

***Contribution à l'étude de l'évolution de la
matière organique des boues dans le sol***

Présenté par :

BOULAHBAL Ouahiba

M^{me}Bourayou K. Dr en Sciences Agronomiques INRAA Directeur de Thèse
Soutenu le : 01 /12 / 2011

Devant le jury composé de : M^rDjili K. Professeur ENSA Président M^rDaoud Y. Professeur ENSA
Examineur M^rOuld Ferroukh M.E. Chargé de cours ENSA Examineur

Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
Résumé . . .	7
abstract . . .	8
ص غ ل م ل ا . . .	9
liste des abréviations . . .	10
Introduction . . .	11
CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE . . .	13
1. Les boues résiduaires . . .	13
1.1. Origine des boues résiduaires . . .	13
1.2. Les différents types de boues résiduaires . . .	14
1.3. Traitement et Composition des boues résiduaires . . .	14
2. La valorisation agricole des boues résiduaires . . .	17
2.1. Valeurs agronomiques des boues résiduaires . . .	18
2.2. Effets de l'apport des boues sur le sol . . .	20
2.3. Effets positifs de l'apport des boues résiduaires sur les cultures . . .	22
2.4. Effets négatifs de l'apport des boues résiduaires sur les cultures . . .	23
Conclusion . . .	24
CHAPITRE II: MATÉRIEL ET MÉTHODES . . .	25
1. Présentation de la zone d'étude . . .	25
1.1. La localisation du site d'expérimentation . . .	25
1.2. Les données climatiques . . .	25
2. Matériel d'étude . . .	26
2.1. Le sol . . .	26
2.2. Les boues résiduaires . . .	28
2.3. Le végétal . . .	30
3. Méthodes utilisées dans l'étude . . .	30
3.1. Échantillonnage et analyses du sol . . .	30
3.2. Méthodes d'analyses de boues . . .	31
3.3. Méthodes d'analyses des végétaux . . .	32
3.4. Méthode de mensuration de la hauteur des plants du maïs fourrager . . .	32
3.5. Méthode des traitements statistiques . . .	32
3.6. Dispositif expérimental . . .	32
3.7. Déroulement de l'essai . . .	34
3.8. Les paramètres étudiés . . .	35
CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS . . .	36
1. Effets de l'apport des boues sur le sol . . .	36
1.1. Les paramètres chimiques . . .	36
1.2. Les paramètres physiques . . .	53
2. Effet de l'apport des boues sur la culture . . .	59

2.1. La croissance des plantes . .	59
2.2. Rendements en matière sèche totale . .	59
2.3. Rendements en grains . .	61
2.4. Teneurs des grains du maïs en azote . .	63
2.5. Discussion . .	64
3. Relation entre les paramètres étudiés . .	66
3.1. Relation entre la teneur du sol en carbone et la densité apparente . .	66
3.2. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et la teneur de la graine de maïs en azote . .	66
3.3. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement en matière sèche totale (MST) . .	67
3.4. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement grains . .	68
Références bibliographiques . .	70
ANNEXES . .	76

Dédicace

Dedicaces A la memoire de mon tres cher père a ma tres chere mere a mon epoux a mes enfants : islam et nesrine a tous mes freres et soeurs a tous mes neveux, particulierement Amine et hamza a toutes mes nièces, spécialement amina, asma, hiba et meriem a tous mes ami(e)S Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA). Je saisis cette occasion pour remercier tous les chercheurs et le personnel de soutien du laboratoire de Science du Sol et de la station Mehdi Boualem (INRAA) qui ont participé à l'élaboration et l'exécution dudit projet.

Egalement, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, et sans qui, ce travail n'aurait pu aboutir.

Je tiens d'abord à remercier Mme BOURAYOU K., directrice de thèse, qui a accepté de diriger ce travail. Ses conseils et ses encouragements m'ont beaucoup aidée à la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

J'adresse ma profonde gratitude à M. DJILI K., Professeur au département de pédologie, pour avoir bien voulu présider le jury. Je suis très sensible à l'honneur qu'il me fait et je tiens à le remercier très vivement.

J'exprime ma très grande reconnaissance à M. DAOUD Y., Professeur au département de pédologie, pour le soutien et la disponibilité qu'il m'a accordée pour faire avancer ce travail. Ses connaissances, ses orientations et ses encouragements m'ont beaucoup aidée pour finaliser ce document. Il a fait preuve, à la fois, d'une grande patience et gentillesse, et d'un esprit responsable et critique. Que je puisse le remercier très vivement et je lui exprime, aussi, ma profonde gratitude pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier très vivement M. OULD FERROUKH M.E., Chargé de cours au département de pédologie, pour avoir accepté d'être dans le jury, et pour m'avoir éclairée sur plusieurs questionnements relatifs à mon étude. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Sans le soutien moral et les encouragements de mon époux, je n'aurais pu mener ce travail à terme. Que je puisse lui exprimer ma profonde reconnaissance.

M. BOURENNANE N. et M^{elle} KERNOUAT Z. (chercheurs et membres du projet), m'ont beaucoup soutenue et aidée dans la réalisation du travail sur le terrain. Je les remercie très vivement.

J'adresse mes vifs remerciements à mes collègues de l'INRAA : CHEBOUTI A. et YAHYAOUI S., qui m'ont aidée à la réalisation des traitements statistiques, et AZIEZ F., HERMOUCHE Z., BRADAI R., DJELLAL L. et GHEZALI M. (techniciens au laboratoire de Science du Sol) qui m'ont beaucoup aidée dans la réalisation des analyses au laboratoire.

Finalement je tiens à remercier très vivement mes ami(e)s et mes collègues du laboratoire de Science du Sol : BOURENNANE N., ZIZA F. Z., BACHA F., AZOUAOU Z., ZIANE D. et OUZZANE A., pour leurs aides, leurs encouragements et leurs soutiens.

Résumé

Ce travail a pour objectif le suivi temporel de l'effet de la matière organique des boues résiduaires sur un sol argilo-limoneux et sur une culture test le «maïs fourrager». L'expérimentation a été menée en plein champ sur deux campagnes. Trois doses de boues (30, 45 et 60 t/ha) de la station d'épuration de Reghaïa (Alger) ont été apportées, en une seule fois, en première année d'expérimentation.

La dégradation de la matière organique des différentes doses de boues a engendré une augmentation très hautement significative, par rapport au témoin (sans apport), des teneurs du sol en azote minéral, en azote total et en carbone organique. Ceci a permis d'accroître significativement les rendements du maïs fourrager (MST et grain) et la teneur de la graine en azote total.

En revanche, les paramètres physiques du sol (densité apparente et rétention en eau à différents potentiels matriciels) n'ont pas été affectés significativement par les doses de boues apportées.

Par ailleurs, les rendements grain, les rendements MST et la teneur de la graine du maïs en azote sont très significativement corrélés à la teneur du sol en azote minéral. Il existe aussi une corrélation négative et significative entre la densité apparente du sol et sa teneur en carbone organique.

Mots clés: boues résiduaires, sol argilo-limoneux, maïs fourrager, impact sur le sol, impact sur la culture, valorisation agricole.

abstract

The objective of this study is to follow-up the temporal effect of organic matter, contained in sewage sludge, on clay-loam soil and a culture of forage maize. The experiment was conducted in open field on two campaigns. Three doses of sludge (30, 45 and 60 t / ha), deriving from wastewater treatment plant of Reghaïa (Algiers), were made only once during the first year of experimentation.

Degradation of organic matter of different doses of sludge has increased very significantly, compared with the control (without addition), the levels of soil mineral nitrogen, total nitrogen and organic carbon. This allowed increasing very significantly the yields of forage maize (grain and TDM) and the content of total nitrogen in the seed.

In contrast, soil physical parameters (bulk density and water retention at different suction forces) were not significantly affected by the doses of sludge.

In addition, the grain yield, TDM yield and the forage maize seed nitrogen are significantly correlated with the content of the soil mineral nitrogen. There is also a significant negative correlation between soil bulk density and organic carbon content.

Keywords: sewage sludge, clay-loam soil, forage maize, impact on soil, impact on culture, agricultural valorization.

ص خ ل م ا

الهدف من هذه الدراسة، هو متابعة زمنية لتأثير المادة العضوية الواردة من أوحال مياه الصرف الصحي، على تربة طينية طميية وعلى الذرة الحقلية.

أجريت التجربة في حقل مفتوح على حمتين. أعطيت ثلاث جرعات من الأوحال (30 45 و 60 ط/هكتار)، المنبثقة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة رعوية (الجزائر)، مرة واحدة فقط خلال السنة الأولى من التجريب.

تحلل المادة العضوية لهذه الجرعات زاد بشكل ملحوظ جداً، بالمقارنة مع التحكم (بدون إضافة)، في مستويات النيتروجين المعدني، النيتروجين الكلي والكربون العضوي في التربة.

سمحت هذه الزيادات في مستوى غلة الذرة الحقلية (الحبوب و المجموع الكلي للمادة الجافة "TDM") ومحتوى النيتروجين الكلي في البذور.

في المقابل، لم تكن لهذه الجرعات تأثير ملحوظ على المعلمات الفيزيائية للتربة (الكثافة الظاهرية واحتباس الماء بقوات ضغط مختلفة).

بالإضافة إلى ذلك، هناك علاقة ترابط بشكل ملحوظ جداً بين مستوى النيتروجين المعدني في التربة و محصول الذرة الحقلية (الحبوب و المجموع الكلي للمادة الجافة «TDM») و محتوى النيتروجين في بذور الذرة. كما أن هناك وجود ارتباط سلبى كبير بين الكثافة الظاهرية للتربة ومحتوى الكربون العضوي. الكلمات الدالة: أوحال مياه الصرف الصحي، تربة طينية طميية، الذرة الحقلية، تأثير على التربة والنبات، تنمية زراعي.

liste des abréviations

- **ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- **AFNOR** : Association Française de Normalisation.
- **CE** : conductivité électrique.
- **CEC** : capacité d'échange cationique.
- **CM** : carré moyen.
- **CTO** : composés traces organiques.
- **DBO5**: demande biologique en oxygène sur cinq jours.
- **DCO**: demande chimique en oxygène.
- **DDL** : degré de liberté.
- **E** : épis.
- **ETM**: éléments traces métalliques.
- **F.A.O.** : [Food and agriculture organization](http://www.fao.org/) , (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).
- **INRA** : institut national de la recherche agronomique.
- **INRAA** : institut national de la recherche agronomique d'Algérie.
- **IRDA** : institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
- **Meq** : milliéquivalent.
- **MO**: matière organique.
- **MS** : matière sèche.
- **MST** : matière sèche totale.
- **NE** : nombre d'épis.
- **NG** : nombre de graines.
- **NTK**: azote total Kjeldhal.
- **O.N.A**: office nationale d'assainissement.
- **PMG** : poids de mille graines.
- **PPDS** : plus petite différence significative.
- **PPM** : parties par million.
- **Rdt** : rendement.
- **SCE** : somme des carrés des écarts.
- **STEP**: station d'épuration.
- **TDM** : total dry mater.

