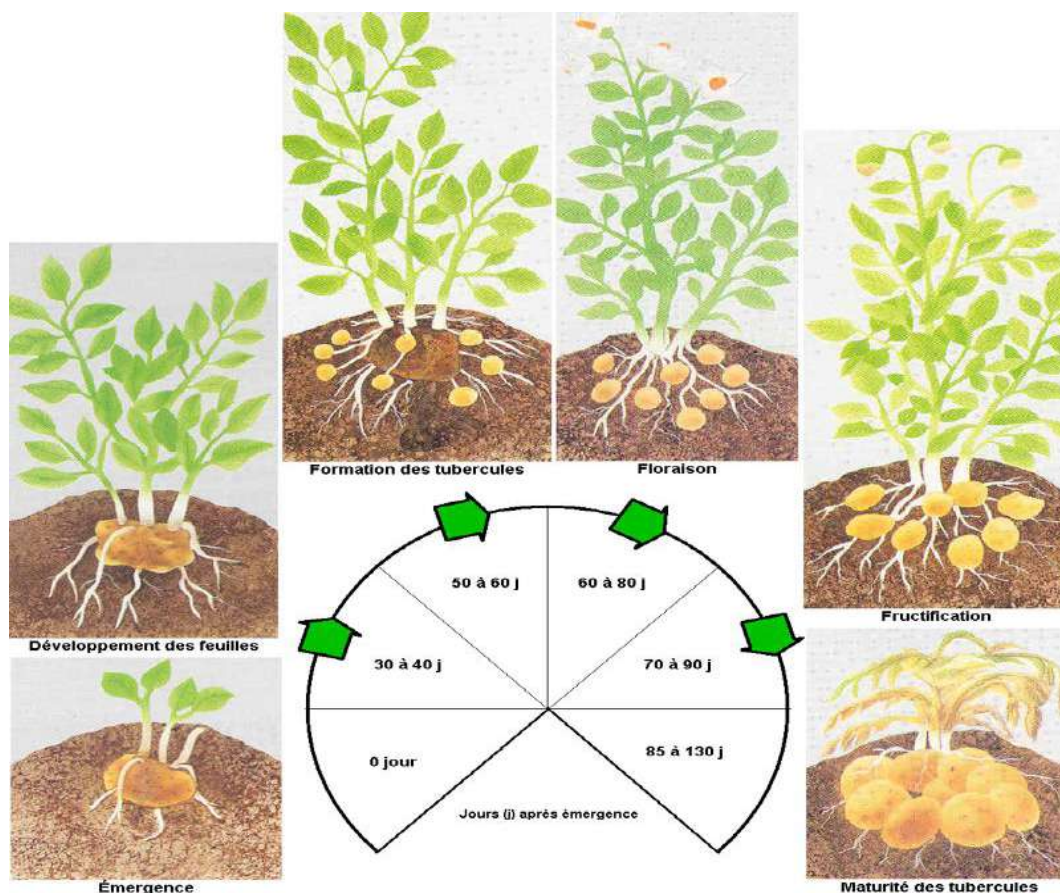


Figure 2. Cycle végétatif de la pomme de terre (Moëgne, 2008)

3. Caractéristiques de la variété " Spunta"

Le matériel végétal ayant fait l'objet de notre étude concerne la pomme de terre (*Solanum tuberosum L*), variété Spunta, originaire de Hollande. Selon NIVAP (2007), les caractéristiques de cette variété, sont les suivantes :

- **Germe** : Grand, cylindrique et gros; bourgeon terminal grand à moyen ; radicules abondantes à assez nombreuses.
 - **Plante** : Taille haute, structure feuillage du type intermédiaire ; tiges port semi dressé, coloration anthocyanique moyenne ; feuilles grandes à moyenne, vert foncé, silhouette mi-ouverte; floraison abondante à modérée.
 - **Feuille** : Vert franche, peu divisée, mi-ouverte, foliole moyenne, limbe cloque
 - **Fleur** : Blanche, bouton floral partiellement pigmenté
 - **Tubercules** : Très gros, allongée; peau jaune, lisse; chair jaune pale; forme uniforme; yeux très superficiels ; bonne résistance au noircissement interne (Photos 1. A , B).
 - **Aptitude à la conservation** : Assez faible
 - **Maturité** : Me- précoce, dormance mi-longue à longue.
 - **Matière sèche** : Bon à moyen
 - **Qualité culinaire**: Assez bonne tenue à la cuisson.
 - **Sensibilité aux maladies**
 - ✓ Mildiou du feuillage : Moyennement sensible.
 - ✓ Mildiou du tubercule : Moyennement sensible.
 - ✓ Galle verruqueuse : Non attaquée.
 - ✓ Gale commune : Assez sensible.
 - Virus X : R.A.S.
 - Virus A : Résistante.
 - Virus Y : Assez peu sensible.
- Enroulement : Assez sensible (FAO, 2008).

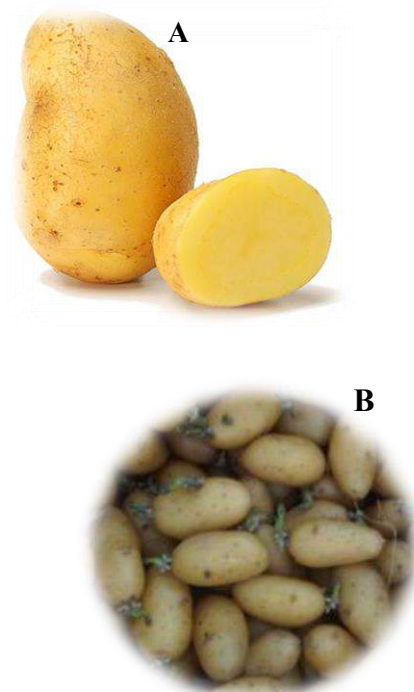


Photo 1. Tubercules de pomme de terre : **A.** Variété Spunta
B. Semence de Spunta

4. Besoins hydriques de la pomme de terre

Les besoins hydriques de la pomme de terre s'évaluent entre 400 et 600 mm selon les conditions climatiques, le type de sol et la longueur du cycle. Les besoins hydriques de la pomme de terre (culture de saison) s'évaluent de 4.000 à 6.000 m³ / ha) (TCMI , 2010).

Tableau 1. Doses d'irrigation en fonction de stade phénologique de la pomme de terre

Stades phénologiques	Levée et début de recouvrement	Initiation des tubercules	Grossissement des tubercules	Maturation
Dose d'irrigation (goutte à goutte)	Faibles	Elevées	Elevées	Faibles

5. Besoins de la pomme de terre en unités fertilisantes

- **Fumure de fond**

Azote : 20 à 30 unités/ha soit 100 à 150 kg de sulfate d'ammoniaque à 21%.

P₂O₅ : 150 unités/ha soit 850 kg de superphosphate à 18%

K₂O : 180 à 200 unités/ha soit 375 à 400 kg de sulfate de potasse à 48%.

- **Fumure de couverture**

Azote: 100 unités/ha soit 300 kg d'ammonitrate à 33.5% fractionnés en trois périodes: Levée, 1^{er} buttage et 2^{ème} buttage.

Les doses préconisées ne sont que des moyennes et doivent être adaptées en fonction de la richesse du sol.

Tableau 2. Fumures préconisées pour la pomme de terre

Auteur	N (Kg/ha)	P₂O₅ (Kg/ha)	K₂O (Kg/ha)
Gros (1979)	120 – 180	150 – 200	150 – 180
Zuang (1982)	100 – 200	100 – 120	20 – 30
Van Deer Zaag (1990)	150 – 300	100 – 150	100 – 180

6. Entretien de la culture et traitement phytosanitaires

➤ Binage

Il consiste à l'élimination des mauvaises herbes à chaque fois qu'elles poussent. L'opération a été réalisée manuellement après la levée (30 jours après plantation) pour chaque année culturale.

➤ Buttage

Le buttage favorise la tubérisation, évite le verdissement des tubercules et facilite leur arrachage. Il limite aussi les risques de contamination des tubercules par mildiou. Deux buttages ont été réalisés manuellement durant le cycle de la plante pour chaque année culturale.