Introduction

La matière organique des sols est une composante particulièrement importante et sensible de leur fertilité et de leur résistance à la dégradation ou à l'érosion. Elle participe de façon générale à leur aptitude à la production végétale, à la constitution de leur réserve en éléments nutritifs et au maintien de leur stabilité structurale. Le maintien d'un stock de carbone organique suffisant dans les sols est une condition indispensable à la durabilité physique des agrosystèmes (Celerier, 2008; Balesdent et Chenu, 2009).

Les sols agricoles présentent, dans la plupart des cas, des bilans négatifs en matière organique (Scheiner, 2005). Les facteurs responsables de cet appauvrissement diffèrent d'un pays à un autre. Dans les pays européens, particulièrement en France, l'intensification de l'agriculture liée à la conversion des prairies permanentes en fourrage annuel, a été un facteur déterminant de la baisse des teneurs en matières organiques des sols (Tessier, 2009). Dans les régions tropicales, du fait des températures beaucoup plus élevées qui accélèrent la minéralisation de la matière organique, la décroissance des teneurs est accentuée et peut atteindre actuellement près de 70 % à partir de la mise en culture (Robert et Cheverry, 2009).

En Algérie, la majorité des sols agricoles sont caractérisés par leur faible taux de matière organique. Cet état est dû au type de climat qui favorise la minéralisation rapide de la matière organique dans les sols, aux pratiques culturales non appropriées et aux faibles apports organiques suite à la raréfaction du fumier de ferme habituellement utilisé (Dridi et Toumi, 1998 ; Kribaa *et al.*, 2001). En effet, le fumier de ferme est très recherché dans notre pays compte tenu du besoin important, surtout en cultures maraîchères, et des systèmes d'élevage (les types de conduites des troupeaux et l'utilisation de la paille comme aliment du cheptel) qui ne permettent pas souvent une production importante de ce substrat (F.A.O, 2005). De ce fait, cette production reste insuffisante pour restaurer et entretenir le stock humique des sols cultivés. Devant cette situation le recours à d'autres sources de matière organique (compost urbain, fientes de volailles, boues résiduaires) devient impératif.

Par ailleurs, l'augmentation importante des quantités de boues résiduaires produites dans notre pays, qui est de l'ordre de 2000 t/mois (O.N.A, 2009), et la volonté politique de préserver l'environnement et valoriser la fraction organique de ces déchets, font que ces boues apparaissent comme une source croissante de matière organique exogène disponible pour l'agriculture.

La valorisation agronomique des boues résiduaires participe à la protection durable de l'environnement, et tire profit de ces produits organiques en améliorant la fertilité des sols cultivés. En effet, il est généralement admis que ces déchets ont un pouvoir fertilisant en apportant au sol de l'azote, du phosphore et de la matière organique (Nicourt et Barbier, 2009 ; Wu *et al.*, 2010; Mazen *et al.*, 2010), améliorant ainsi ses propriétés physiques (rétention en eau, porosité, stabilité structurale...), chimiques (disponibilité des éléments nutritifs) et biologiques (bonne activité microbologique) (Grimaud, 1996; Le Bissonais, 2009; Capowiez, 2009). Cependant, leur utilisation ne peut se pérenniser sans la garantie de leur innocuité (teneur en micropolluants et en pathogènes) (Annabi, 2005).

L'usage agricole des boues est connu dès l'antiquité, il s'est développé en Europe depuis le choc pétrolier de 1973 pour limiter l'importation des engrais industriels, notamment

les engrais phosphatés. Actuellement, en France, les deux tiers des boues urbaines, soit environ 0,5 millions de tonne par an (matière sèche), sont recyclés par l'agriculture (Nicourt et Barbier, 2009).

Cependant, dans notre pays, en l'absence d'un cadre réglementaire autorisant leur réutilisation agricole, la valorisation des boues résiduaire reste au stade de recherche (Aït Hamou et Boulahbal, 1998; Benterrouche, 2007; Karoune, 2008; Tamrabet *et al.*, 2009; Ouanouki *et al.*, 2009; Ramdani, 2010), et au stade expérimental avec des tentatives limitées de certaines stations d'épuration (O.N.A, 2009).

De ce fait, plusieurs questions se posent sur les conséquences de l'épandage de ces déchets en agriculture :

- Quels sont les effets sur la fertilité des sols, sur leur qualité ?
- Quel est le devenir des éléments en traces, des composés traces organiques, des pathogènes éventuellement présents dans les boues épandues ?
- L'épandage à court, moyen et long terme n'engendre-t-il pas de risques sanitaires ?

D'autres questions se posent sur l'efficacité agronomique de ces déchets qu'il est nécessaire de maîtriser pour pouvoir les intégrer dans les itinéraires techniques des agriculteurs. En particulier, leur valeur fertilisante doit être connue pour ajuster les fertilisations minérales complémentaires aux besoins des cultures. Pour répondre à ces questions, les essais au champ de longue durée sont des outils permettant d'étudier les effets des épandages sur la qualité des sols, des récoltes et des eaux circulant dans les sols.

Notre travail, s'inscrit dans ce contexte. Il a comme objectifs :

- De caractériser les boues issues de la station d'épuration de Reghaïa
- D'étudier leur effet sur le sol
- D'étudier leur effet sur le comportement d'une culture test (maïs fourrager)

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui traite des généralités sur l'origine des boues résiduaire, leur valorisation agronomique, leurs effets sur les sols et leurs effets sur la culture du maïs fourrager et sur d'autres cultures.
- Le deuxième chapitre est consacré aux matériels utilisés et aux méthodes adoptées.
- Le troisième chapitre présente les résultats obtenus sur les effets des boues sur le sol amendé (paramètres chimiques et physiques) et sur la culture test (hauteur des plantes, rendements et teneur des graines en azote).

Une conclusion générale est présentée à la fin de ce travail.

CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Les boues résiduelles

1.1. Origine des boues résiduelles

L'épuration des eaux usées produit des boues résiduelles. Les caractéristiques de ces boues dépendent du type de traitement des eaux usées (physico-chimique ou biologique), du procédé de stabilisation des boues (aérobie ou anaérobie, chaulage, compostage), et de leur état physique (variant d'un état liquide jusqu'au séchage) (O.T.V, 1997; Culot, 2005; Girard *et al.*, 2005).

La production des boues résiduelles à partir de l'épuration des eaux usées passe par plusieurs étapes: le prétraitement de l'eau usée, son traitement primaire (décantation primaire) et son traitement secondaire (décantation secondaire).

1.1.1. Le prétraitement de l'eau usée

Le prétraitement consiste à éliminer les matières susceptibles de gêner l'exploitation du réseau d'égouts de la station (Koller, 2004). Il comporte trois opérations : le dégrillage, le dessablage, et le déshuilage.

- **Le dégrillage:** cette opération consiste à faire passer l'effluent entre les barreaux d'une grille dont l'écartement se mesure en centimètre. On retire ainsi de l'eau les fragments de dimension supérieure à l'écartement de la grille (Bechac *et al.*, 1983).
- **Le dessablage:** il consiste à faire une décantation rapide des substances lourdes dont les diamètres varient entre 0,2 et 1 cm. Les dessableurs sont curés périodiquement et les matières solides sont généralement mélangées aux boues (Bechac *et al.*, 1983; O.T.V, 1997).
- **Le déshuilage:** cette opération permet d'éliminer les matières flottantes (huiles, hydrocarbures, éléments solides flottants). Les graisses sont extraites par voie mécanique au moyen d'un racleur de surface et sont évacuées dans une citerne pour une mise en décharge (Bechac *et al.*, 1983).

1.1.2. Le traitement primaire de l'eau usée

Il s'agit d'une décantation primaire qui permet le dépôt et l'accumulation des matières en suspension au fond du réceptacle. L'eau ne contiendra alors que la pollution dissoute et les colloïdes. Le résidu de cette première décantation constituera la boue primaire (ADEME, 2001; Guivarche, 2001).

1.1.3. Le traitement secondaire de l'eau usée

Il consiste en une décantation qui assure, au moyen d'un clarificateur, la séparation de la plus grande partie des matières en suspension. Les résidus récupérés au fond du bassin sont des boues secondaires.

Les boues issues du traitement primaire et du traitement secondaire sont mélangées et forment ainsi les boues fraîches (ADEME, 2001; Guivarche, 2001).

1.2. Les différents types de boues résiduaires

Généralement il existe deux grandes catégories de boues résiduaires qui sont les boues urbaines et les boues industrielles.

1.2.1. Les boues urbaines

Elles résultent du traitement des eaux usées d'origine domestique. Pour être réputé « urbain », un effluent doit répondre aux caractéristiques suivantes (OTV, 1997) :

- Rapport DCO/DBO₅ < 2,7 (DCO: demande chimique en oxygène, DBO₅: demande biologique en oxygène sur cinq jours)
- DCO < 750 mg/l
- NTK < 100 mg/l. (NTK: azote total Kjeldhal)

Ces données sont déterminées sur un échantillon moyen prélevé sur 24 heures, après une décantation de deux heures.

Les principaux types de boues proposés au recyclage en agriculture sont les boues liquides issues de traitements aérobies, les boues pâteuses issues de traitements aérobies ou anaérobies, les boues chaulées, les boues compostées, les boues physico-chimiques, les boues de lits de séchage et les boues de lagunage.

1.2.2. Les boues industrielles

Elles résultent du traitement des eaux usées issues des industries. Leurs caractéristiques sont liées à la nature des activités industrielles concernées.

Généralement, les industries agro-alimentaires produisent des boues organiques facilement valorisables, tandis que d'autres boues industrielles sont essentiellement minérales et comportent parfois certains éléments traces métalliques ou organiques.