➤ Traitement phytosanitaires

Les traitements fongicides réalisés en cours de l'essai ont été surtout dirigés contre le mildiou. Ils ont été effectués par pulvérisation foliaire, avec le pulvérisateur à dos. Trois traitements contre le mildiou, le premier a été effectué avant l'apparition de la maladie (50 JAP), et les deux autres sont appliqués respectivement à 2 et 3 mois après plantation, suite à l'apparition des premiers symptômes de la maladie du mildiou pendant les 2 mois après plantation, les produits utilisés sont :

MANEBE : Fongicide non systémique. Il est utilisé contre les maladies cryptogamiques

MANMEDIA : Fongicide à réaction efficace sur un grand nombre de champignons tels que le Mildiouexcoriose. black-rot. sentoriose. rouille.



Photo 2. A, B. Traitements phytosanitaires

7. Echelle de classification de la salinité du sol et de l'eau d'irrigation

Tableau 3. Echelle de la salinité du sol en fonction de la conductivité électrique de l'extrait 1/5 (Aubert, 1978)

CE (dS m ⁻¹)	Degré de salinité
CE < 0.6	Sol non salé
0.6 < CE < 0.2	Sol peu salé
0.2 < CE < 2.4	Sol salé
2.4 < CE < 0.6	Sol très salé
CE > 0.6	Sol extrêmement salé

Tableau 4. Evaluation de la qualité de l'eau d'irrigation (Dallal et Halitim, 1994)

Conductivité électrique (dS m ⁻¹)	Concentration (g /l)	Evaluation Américain	Evaluation Russe	Evaluation Durand pour l'Algérie
CE < 0.25	< 0.2	Faiblement salée	Bonne qualité	Non saline
0.25 < CE < 0.75	0.2- 0. 5	Moyennement salée	-	Salinité moyenne
0.75 < CE < 2.25	0.5-1.5	Fortement salée	Risque de salinisation	Forte salinité
2.25 < CE < 5	1.5-3	Très fortement salée	-	Très forte salinité
5 < CE < 20	3-7	Salinité excessive	Ne peut être utilisée sans lessivage	Salinité excessive

8. Méthodes de la caractérisation de l'eau d'irrigation (Rodier *et al.*, 2005)

pH et conductivité électrique : ils ont été mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multi paramètre de type de type 315i/SET.

Résidu sec : représente le poids de sels solubles par litre d'eau, séché à 105°C. Il a été déterminé pour estimer la charge saline des eaux.

Bilan ionique de l'eau

- ✓ **Les chlorures** : Les ions Cl⁻ ont été dosés par une solution titrée de nitrate d'argent (AgNO₃, 0.02N) en présence de chromate de potassium (KCrO₄). Les chlorures vont se précipiter sous forme de chlorure d'Argent (AgCl) .
- ✓ **Les bicarbonates** : Le dosage des ions HCO₃⁻ a été effectué se fait par acidimétrie à l'aide d'une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ à 0.02 N. L'indicateur coloré utilisé est le vert de Bromocrésol qui donne une couleur bleue.
- ✓ **Les Sulfates (SO₄²⁻)** : Les sulfates ont été dosés par spectrophotométrie UV visible à 420 nm, après la précipitation des ions à l'état de sulfate de baryum, en présence de BaCl₂.
- ✓ **Le calcium** : le calcium a été dosé par complexométrie dans un milieu alcalin à pH = 10 en présence de la soude (NaOH). La tritration se fait par l'acide éthylène diamine tétra acétique (E.D.T.A.), avec le murexide comme indicateur coloré.
- ✓ **Le magnésium** : les teneurs en ions Mg⁺⁺ ont été calculées par la différence de la dureté totale et du Calcium exprimés en méq/l.
- ✓ **Sodium et le Potassium** : le dosage de ces deux ions a été réalisé par spectrophotométrie à flamme.