1.3. Traitement et Composition des boues résiduaires

1.3.1. Traitement des boues

Les boues issues de l'épuration des eaux usées se présentent sous une forme liquide bien chargées en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes et posent beaucoup de problèmes techniques pour l'évacuation des boues ou leur stockage. Ceci nécessite donc la mise en place d'une filière de traitement dès l'installation de la station d'épuration (STEP) (Amir, 2005). Généralement, le traitement des boues a pour objectifs:

- **La stabilisation** pour empêcher ou réduire les problèmes de fermentation et d'éviter ainsi les nuisances olfactives. La stabilisation peut être biologique par voie aérobie (compostage) ou anaérobie (méthanisation), ou chimique (chaulage ou autres

traitements). La stabilisation biologique présente l'avantage de limiter l'évolution ultérieure de la composition des boues (Amir, 2005).

- **L'épaississement** qui vise à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier leur caractère. Ce procédé se fait par voie gravitaire «décantation» dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation) (Benterrouche, 2007).
- **La déshydratation** qui a pour objectif de réduire le volume des boues (plus de 97 % d'eau) pour faciliter par la suite leur transport et leur stockage. Les boues passent donc de l'état liquide à l'état pâteux ou solide. Les filtres à bandes et les centrifugeuses donnent des boues pâteuses 20-25 % de siccité, par contre les filtres-presses donnent des boues de structure plus solide (30 à 35 % de siccité) (Benterrouche, 2007).
- **Le séchage** qui consiste à éliminer en grande partie l'eau contenue dans les boues par évaporation. Il peut être réalisé soit par évaporation naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique. Selon la puissance du procédé de séchage utilisé, épaississement, déshydratation ou séchage thermique, on obtient des boues à différents pourcentages de siccité:
 - Boues liquides (4 à 10 % de MS),
 - Boues pâteuses (10 à 25 % de MS),
 - Boues solides (25 à 50 % de MS),
 - Boues granulées pour une siccité supérieure à 85 % (ADEME, 1996).

1.3.2. Composition des boues résiduares

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année, et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration (O.T.V, 1997; Girard *et al.*, 2005).

En général, les boues se composent de trois éléments: les éléments utiles (matière organique, éléments fertilisants), les éléments indésirables (éléments traces métalliques, composés traces organiques), et les micro-organismes pathogènes.

1.3.2.1. Les éléments utiles

- **La Matière organique:** Les boues contiennent généralement autant de matière organique qu'un fumier. Leur concentration en matière organique peut varier de 30 à 80%. Celle-ci est constituée de matières particulières éliminées par gravité dans les boues primaires, des lipides (6 à 19 % de la matière organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique) ainsi que des produits de métabolisation et des corps microbiens résultant des traitements biologiques (digestion, stabilisation) (ADEME, 2001; Amir, 2005).
- **Les éléments minéraux:** D'une manière générale, les boues contiennent des quantités appréciables en éléments nutritifs. Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité les besoins des cultures en éléments nutritifs (azote, phosphore, magnésium, calcium et soufre), elles peuvent aussi corriger les carences à l'exception de celles en potassium (Zebarth *et al.*, 2000). Ce sont donc ces éléments qui déterminent la qualité agronomique des boues. Les éléments les plus importants sont les suivants:
 - **L'azote** : La teneur en azote des boues représente 3 à 7% de la matière sèche. Cet azote est présent sous différentes formes, plus ou

moins rapidement assimilables par les plantes. Les boues peuvent être considérées comme des fertilisants azotés: 30 à 50 % de l'azote sont disponibles dès la première année de culture (O.T.V, 1997). Dans les boues, l'azote est présent sous deux formes: l'azote organique et l'azote minéral (NH_4^+). Les boues ne contiennent généralement pas d'azote nitrique (NO_3) ou d'azote nitreux (NO_2), sauf à l'état de traces (Grimaud, 1996).

- **Le phosphore** : Les boues sont toujours riches en acide phosphorique (2 à 7 % de la matière sèche). Le phosphore des boues est assimilable à hauteur de 70% la première année, une efficacité qui est voisine de certains types d'engrais. Compte tenu du prix du superphosphate utilisé comme engrais, cet élément (le phosphore) constitue un facteur intéressant pour la valorisation des boues (Impens et Avril, 1992; O.T.V, 1997).
- **Le potassium** : Les boues sont généralement pauvres en potassium. Elles contiennent souvent 0,5 à 1,5 % de la MS (Moleta et Consell, 2003), car cet élément reste en solution dans les eaux rejetées (O.T.V, 1997; Impens et Avril, 1992).
- **Le calcium** : Les boues sont très riches en calcium. Leur teneur en cet élément varie de 4 à 5,5 % de la MS. Quand elles sont traitées par la chaux, elles se comportent comme de véritables amendements calcaires (O.T.V, 1997).
- **Le magnésium** : Selon Impens et Avril (1992), les sels de magnésium sont très solubles et sont donc éliminés dans l'eau épurée. La teneur des boues en magnésium est faible, elle varie de 0,5 à 1,5 % de la MS.

1.3.2.2. Les éléments indésirables

- **Les éléments traces métalliques (ETM)**: Selon Baize *et al.* (2006), les ETM sont des constituants indésirables des boues résiduelles. Leur présence génère une inquiétude lorsqu'il est question d'épandre ces boues sur des sols destinés à produire des aliments pour l'homme et/ou les animaux.

Selon Terce (2001), les boues concentrent entre 70 et 90 % des quantités d'ETM des eaux usées entrantes dans la station d'épuration. L'essentiel de ces éléments vient des rejets industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants, détergents, peinture...). Les épandages des boues industrielles apportent des quantités non négligeables d'ETM aux sols. Bien que, certains sont des oligo-éléments (Zinc, Cuivre, Fer), indispensables à faibles doses aux plantes, ils peuvent devenir toxiques s'ils dépassent un certain seuil. D'autres, comme le cadmium, le plomb, et le mercure sont toxiques même à faibles doses (Benterrouche, 2007).

- **Les composés traces organiques (CTO)**: Dans les boues, une multitude de polluants organiques (hydrocarbures polycycliques aromatiques, polychlorobiphényles, phthalates etc..) peut se trouver en faible concentration (de l'ordre de $\mu\text{g}/\text{Kg}$ de MS) (Perez *et al.*, 2001 cité par Amir, 2005). Ces CTO se dégradent dans le sol à des vitesses variables et n'ont pas donc un effet cumulatif. Néanmoins, au même titre que les ETM, les CTO peuvent, à forte dose,

devenir toxiques pour les micro-organismes responsables de la fertilité des sols (Benterrouche, 2007).

1.3.2.3. Les micro-organismes pathogènes

Les boues résiduaires contiennent des milliards de micro-organismes vivants qui jouent un rôle essentiel dans le processus d'épuration. Seule une infime partie est pathogène (virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes) et elle provient en majorité des excréments humains ou animaux (Sahström *et al.*, 2004).

Pour la majorité des pathogènes, la durée de vie est limitée dans le sol. En revanche, les éléments parasitaires présentent une résistance plus élevée dans ces milieux. Pour cela, les boues doivent subir un prétraitement avant leur utilisation en agriculture (Garrec *et al.*, 2003).

2. La valorisation agricole des boues résiduaires

Cette pratique constitue une solution particulièrement favorable à l'environnement, car elle offre l'opportunité de recycler la matière organique nécessaire au sol. De plus, les boues représentent un fertilisant peu onéreux, qui permet à l'agriculteur de réduire ses charges en engrais fertilisants classiques (O.T.V., 1997).

L'aspect positif de l'utilisation agricole des boues résiduaires a été démontré par plusieurs recherches effectuées au Canada (N'Dayegamiye *et al.*, 2004; Irda, 2004; Bipfubusa *et al.*, 2006; N'Dayegamiye et Drapeau, 2009), en France (Koboulesky *et al.*, 2001 ; Daudin, 2003; Benbrahim *et al.*, 2003; Scheiner, 2005 ; Baize *et al.*, 2006; Capowicz, 2009) et en Espagne (Riguero-Rodriguez *et al.*, 2000; Pascual *et al.*, 2008; Pascual *et al.*, 2009). Ces recherches ont confirmé les impacts favorables des boues résiduaires sur la fertilité chimique, biologique et physique de différents types de sol, et sur les rendements des cultures (maïs, vigne, blé, fourrage, maraîchage, sylviculture...).

En France, l'épandage des boues en agriculture reste la principale filière de valorisation. Actuellement, les deux tiers des boues urbaines, soit environ 0,5 million de tonne par an (matière sèche) sont recyclés par l'agriculture (Nicourt et Barbier, 2009).

Aujourd'hui, en France, l'épandage des boues obéit à une réglementation qui impose le traitement pour assurer la qualité sanitaire des boues et renforce la responsabilité des producteurs des boues (Nicourt et Barbier, 2009) (tableau I).

En revanche, en Algérie, le recyclage agricole et forestier des boues résiduaires reste au stade expérimental et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, notamment sur les cultures maraîchères (Benmouffok, 1994; Ouanouki *et al.*, 2009), les cultures fourragères (Aït Hamou et Boulahbal, 1998), le blé dur (Tamrabet *et al.*, 2009), et les plantations forestières (Igoud, 2001; Roula, 2005; Benterrouche, 2007; Karoune, 2008).

Tableau I. Seuils en éléments en traces et composés traces organiques pour l'épandage de boues résiduaires urbaines sur un sol cultivé en France (Girard *et al.*, 2005)

	Valeurs limites dans les boues (mg/kg MS)	Valeurs limites dans les sols (mg/kg MS)	Flux maximum cumulé apporté par les boues en 10 ans (g/m ²)
Cadmium	15	2	15
Chrome	1000	150	1500
Cuivre	1000	100	1500
Mercure	10	1	15
Nickel	200	50	300
Plomb	800	100	1500
Zinc	3000	300	4500
7 PCB*	0,8	-	1,2
FLT*	5	-	6
B(b)F*	2,5	-	4
B(a)P*	2	-	2

* 7PCB : somme de 7 polychlorobiphényles,

* FLT : fluoranthène,

* B(b)F : Benzo(b)fluoranthène,

* B(a)P : Benzo(a)pyrène.

Dans un rapport élaboré par l'office national d'assainissement (O.N.A., 2009), il a été indiqué, qu'actuellement 60 stations d'épuration (STEP) et lagunes sont opérationnelles à l'échelle nationale. Ces stations produisent des boues activées. Elles assurent l'épuration de 6 millions de m³ d'eaux usées mensuellement. La quantité des boues produites s'élève à environ 2000 tonnes/mois.

Dans notre pays, la production de boues pose un problème environnemental. Elle a fait l'objet des textes réglementaires suivants (O.N.A., 2009) :

- Loi n°2001-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Décret exécutif n°2006-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets.

Actuellement, en l'absence d'un cadre réglementaire fixant les conditions d'épandage agricole des boues, les boues produites sont généralement mises en décharge. Toutefois, quelques stations (Hadjout, Boumerdes, Koléa, Ain Defla et Chlef) ont pris l'initiative de valoriser leurs boues sur des cultures céréalières, arboricoles et ornementales dans les exploitations agricoles limitrophes.

La contrainte majeure de la valorisation agricole des boues résiduelles en Algérie reste donc liée à l'aspect réglementaire juridique qui doit définir :

- Les modalités de mise en œuvre de l'opération d'épandage.
- Les normes de valorisation.
- Les responsabilités et les prérogatives des différents acteurs concernés par l'opération.

2.1. Valeurs agronomiques des boues résiduelles

Le recyclage des boues en agriculture est justifié par leur valeur agronomique. Elles sont sources d'éléments fertilisants nécessaires aux plantes (N, P, K, oligo-éléments). Elles peuvent aussi avoir un effet positif sur la fertilité des sols en améliorant leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Selon leur qualité, les boues résiduaires peuvent avoir plusieurs valeurs agronomiques.

2.1.1. La valeur fertilisante

En fonction de leur composition chimique, les épandages de boues apportent aux sols des quantités d'éléments fertilisants équivalentes à une fertilisation minérale classique. Elles sont alors utilisées comme engrais (Girard *et al.*, 2005). Le tableau II donne des exemples d'apports en matière organique (MO), azote (N), phosphore (P) et potassium (K) correspondant à des épandages de 3 t/ha de MS. Les flux d'éléments fertilisants apportés par les boues résiduaires sont alors comparés à ceux apportés par une fertilisation minérale classique et d'autres substrats organiques.

Tableau II. Exemples de composition moyenne en matière organique et éléments fertilisants de 3 t MS/ha de déchets épandus en agriculture (ADEM, 2001; in Girard *et al.*, 2005)

	MS %	Teneurs (g/kg MS)				Eléments apportés (kg/ha)			
		MO	N	P	K	MO	N	P	K
Boues urbaines pâteuses	20	500	150	15	3	1500	150	46	10
Boues de papeterie	32	640	13	3	2	1920	39	9	5
Fumier de bovins	22	814	26	4	36	2442	78	13	107
Fientes de volailles	80	750	50	22	29	2250	150	66	87
Compost déchets verts	50	470	15	3	11	1410	45	9	52
Fertilisation minérale						0	150	22	41

2.1.2. La valeur amendante

Un amendement constitue un apport d'une matière organique ou minérale aux sols dont le but principal est d'améliorer leurs propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques (Girard *et al.*, 2005).

Certaines boues compostées pourront être utilisées comme amendements organiques pour entretenir, voire augmenter le stock humique dans les sols. D'autres seront utilisées comme amendements calcaires pour augmenter le pH des sols.

Amendement organique: Plusieurs auteurs ont remarqué une augmentation du taux de carbone organique du sol suite à des apports de boues compostées. En effet, Le Bissonnais (2009) a indiqué que l'apport répété de compost de boue, dont la matière organique est faiblement biodégradable, a fait croître le stock humique du sol et a stabilisé ses agrégats. De même, Korboulewsky *et al.* (2001) ont enregistré un enrichissement significatif du sol en carbone organique, suite à l'apport de 90 t / ha de compost de boues de station d'épuration.

Pour un compost de boues mûr, on considère que 50% de la matière organique apportée contribuera à entretenir la matière organique stable du sol. De ce fait, un apport de 10 t/ha de boues compostées contenant 400 kg de matières organiques/tonne de produit brut, fournira l'équivalent de 2000 kg de matière organique (MO) stable dans le sol (ADEME, 2010).

Selon Dudkowski (2000), les boues déshydratées agissent comme des «engrais verts». Seul le compost (mélange de boues et de coproduits ligneux tels que la sciure) permet de remplir une fonction humique.

- **Amendement calcaire:** Le chaulage est un des moyens de stabilisation et d'hygiénisation des boues résiduaire issues de l'épuration des eaux usées. Il réduit aussi, temporairement, la mobilité des ETM dans les sols après épandage. Les boues chaulées qui contiennent de 20 à 30% de CaO (par rapport à la MS), sont utilisées comme amendements calcaires pour élever le pH des sols acides (Girard *et al.*, 2005; Culot, 2005).

2.2. Effets de l'apport des boues sur le sol

Les propriétés amendantes et/ou fertilisantes des boues résiduaire modifient les propriétés des sols qui lui sont liées et attribuent au sol sa fertilité physique, biologique et chimique (Girard *et al.*, 2005; Culot, 2005).

2.2.1. Conséquences sur la fertilité physique du sol

La fertilité physique d'un sol peut être définie comme étant sa capacité à assurer la bonne implantation d'une culture et sa bonne alimentation en eau. La structure du sol et sa stabilité, sa capacité de rétention en eau sont les deux composantes majeures de la fertilité physique. De la structure du sol dépend sa porosité et donc la bonne circulation des gaz et des solutés dans le sol ainsi que la bonne croissance des systèmes racinaires (Girard *et al.*, 2005).

- **la stabilité structurale du sol:** Plusieurs auteurs ont démontré que les apports répétés des boues compostées ont favorisé l'agrégation et la stabilité structurale des sols limoneux (Le Bissonnais, 2009; Capowiez, 2009; Bipfubusa *et al.*, 2004). Selon Girard *et al.* (2005), l'augmentation du pH du sol, après un apport de boues chaulées, contribue aussi à cette stabilisation de la structure. De ce fait et lorsque la structure est plus stable, le sol résiste mieux au ruissellement et à l'érosion hydrique (Capowiez, 2009).
- **la réserve en eau du sol:** En augmentant la teneur en matière organique des horizons de surface, les boues compostées modifient leurs propriétés de rétention en eau et les teneurs en eau augmentent à tous les potentiels. Quand la teneur en eau massique à la capacité au champ augmente plus que celle au point de flétrissement permanent, l'eau disponible pour les plantes augmente (Girard *et al.*, 2005). Selon Culot (2005), la matière organique des boues compostées donne au sol une meilleure rétention en eau en limitant les remontées capillaires. Ceci réduit les problèmes de sécheresse, tout en favorisant une meilleure percolation (rôle d'éponge)
- **la densité apparente et la porosité:** Seules les boues compostées, ayant une valeur d'amendement organique, agissent positivement sur les propriétés physiques du sol. En effet, ces dernières contiennent une matière organique plus stable qui améliore la densité apparente et par conséquent la porosité du sol. N'Dayegamiye (2009) indique que l'apport des boues mixtes a amélioré de façon significative la structure et la densité apparente du sol.

2.2.2. Conséquences sur la fertilité chimique du sol

L'impact de l'apport des boues sur la fertilité chimique des boues se traduit par l'augmentation de la capacité d'échange cationique du sol et la disponibilité des éléments

nutritifs pour les cultures. Cette disponibilité s'exprime en proportion de l'élément fertilisant total apporté par année culturale après l'apport des boues (Girard *et al.*, 2005). De ce fait, il faut tenir compte, dans le raisonnement de la fertilisation, de cette proportion disponible lors de la première année après l'apport (effet direct) mais également lors des années suivantes (arrière-effet) et des effets cumulés d'apport successifs.

- **la disponibilité de l'azote:** Des travaux ont montré qu'environ 30 % de l'azote des boues sont disponibles dans le sol au courant de l'année d'épandage (Girard *et al.*, 2005; Houot, 2009). La minéralisation et la disponibilité de cet élément aux plantes sont reliées au rapport C/N et à la forme d'azote. Les matières organiques ayant les rapports C/N inférieurs à 25, tels que les boues mixtes, et les engrais verts se minéralisent rapidement et peuvent libérer des quantités importantes d'azote aux cultures (Abdallahi et N'Dayegamiye, 2000; Simard, 2001). Selon Houot (2009), la disponibilité variable de l'azote des boues peut entraîner des risques de lixiviation des nitrates si les boues sont apportées en fin d'été et en absence d'implantation d'une culture piège à nitrates.
- **la disponibilité du phosphore:** La disponibilité dans le sol du phosphore des boues est importante (60 à 100 % du phosphore total des boues). Elle est équivalente à un engrais minéral (Girard *et al.*, 2005; Houot, 2009). Morel (2009) a montré que l'apport de 55 kg de P₂O₅ total avec des boues liquides a le même effet pour la culture que 55 kg de P₂O₅ sous forme d'engrais minéral. Cet apport compense les exportations de phosphore par les grains d'un blé à 85 quintaux. Mieux encore, un épandage de boues séchées, tous les 3 ans, suffit à compenser les pertes de phosphore occasionnées par la récolte de 100 quintaux de maïs grains par an (60 kg /ha). La valorisation du phosphore des boues est une solution pour économiser la ressource mondiale non renouvelable en phosphates (Morel, 2009).

2.2.3. Conséquences sur la fertilité biologique du sol

La fertilisation organique stimule l'activité biologique du sol. Les organismes du sol ont des fonctions centrales dans la nutrition des plantes, à la fois par leur implication dans les processus de décomposition et le recyclage des nutriments pour la fourniture d'éléments nutritifs et pour le transfert de ces éléments à la plante, notamment par les mycéliums des champignons mycorhiziens (Lemercier, 2002).

- **La structure des communautés microbiennes:** Les communautés microbiennes des sols agricoles jouent un rôle clé dans le cycle de la matière organique et des éléments minéraux. La fertilité des sols en est ainsi largement dépendante. Les micro-organismes agissent aussi bien sur la mobilité des métaux que sur l'adsorption et la dégradation de molécules organiques (Houot, 2009). Cet auteur a également montré que la structure des communautés bactériennes et fongiques évolue avec le temps en fonction des conditions climatiques variables, et selon la présence ou non des plantes.
- **La macrofaune lombricienne:** Les résultats de N'Dayegamiye *et al.* (2004) ont montré que les sols ayant reçu des boues mixtes ont donné les populations les plus nombreuses de vers de terre, suivis par les traitements ayant reçu des applications de fumier. Les quantités de vers de terre étaient directement proportionnelles aux doses de boues mixtes apportées. Selon Capowiez (2009), le nombre de vers de terre et leur masse ont augmenté deux mois après l'épandage de compost de boues. Cet effet positif s'estompe par la suite, du fait de la stabilité du compost. Selon le

même auteur, la grande abondance de lombrics dans les sols amendés en composts de boues se traduit par un réseau de galeries plus dense et plus profond.