Tableau 7. Corrélation de Pearson entre les 32 paramètres étudiés durant les quatre années de la période expérimentale

Pearson corrélation	Ca / Na (f)	Ca / Na (r)	Ca (f)	Ca (r)	Cl (f)	Cl (r)	BSR	BSA	BSR/BSA	K/Na (f)	K/Na (r)	K (f)	K (r)	SF	N (f)	N (r)	Na (f)	Na (r)	NO ₃ (f)	NO ₃ /Cl (f)	NO ₃ /Cl (r)	NO ₃ (r)	Nom (t)	Nom (tub)	Ph. (f)	Ph. (r)	P. H	Prol	C. tub	Chl. Tot	Rdt. Tot	Rdt. Tu			
Ca / Na (f)	1																																		
Ca / Na (r)	0,92	1																																	
Ca (f)	0,73	0,73	1																																
Ca (r)	0,59	0,67	0,91	1																															
Cl (f)	-0,53	-0,51	-0,16	-0,08	1																														
Cl (r)	-0,52	-0,49	-0,12	-0,01	0,87	1																													
BSR	0,72	0,77	0,76	0,75	0,42	0,40	1																												
BSA	0,75	0,81	0,81	0,81	0,36	0,32	0,90	1																											
BSR/BSA	0,03	0,00	0,01	-0,01	-0,11	-0,15	0,29	-0,13	1																										
K/Na (f)	0,97	0,93	0,72	0,62	0,53	0,53	0,77	0,79	0,04	1																									
K/Na (r)	0,92	0,96	0,73	0,62	0,53	0,54	0,79	0,82	0,03	0,96	1																								
K (f)	0,78	0,81	0,90	0,86	0,31	0,29	0,83	0,87	0,05	0,85	0,86	1																							
K (r)	0,78	0,81	0,89	0,85	0,32	0,31	0,84	0,87	0,05	0,84	0,87	0,98	1																						
SF	0,72	0,79	0,79	0,78	0,42	0,33	0,82	0,84	0,05	0,74	0,77	0,80	0,81	1																					
N (f)	0,74	0,75	0,85	0,78	0,26	0,25	0,69	0,74	0,030	0,79	0,80	0,91	0,90	0,66	1																				
N (r)	0,74	0,76	0,85	0,79	-0,26	0,25	0,70	0,75	0,020	0,79	0,80	0,91	0,91	0,68	0,98	1																			
Na (f)	-0,73	-0,67	-0,16	-0,02	0,62	0,66	-0,34	-0,34	-0,04	-0,72	-0,67	-0,35	-0,35	-0,30	-0,35	-0,35	1																		
Na (r)	-0,68	-0,70	-0,14	-0,01	0,62	0,66	0,33	0,35	-0,01	0,67	-0,70	-0,34	-0,35	-0,31	-0,35	-0,35	0,94	1																	
NO ₃ (f)	0,90	0,89	0,84	0,75	0,30	-0,29	0,74	0,82	-0,05	0,91	0,90	0,89	0,88	0,75	0,85	0,86	-0,54	-0,52	1																
NO ₃ /Cl (f)	0,93	0,91	0,79	0,68	0,57	0,52	0,79	0,83	0,01	0,93	0,92	0,84	0,84	0,80	0,78	0,79	-0,60	-0,58	0,93	1															
NO ₃ /Cl (r)	0,93	0,92	0,78	0,68	0,51	0,51	0,78	0,82	0,01	0,94	0,94	0,85	0,85	0,80	0,80	0,80	-0,62	-0,60	0,95	0,98	1														
NO ₃ (r)	0,89	0,89	0,83	0,74	0,31	0,31	0,73	0,80	-0,04	0,90	0,90	0,87	0,88	0,74	0,84	0,84	-0,55	-0,54	0,99	0,92	0,96	1													
Nom (t)	0,10	0,08	0,12	0,07	-0,05	-0,08	0,16	0,13	0,07	0,14	0,14	0,16	0,17	0,06	0,17	0,16	-0,01	-0,01	0,10	0,12	0,12	0,09	1												
Nom (tub)	0,70	0,75	0,75	0,74	0,21	-0,19	0,68	0,78	-0,13	0,75	0,75	0,80	0,78	0,71	0,71	0,72	-0,30	-0,30	0,82	0,76	0,78	0,80	0,06	1											
Ph (f)	0,81	0,81	0,83	0,73	0,21	0,22	0,67	0,74	-0,03	0,84	0,84	0,89	0,88	0,65	0,90	0,90	-0,48	-0,47	0,95	0,84	0,88	0,95	0,13	0,74	1										
Ph (r)	0,83	0,83	0,81	0,71	-0,20	-0,21	0,67	0,75	-0,04	0,85	0,85	0,86	0,86	0,64	0,87	0,86	-0,50	-0,49	0,96	0,85	0,89	0,95	0,11	0,73	0,97	1									
P H	0,82	0,83	0,75	0,67	0,29	0,29	0,77	0,83	-0,03	0,83	0,85	0,80	0,82	0,71	0,74	0,74	-0,49	-0,49	0,90	0,87	0,89	0,90	0,12	0,73	0,86	0,87	1								
Prol	0,51	0,57	0,82	0,86	-0,01	0,09	0,69	0,72	0,01	0,50	0,51	0,72	0,71	0,77	0,82	0,62	0,01	0,01	0,65	0,59	0,57	0,63	0,05	0,57	0,60	0,59	0,61	1							
C tub	0,10	0,14	0,06	0,05	-0,13	-0,14	0,09	0,07	0,08	0,12	0,12	0,11	0,09	0,08	0,13	0,13	-0,11	-0,15	0,08	0,09	0,08	0,07	0,06	0,03	0,09	0,09	0,05	0,02	1						
Chl Tot	0,79	0,79	0,81	0,72	0,31	-0,30	0,75	0,79	0,05	0,83	0,84	0,88	0,89	0,68	0,91	0,91	-0,45	-0,44	0,87	0,83	0,84	0,86	0,12	0,68	0,89	0,88	0,83	0,60	0,11	1					
Rdt Tot	0,80	0,84	0,75	0,75	0,50	0,45	0,83	0,85	0,03	0,83	0,82	0,82	0,81	0,86	0,68	0,70	-0,43	-0,40	0,78	0,84	0,82	0,78	0,07	0,76	0,66	0,65	0,70	0,68	0,09	0,67	1				
Rdt Tu	0,88	0,89	0,79	0,72	0,37	0,35	0,80	0,84	0,01	0,88	0,87	0,82	0,82	0,80	0,74	0,74	-0,53	-0,51	0,90	0,89	0,90	0,90	0,07	0,80	0,80	0,82	0,84	0,66	0,08	0,77	0,87	1			