2.3. Effets positifs de l'apport des boues résiduelles sur les cultures

2.3.1. Effet sur la culture du maïs fourrager

Etant donné que cette culture a fait l'objet de cette étude, il est primordial de présenter un aperçu sur ses caractéristiques botaniques et agronomiques.

Caractéristiques botaniques et agronomiques: Le maïs appartient à la famille des graminées, son nom latin est *Zea mays*. Le maïs est originaire d'Amérique centrale et introduit en Europe au XVI^e siècle. Cette plante, originaire des régions chaudes a, peu à peu, vu son aire de culture s'étendre vers le nord par l'amélioration et la sélection de variétés résistantes au froid. La culture du maïs est en nette extension, de par l'augmentation des surfaces cultivées, mais aussi du fait de l'augmentation des rendements qui ont quadruplé en 25 ans. La France et l'Italie sont les principaux producteurs européens (Mémento de l'agronome, 1993).

Le maïs est une céréale annuelle de grande taille (1 à 2 m). La plante possède une tige unique de gros diamètre qui porte les feuilles à l'aisselle desquelles se situent les fleurs femelles qui donneront, après fécondation les épis. Les fleurs mâles sont groupées dans une panicule terminale. Ce sont surtout les hybrides qui se cultivent à cause de leurs rendements supérieurs, leur grande homogénéité morphologique, et une meilleure résistance à la verse (Mémento de l'agronome, 1993).

La germination du maïs nécessite une température minimale de 10°C. Au cours de sa végétation, le maïs a besoin d'une température optimale de 19°C. Le maïs est une plante exigeante en eau (100 mm en moyenne mensuelle durant tout le cycle végétatif). Mais la période la plus critique pour l'eau s'étend sur les 15 jours qui précèdent et les 15 jours qui suivent l'apparition des inflorescences mâles. Pour le maïs ensilage, l'irrigation doit être arrêtée au stade laiteux (INRA Maroc, 1997).

Le maïs est une plante exigeante en sols qui doivent être profonds, meubles, frais, assez légers, neutres à légèrement alcalins, fertiles, humifères et riches en éléments minéraux et en matière organique.

L'installation de la culture nécessite un labour de 25 à 30 cm et un recroisement pour aérer le sol (INRA Maroc, 1997). La densité de peuplement recommandée pour le maïs ensilage varie de 6 à 10 plantes par m², cela correspond à une densité de semis d'environ 20 à 30 kg/ha, (INRA Maroc, 1997). Le semis doit se faire à la fin de l'hiver ou au début du printemps. Il est limité par la température du sol, qui doit être supérieure à 6 °C.

Pour un rendement moyennement élevé de 15 t MS/ha, les besoins du maïs fourrager en éléments minéraux majeurs sont de 210 kg N/ha, de 105 kg/ha de P₂O₅, et de 225 kg/ha de K₂O. La fumure phospho-potassique est à appliquer avant le labour (INRA Maroc, 1997).

Le maïs fourrager est la principale céréale utilisée pour l'alimentation du bétail à l'échelle internationale. La plante entière peut être consommée comme fourrage frais ou en sec ou comme ensilage. Cette culture est en progression à cause de ses qualités (INRA Maroc, 1997), car elle présente un potentiel de rendement en grains ou comme ensilage très élevé, une très grande souplesse d'adaptation, un cycle de végétation court (90 à 120 jours) qui

permet deux cultures dans l'année, une excellente valorisation de l'eau, la possibilité de valoriser des terres de qualité médiocre à condition d'apporter de l'eau et des éléments nutritifs, c'est un fourrage très riche en énergie.

- **La réponse de la culture à l'apport des boues résiduelles:** Le maïs fourrager, utilisé en tête d'assolement, valorise bien l'azote disponible des boues, notamment en épandage de printemps (O.T.V, 1997; ADEME, 2010). Plusieurs travaux ont confirmé l'effet positif des boues résiduelles sur les rendements du maïs (Giller *et al.*, 1997; Palm *et al.*, 1997).

Juste et Solda (1977) ont noté une augmentation significative du rendement de maïs sur des parcelles ayant reçu 10 t MS de boues. Ces actions positives sur la croissance et les rendements sont dues aux augmentations des activités biologiques et enzymatiques du sol (Gagnon *et al.*, 2000) et par conséquent, à la minéralisation et la disponibilité de l'azote et du phosphore (Bhattacharyya *et al.*, 2003; Ait Mbark, 2010).

2.3.2. Effets sur d'autres espèces végétales

Les boues résiduelles ont été valorisées sur plusieurs cultures.

- **Les prairies:** Les graminées fourragères présentent un intérêt particulier en tant que consommatrices d'azote et d'eau. Les prairies peuvent en effet valoriser l'azote disponible, dans les boues, tout au long de leur saison végétative et surtout aux périodes de forts besoins au printemps (O.T.V, 1997).
- **La pomme de terre, la betterave et les céréales:** Les cultures maraîchères et les céréales peuvent aussi recevoir les boues. L'épandage est d'autant plus profitable qu'il est réalisé à des périodes où les plantes ont des besoins élevés en éléments nutritifs. Dans le cadre d'une rotation triennale de type betterave-blé-orge, il a été observé des différences de rendements en tonnes de racine par hectare pour la betterave en faveur des parcelles amendées en boues (Guckert et Morel, 1979 cité par Bennabi et Hamici, 1992). Un effet très net aux niveaux de la croissance et des rendements pour le blé a été également noté. Cependant pour l'orge, l'effet résiduel des boues a été estompé et a conduit à une grande variabilité des résultats.
- **La sylviculture:** L'épandage des boues a généralement lieu avant la plantation. Toutefois, l'expérience acquise montre qu'il est préférable d'éviter de planter juste après l'épandage. Selon O.T.V (1997), des programmes pilotes ont donné des résultats spectaculaires sur la culture d'aulne, du bouleau, du robinier, ainsi que sur les essences résineuses (épicéas, mélèzes). Le Tacon *et al.* (1988) ont également mis en relief l'augmentation de la croissance du frêne planté en intercalaire avec l'aulne blanc, suite à l'épandage des boues.

2.4. Effets négatifs de l'apport des boues résiduelles sur les cultures

Ces effets s'observent, généralement, lorsque des doses trop élevées de boues sont appliquées à une date trop tardive. Dans ce cas, des phénomènes de verse apparaissent, notamment sous climat chaud et humide (Pommel, 1979; O.T.V, 1997).

Pommel (1979) remarque que les boues ayant subi un traitement inadéquat peuvent conduire à une inhibition de la germination et à des troubles de croissance des plantes.

Par ailleurs, les boues dont les teneurs en éléments traces métalliques dépassent le seuil critique peuvent contaminer le sol et passer dans le végétal une fois que les conditions de leur mise en solution sont réunies (Baize *et al.*, 2006).

Conclusion

Cette étude bibliographique révèle que les boues résiduelles contiennent des quantités non négligeables en certains éléments minéraux très utiles pour l'amélioration de la fertilité des sols cultivés. Il s'agit surtout de la matière organique, de l'azote total, du phosphore total et certains cations. Ces caractéristiques peuvent donner aux boues résiduelles une valeur agronomique très intéressante permettant ainsi de les recycler et les valoriser en agriculture. Cependant, pour garantir la durabilité et la bonne gestion de cette valorisation, il est nécessaire d'acquérir des connaissances scientifiques indispensables à l'évaluation des risques écotoxicologiques et sanitaires associés à la présence de contaminants potentiellement bioactifs dans ces boues tels que les métaux lourds, les polluants organiques, les agents pathogènes, etc.....

Toutes ces données nous incitent à réaliser, sous nos conditions pédoclimatiques, cette étude qui entre dans le cadre d'un projet de recherche élaboré par l'institut national de la recherche agronomique d'Algérie (INRAA). Les objectifs de ce projet de recherche visent à caractériser les boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines, et à étudier leur impact sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols récepteurs, ainsi que sur le comportement des cultures testées. Ce projet est mené sur des essais de longues durées pour pouvoir mesurer les effets des épandages à long terme, afin de déterminer les doses, les fréquences et les époques d'apport selon les conditions du milieu.

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. La localisation du site d'expérimentation

L'expérimentation est réalisée en plein champ à la station de Mehdi Boualem de l'institut national de la recherche agronomique (figure 1). La station est située dans la plaine de la Mitidja à une altitude de 22m, les coordonnées géographiques de ses quatre points ainsi que celles de la parcelle d'étude sont :

- A : 36,686° Nord 3,106° Est
- B : 36,683° Nord 3,110° Est
- C : 36,682° Nord 3,103° Est
- D : 36,684° Nord 3,102° Est
- Profil d'étude : 36,684° Nord 3,107 Est

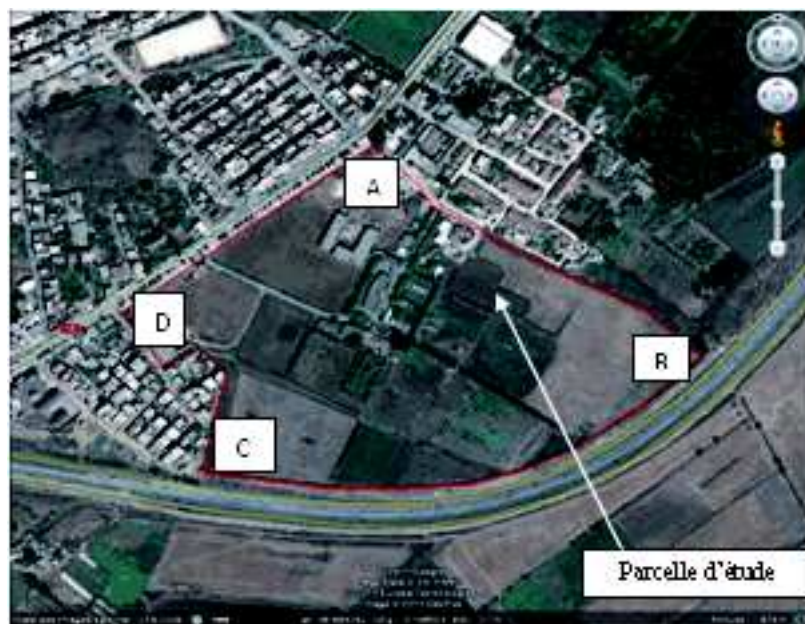


Figure 1. Situation de la parcelle d'étude sur le plan parcellaire de la station Mehdi Boualem (Vue aérienne)

Source : Google Earth (2011)

1.2. Les données climatiques

Les données climatiques de la zone d'étude, durant les deux années pendant lesquelles cette recherche a été réalisée (2002, 2003) sont présentées dans le tableau III. Ces données mettent en évidence une variabilité climatique interannuelle marquée. En effet, les mois de

janvier et février sont relativement plus secs en 2002, alors que le mois de novembre est nettement plus humide en 2002.

Nos essais ont été réalisés durant la période estivale, la culture a donc été conduite en irrigué à raison de 1000 l/parcelle/semaine.

Tableau III. Précipitations mensuelles et températures moyennes mensuelles des années 2002 et 2003

Mois	Année 2002 T°C Précipitations (mm)	Année 2003 T°C Précipitations (mm)
Janvier	12,2 22,114,8 36,215,8	11,4 192,511,2 132,114,4 23,516,4
Février	10,710,2 18,429,6 32,617,25,2	87,819,1 16,325,5 0,028 5,128,7
Mars	21,223,4 18,720,1 47,616,5	6,224,5 36,321,2 41,917 57,5132,5
Avril	121,514,4 135,2	

2. Matériel d'étude

2.1. Le sol

Avant la mise en place de l'essai, une description du profil pédologique a été réalisée le 31 mars 2002.

- Milieu environnant
 - Géomorphologie : terrasse alluviale
 - Relief : Plat
 - Drainage : Faible drainage externe et interne.
 - Précédent cultural : Jachère.
 - Type de sol : Sol peu évolué
- Description du profil

Le profil est réalisé sur une profondeur d'un mètre (100cm). Il comprend trois horizons (H1, H2 et H3)



Photos 1 et 2. Profil pédologique du site d'étude

- **Horizon 1 (0-25 cm)** : texture argilo-limoneuse, humide, couleur 10 YR 3/3, pas d'effervescence à l'acide chlorhydrique 10%, la matière organique n'est pas directement décelable, poreux, forte activité biologique, sa transition avec l'horizon sous jacent est nette et régulière.
- **Horizon 2 (25-55 cm)** : texture argilo-limoneuse, humide, couleur 2,5 Y 3/3, pas d'effervescence à l'acide chlorhydrique 10%, la matière organique n'est pas directement décelable, peu poreux, faible activité biologique, sa transition avec l'horizon sous jacent est nette et régulière.
- **Horizon 3 (55-100 cm)** : texture argileuse, sec, couleur 10 YR 4/4, pas d'effervescence à l'acide chlorhydrique 10%, non organique, pas d'activité biologique, non poreux.

Les échantillons prélevés ont été caractérisés par des analyses portant sur les principaux paramètres chimiques, physiques et biochimiques. Les résultats des analyses de trois échantillons de chaque horizon du profil sont présentés dans le tableau IV.

Tableau IV. Caractéristiques analytiques du sol

Paramètres	Horizon 1(0-25 cm)	Horizon 2(25-55) cm	Horizon 3(> 55 cm)
pH	7,87	7,77	7,8
CE (dS/m) (1/10)	0,17	0,17	0,17
Azote Total (%)	0,12	0,095	0,08
Phosphore assimilable (P ₂ O ₅) (mg/kg)	68,67	68,67	27,92
Potassium assimilable (cmol/kg)	0,77	0,46	0,46
Matière organique (%)	2,02	1,49	0,69
Calcaire total (%)	0,73	0,48	0,8
CEC (cmol/kg)	17,93	17,2	15
Granulométrie Argile (%)	45,35	44,81	7,77
Limon (%)	35,44	54,72	77,77
Sable (%)	19,21	1,47	15,46

Ces résultats révèlent que les horizons du sol étudié présentent les caractéristiques suivantes:

- Une texture argilo-limoneuse;
- Un pH alcalin (>7,5);
- Une faible conductivité électrique (<0,25 dS/m), ce sol est non salé selon la classification de l'USSL (1954);
- Une faible teneur en matière organique dans l'horizon H1 et de très faibles teneurs dans les horizons H2 et H3 par rapport à la teneur du sol en argile (A>40 %);
- Des teneurs élevées en phosphore et en potassium assimilables selon les normes AFNOR, (1994);
- Une faible teneur en azote total en surface et très faible en profondeur selon les normes AFNOR (1994);
- De très faibles teneurs en calcaire total ;
- Une capacité d'échange cationique moyenne par rapport à la teneur du sol en argile (A>40 %).

2. 2. Les boues résiduaires

Elles sont issues de la station d'épuration (STEP) de Réghaïa qui est située dans la banlieue Est d'Alger à proximité du lac de Réghaïa. L'eau usée brute est de nature urbaine, elle est collectée à partir d'un réseau unitaire (tableau V).

Tableau V. Origine et débit des eaux usées brutes

Nature du réseau	Unitaire
Nature des eaux brutes	Urbaine (domestique)
Population (eq.hab)	400 000
Débit moyen journalier (M ³ /j)	80 000
Débit (l/hab. /j)	200
MES (%)	60

Le processus de traitement des eaux usées et des boues au niveau de la station d'épuration de notre étude comporte les étapes suivantes (figures 2 et 3):

- Criblage grossier à l'aide d'un dégrilleur à barreaux mécaniques;
- Dessablage et déshuilage à l'aide de canaux à sable aérés;
- Traitement biologique accompli dans des bassins à aération mécanique;
- Décantation secondaire raclée dans les clarificateurs circulaires;
- Boues activées de retour sont refoulées par des pompes à vis et criblées à travers des cribles à barreaux moyens;
- Epaissement des boues ainsi obtenues;
- Déshydratation mécanique des boues par filtre à bande.

A la fin de la chaîne de traitement, les boues sont récupérées dans des bennes pour leur évacuation à la décharge publique.



Figure 2. Les étapes de traitement des eaux usées



Figure 3. Les étapes de production de boues

La teneur en matière sèche et les analyses chimiques sont réalisées sur six échantillons de boues (tableau VI).

Paramètres étudiés	Teneurs
MS (%)	40,05
pH	7,8
CE (dS/m) (1/10)	3,21
Azote total (%)	1,63
Phosphore total (%)	1,98
Carbone (%)	10,84
C/N	6,65
MO (%)	21,68
Potassium total (cmol/kg)	2,29
Na (cmol/kg)	7,97
Ca (cmol/kg)	25
Mg (cmol/kg)	1,5
Fe (cmol/kg)	5
Mn (cmol/kg)	8
Cu (cmol/kg)	Traces
Zn (cmol/kg)	15

Tableau VI. Les caractéristiques des boues

Les boues d'épuration de cette station se caractérisent, selon les normes (OTV, 1997) par :

- Un pH légèrement alcalin (7,8) ;
- Une conductivité électrique (3,21 dS/m) deux fois plus élevée que celle du fumier de ferme (substrat organique de référence = 1,27 dS/m) ;

- Des teneurs moyennes en azote total et en phosphore total ;
- Des teneurs très faibles en potassium, en micro-éléments (Na, Ca et Mg) et en oligo-éléments (Fe, Mn, Cu et Zn);
- Une forte teneur en matière organique, avec un rapport C/N = 6,65 (indicateur d'une minéralisation rapide de la matière organique dès la première année d'épandage).

2.3. Le végétal

La culture utilisée dans les essais est le maïs fourrager. Selon O.T.V (1997), le maïs constitue une culture de choix pour la valorisation des boues résiduaires à cause de ses importants besoins en azote. Il se prête donc bien à l'utilisation des boues car sa période végétative s'étale tout l'été, et il peut profiter au maximum de la minéralisation continue de l'azote organique. En plus, c'est une culture, dont le fruit est un bon accumulateur d'éléments minéraux absorbés.

La variété utilisée est « Mais Hybride ». Les caractéristiques de cette variété sont:

- Plante : Assez haute : 1,60m à 1,80m de hauteur ayant une bonne résistance à la verse et contenant assez de matière sèche.
- Epis : Assez long : 20-24 cm présentant des grains en couronne très réguliers.
- Grains : Ronds, bien gonflés et ayant une très bonne présentation
- Cette variété présente l'avantage de pouvoir être utilisée pour l'ensilage ou pour la consommation en sec.
- Cette variété est demi tardive, indice FAO 400 (indice préconisé pour le Maghreb).
- Très résistante à la verse et aux attaques de charbon.

Le test germinatif et le poids de milles graines que nous avons déterminés sont les suivants :

- Faculté germinative de la variété: 98 %
- Poids de milles graines : 236 g

3. Méthodes utilisées dans l'étude

3.1. Echantillonnage et analyses du sol

L'échantillonnage du sol pour le suivi de l'évolution des paramètres étudiés a été réalisé dans le sens de la diagonale avec trois prélèvements pour chaque traitement (pour chaque parcelle élémentaire). Les prélèvements ont été faits sur deux profondeurs (0-25cm et 25-40cm) pour les paramètres chimiques et une profondeur (0-25cm) pour les paramètres physiques.

Les analyses physiques et chimiques ont été pratiquées sur tous les échantillons prélevés. Les résultats obtenus par traitement représentent la moyenne des trois prélèvements. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- **Potassium assimilable** : Extraction du potassium soluble et échangeable avec une solution d'acétate d'ammonium 1 N à pH 7. Le potassium extrait est dosé par spectrophotométrie.