Signification : $P < 0.001$ *** ; $P < 0.01$ ** ; $P < 0.05$ *

Ca / Na (f) : Ca / Na (feuilles) ; Ca / Na (r) : Ca / Na (racines) ; Ca (f) : Ca (feuilles) ; Ca (r) : Ca (racines) ; Cl (f) : Cl (feuilles) ; Cl (r) : Cl (racines) ; BSR : Biomasse Sèche Racinaire (g) ; BSA : Biomasse Sèche Aérienne (tiges + feuilles) ; BSR/BSA : Biomasse Sèche Racinaire / Biomasse Sèche aérienne ; K/Na (f) : K/Na (feuilles) ; K/Na (r) : K/Na (racines) ; K (f) : K (feuilles) (mg/g) ; K (r) : K (racines) (mg/g) ; SF : Surface Foliaire /plant (cm²) ; N (f) : N (feuilles) (mg/g) ; N (r) : N (racines) (mg/g) ; Na (f) : Na (feuilles) (mg/g) ; Na (r) : Na (racines) (mg/g) ; NO₃ (f) : NO₃ (feuilles) ; NO₃/Cl (f) : NO₃/Cl (feuilles) ; NO₃ (r) : NO₃ (racines) ; Nom (t) : Nombre de tiges /plant ; Nom (tub) : Nombre de tubercules /plant ; Ph (f) : Phosphore feuilles (mg/g) ; Ph (r) : Phosphore racines (mg/g) ; PH : hauteur tiges (cm) ; Prol : Proline (μmol.g⁻¹MF) ; C tub : Diamètre tubercules (cm) ; Chl Tot : Chlorophylle total (mg g⁻¹ PF.) ; Rdt Tot : Rendement total (t ha⁻¹) ; Ret Tu : Rendement plant⁻¹.