- **Carbone organique** : La méthode ANNE modifiée est utilisée. Le carbone organique d'une prise d'essai de terre est oxydé par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. L'oxydation se fait à chaud (chauffage à reflux), les échantillons sont maintenus pendant 5 mn à ébullition pour que l'oxydation soit complète. Le sulfate de chrome est dosé par colorimétrie à une longueur d'onde de 580 nm. La courbe d'étalonnage est donnée par l'oxydation de quantités croissantes de glucose oxydé dans les mêmes conditions que les échantillons de sol.
- **Azote total** : L'analyse est réalisée selon la méthode KJELDAHL avec une minéralisation avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré et le catalyseur, la distillation, et la titration au retour avec H_2SO_4 à faible concentration.
- **Calcaire total** : Il est dosé par la méthode volumétrique qui utilise le calcimètre de Bernard.
- **La conductivité électrique** : Les sels solubles sont déterminés par la mesure de la conductivité électrique d'un extrait dilué selon un rapport terre/eau de 1/10.
- **pH** : Le pH est mesuré par électrométrie avec un pH-mètre. La mesure est faite dans une suspension de sol dans l'eau distillée dégazée avec un rapport sol/eau=1/2,5.
- **Phosphore assimilable** : Il est déterminé par la méthode Olsen. L'extraction de l'acide phosphorique est faite avec une solution de $NaHCO_3$ 0,5 M dont le pH est de l'ordre de 8,5. Le phosphore extrait est dosé par colorimétrie.
- **Analyse granulométrique** : L'analyse granulométrique est réalisée selon la méthode internationale. Les différents constituants sont séparés par sédimentation après leur mise en suspension en utilisant la pipette de Robinson de 20 ml, le sable est séparé par tamisage.
- **La densité apparente** : La densité apparente est déterminée par la méthode au cylindre au niveau du premier horizon (0-25 cm). Au prélèvement des échantillons, le sol était ressuyé après saturation (à la capacité au champ).
- **Humidité du sol à différents niveaux de potentiel matriciel (pF)** : Ces déterminations ont été réalisées au moyen des enceintes de Richard à différents niveaux de pression. L'humidité correspondante à un niveau de potentiel est obtenue après une mise en équilibre et un séchage de l'échantillon à $105^\circ C$ pendant 24 heures.

3.2. Méthodes d'analyses de boues

- **Carbone organique total**: La méthode utilisée pour le dosage des boues est la même que celle utilisée pour l'analyse du sol (méthode ANNE modifiée).
- **Azote total** : L'azote total dans les boues est analysé par la méthode KJELDAHL (utilisée dans l'analyse du sol).
- **Éléments minéraux**: Les éléments minéraux contenus dans les boues sont extraits après minéralisation à reflux de la matière organique par l'eau régale (2/5 HNO_3 concentré pur + 3/5 HCl concentré pur). La solution obtenue à la fin de la minéralisation est prête pour le dosage de : Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, ainsi que Ca, Mg, Na et K après dilution. Le phosphore est aussi dosé dans cette solution après le rajout du réactif nitro-vanado-molybdique.
- **Phosphore total** : Après minéralisation, le phosphore est sous forme d'orthophosphate. Son dosage s'effectue par colorimétrie (à 470 nm) après l'addition du réactif nitro-vanado-molybdique. La coloration jaune qui apparaît est proportionnelle à la concentration de la solution en phosphate.

· **pH et Conductivité électrique** : Sur une boue solide le pH et la CE sont mesurés après avoir soumis l'échantillon de boue au test de lixiviation qui consiste en un mélange par agitation de boue et eau distillée (rapport boue /eau= 1/10), une centrifugation, une filtration ou une décantation de la solution, et ensuite les mesures de la CE et du pH sur le surnageant, respectivement au conductivimètre et au pH-mètre.

3.3. Méthodes d'analyses des végétaux

L'azote total dans les graines du maïs est analysé par la méthode KJELDAHL.

3.4. Méthode de mensuration de la hauteur des plants du maïs fourrager

La mesure de la hauteur des plants a été faite sur trois plants de chaque billon (3x7), soit 21 plants par parcelle élémentaire. Les billons des extrémités ont été éliminés pour éviter l'effet bordure. La moyenne des mesures représente la hauteur des plants au niveau du traitement. Les observations périodiques sur le développement de la plante sont résumées dans le tableau VII.

Tableau VII. Dates d'observations des différents stades végétatifs de la plante

Années expérimentales	Stades repérés	Date
Première année	Semis Levée Stade 6 feuilles Stade 10 feuilles Stade floraison Stade laiteux Stade pâteux Récolte	23 juin 2002 29 juin 2002 29 juin 2002 21 juillet 2002 20 août 2002 19 août 2002 14 août 2002 28 septembre 2002 29 septembre 2002 septembre 2002
Deuxième année	Semis Levée Stade 6 feuilles Stade 10 feuilles Stade floraison Stade laiteux Stade pâteux Récolte	16 juin 2003 23 juin 2003 15 juin 2003 15 juillet 2003 27 juillet 2003 10 août 2003 30 août 2003 06 août 2003 16 septembre 2003 17 septembre 2003 septembre 2003

3.5. Méthode des traitements statistiques

Pour toutes les données, les traitements statistiques sont effectués comme suit :

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée par le logiciel Genstat discovery, édition 3, les PPDS au risque de 5 % sont utilisées pour la comparaison des moyennes deux à deux et la matrice de corrélation entre les variables étudiées a été déterminée par le logiciel STATISTICA.

3.6. Dispositif expérimental

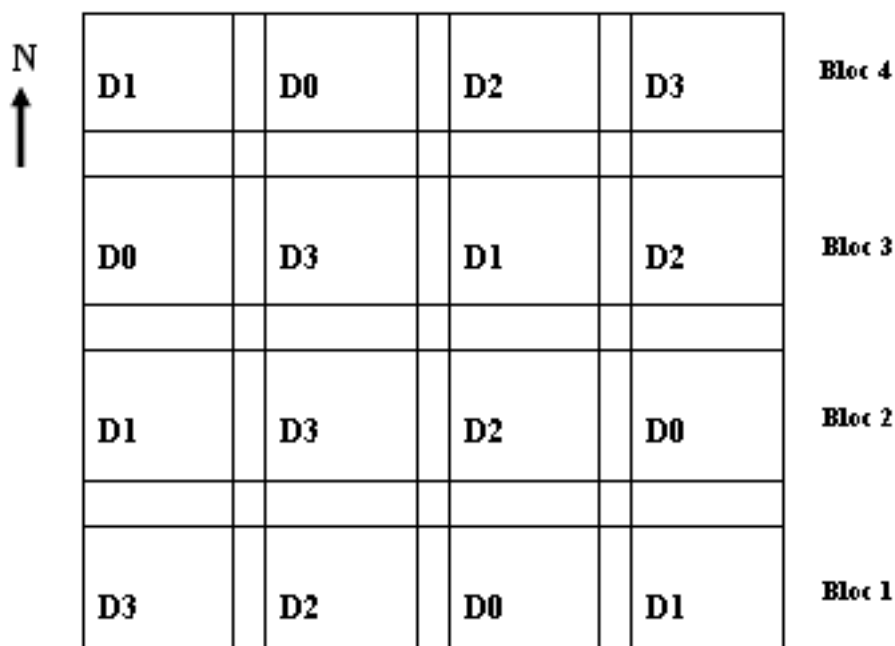
L'étude expérimentale est réalisée en plein champ selon un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets (figure 4). La superficie concernée par l'étude est de 1000 m², avec des parcelles élémentaires de 49 m² (7 m x 7 m) chacune. L'espacement entre les blocs est de 4 m et celui entre les parcelles élémentaires est de 2 m. L'essai a été conduit sur terrain pendant deux années avec un seul apport de boue réalisé durant la première année.

Les boues sont appliquées selon les doses suivantes :

- Dose 0 = témoin, sans apport de boues
- Dose 1 = 30 tonnes de boues/ha
- Dose 2 = 45 tonnes de boues/ha
- Dose 3 = 60 tonnes de boues/ha

Les boues utilisées présentent une teneur en eau de 60 %. La quantité de matière sèche apportée par traitement est la suivante : 0, 12, 18, 24 tonnes/ha respectivement pour le témoin, la dose 1, la dose 2, et la dose 3.

Le choix des doses a été fait après une analyse préliminaire d'échantillons de boues et de sol. Ce choix se justifie par rapport à la teneur du substrat en matière organique et en éléments traces métalliques, et par rapport à la teneur du sol en argile et en matière organique. Il se justifie aussi par rapport aux études de recherche réalisées dans d'autres conditions pédoclimatiques (Prone *et al.*, 1999; Zebarth *et al.*, 1999; Korboulewsky *et al.*, 2001).



D0 = témoin = 0 t MS /ha

D1 = dose 1 = 12 t MS /ha

D2 = dose 2 = 18 t MS /ha

D3 = dose 3 = 24 t MS /ha

Figure 4. Schéma du dispositif expérimental



Photo 3. Dispositif expérimental (stade 6 feuilles)



Photo 4. Dispositif expérimental (stade 10 feuilles)

3.7. Déroulement de l'essai

L'expérimentation sur le terrain a été conduite selon les modalités et le calendrier présentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII. Déroulement de l'essai durant les deux années expérimentales

Période de l'expérimentation	Opérations	Date de réalisation
Première année	- Réception des boues et échantillonnage pour analyse - Labour et préparation de la parcelle d'étude - Délimitation des parcelles élémentaires- Epanchage des boues- Enfouissement des boues avec le pulvériseur à disque-Semis du maïs à raison de 1867,64 g / 49 m ² , (2 grains/poquet, la distance entre les poquets = 25 cm)-Première irrigation-Démariage des plants (laissant un plant /poquet)-Les irrigations à raison de 1000 l/ parcelle élémentaire	-14 avril 2002- Fin avril 2002-11 et 12 mai 2002-29 mai 2002- 30 mai 2002-23 juin 2002-24 juin 2002-01 juillet 2002-une fois par semaine durant tout le cycle végétatif
Deuxième année	-Disquage et billonnage des parcelles élémentaires- Semis du maïs à raison de 1867,64 g / 49 m ² , (2 grains/poquet la, distance entre les poquets = 25 cm)- Première irrigation-Démariage des plants (laissant un plant /poquet)-Les irrigations à raison de 1000 l/parcelle élémentaire	-11 juin 2003-16 juin 2003-17 juin 2003-25 juin 2003-une fois par semaine durant tout le cycle végétatif

3.8. Les paramètres étudiés

Pour étudier l'effet des boues sur les propriétés chimiques et physiques du sol, un suivi temporel (tous les trois mois pour les paramètres chimiques, et tous les six mois pour les paramètres physiques) est réalisé sur l'évolution de :

- la teneur du sol en carbone organique, en azote total, et en azote minéral,
- la densité apparente,
- la rétention en eau à différents pF.

Toutes ces mesures ont été pratiquées sur tous les traitements durant les deux années d'expérimentation.

Par ailleurs, durant les deux années expérimentales, le suivi de la croissance des plantes a été réalisé à différents stades végétatifs de la culture. La mensuration de la hauteur des plants du maïs a été effectuée sur 21 plants par parcelle élémentaire.

Les rendements de la culture en matière sèche total et en grains ont été aussi déterminés durant les deux années d'expérimentation. Ceux-ci ont été calculés sur une superficie de 1 m² (ce qui correspond à 10 plants / parcelle élémentaire). Les rendements sont calculés comme suit :

- Rdt en MST= MS aérienne +poids des épis (épis entiers)
- Rdt grains (q/ha) = $NE/m^2 \times NG/E \times PMG /10000$

Après chaque récolte, une analyse chimique (teneur en azote) des graines du maïs fourrager est pratiquée pour évaluer la nutrition de la plante en azote.

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Effets de l'apport des boues sur le sol

1.1. Les paramètres chimiques

Rappelons que les paramètres chimiques étudiés (teneur en azote minéral, teneur en azote total, teneur en carbone, rapport C/N) ont fait l'objet de déterminations au niveau de 2 horizons (P1 = 0-25 cm, c'est l'horizon de surface; P2= 25-55 cm, c'est l'horizon de subsurface), et à 5 périodes [T1=3 mois après épandage (aout 2002), T2= 6 mois après épandage (novembre2002), T3= 9 mois après épandage (mars 2003), T4 = 12 mois après épandage (juin 2003), T5= 15 mois après épandage (septembre 2003)].

1.1.1. L'azote minéral

Les résultats obtenus sur les teneurs du sol en azote minéral dans les deux profondeurs (P1 et P2), à différentes périodes après épandage des boues, sont présentés dans le tableau I en annexes.

Ces résultats montrent que, par rapport au témoin (D0), les teneurs du sol en azote minéral ont augmenté dans les deux profondeurs des traitements D1, D2 et D3 durant les périodes T1, T2 et T4 qui suivent l'épandage (figure 5). Néanmoins, ces augmentations sont plus importantes dans les traitements D3 et D2, surtout en surface. Les valeurs obtenues au niveau de l'horizon de surface (P1) pour les traitements D3 et D2 sont respectivement de 122.90 ppm et 115.50 ppm en T1, de 132.30 ppm et 137.60 ppm en T2, et de 109.20 ppm et 104.50 ppm en T4. Selon les normes AFNOR (1994) ces teneurs sont élevées.

Par ailleurs, durant les T3 et T5, les teneurs en azote minéral ont diminué dans les deux profondeurs des doses D1, D2 et D3. Toutefois, ces teneurs restent plus élevées que celles du témoin (D0) (figures 6 et 7).

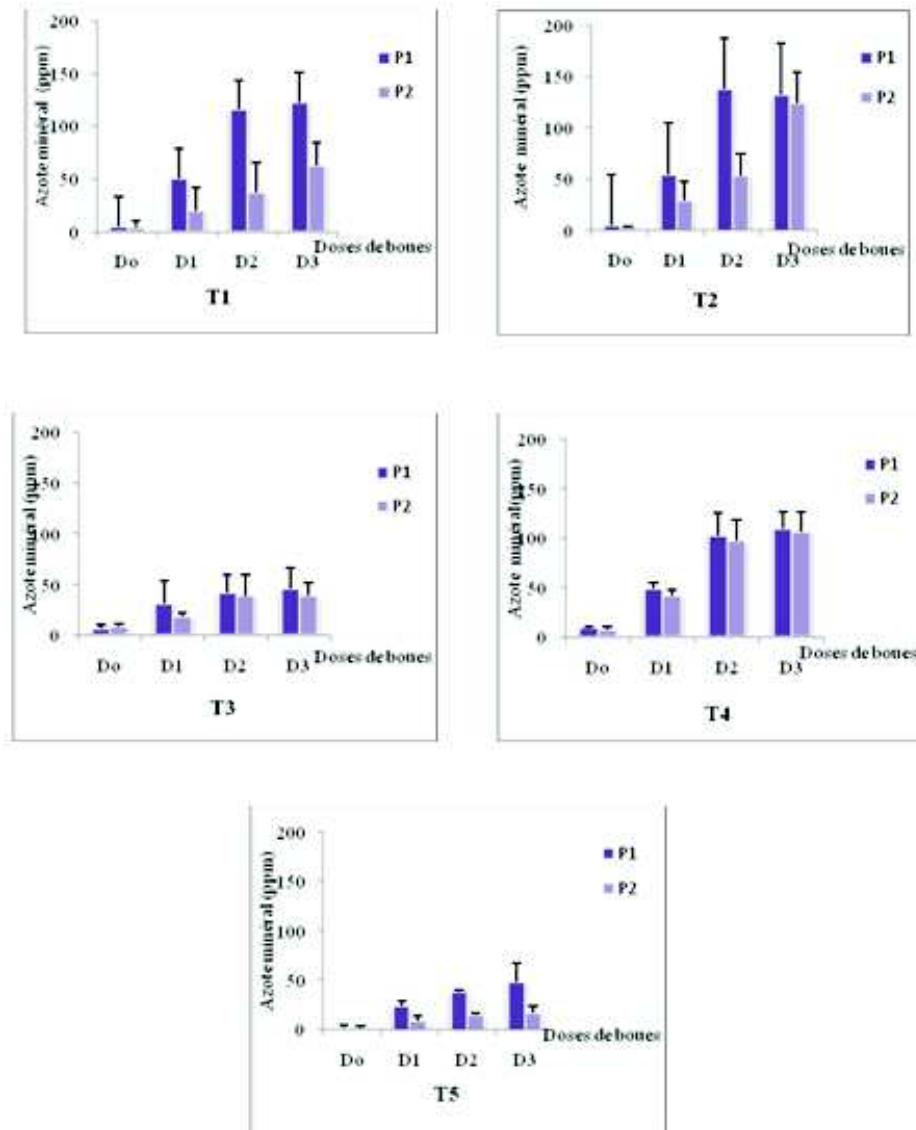


Figure 5. Variation temporelle des teneurs moyennes en azote minéral dans le sol en fonction des doses de boues et des horizons

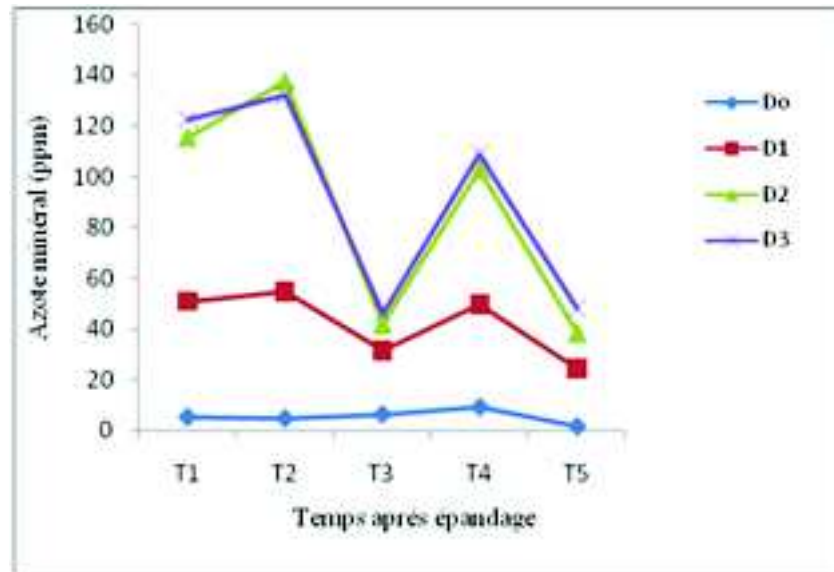


Figure 6. Evolution de la teneur d'azote minéral dans l'horizon de surface du sol en fonction du temps et des doses de boues apportées

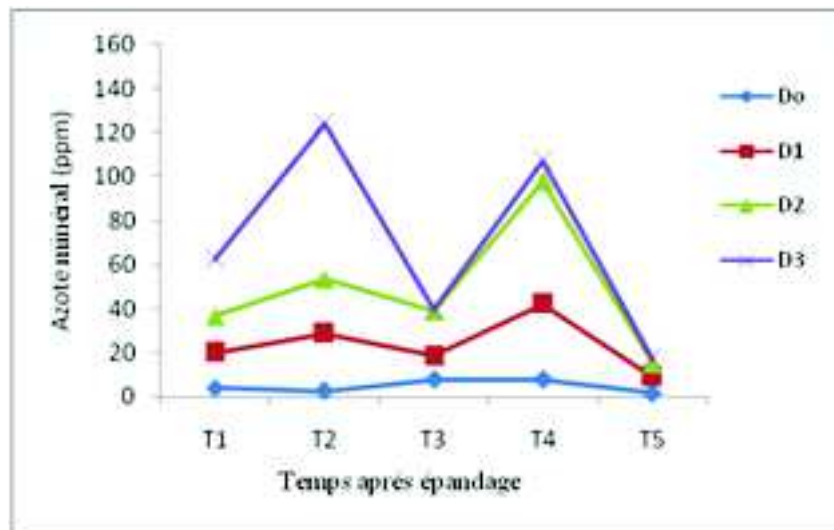


Figure 7. Evolution de la teneur d'azote minéral dans l'horizon de subsurface du sol en fonction du temps et des doses de boues apportées

L'analyse de la variance au seuil de signification de 5% (tableau IX) montre une différence très hautement significative ($p < 0.001$) de la teneur du sol en azote minéral entre les traitements (doses), entre les profondeurs et en fonction du temps. Les interactions des facteurs étudiés (doses x profondeurs, doses x temps, et Profondeurs x temps) sont très hautement significatives ($p < 0.001$). L'interaction doses x profondeurs x temps donne une différence significative ($p = 0.027$).

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	1445,40	481,80	1,26	
Doses	3	141351,60	47117,20	122,83	<,001
Profondeurs	1	15768,40	15768,40	41,11	<,001
Temps	4	59963,10	14990,80	39,08	<,001
Doses x Profondeurs	3	7385,60	2461,90	6,42	<,001
Doses x Temps	12	34482,50	2873,50	7,49	<,001
Profondeurs x Temps	4	8815,10	2203,80	5,75	<,001
Doses x Profondeurs x Temps	12	9348,70	779,10	2,03	0,027
Erreur	117	44879,10	383,60		
Total	159	323439,40			

Tableau IX. Analyse de la variance de la teneur du sol en azote minéral en fonction des doses de boues, des profondeurs, du temps, et de leurs interactions

Au seuil de signification de 5 %, les PPDS entre les teneurs d'azote minéral dans les traitements (8.67 ppm) dans les différents temps (9.70 ppm) et dans les deux profondeurs (6.13 ppm) ont permis d'identifier les groupes homogènes (tableau X).

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes Nm (ppm)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	80,90	D3
	B	67,80	D2
	C	32,90	D1
	D	5,13	D0
Les temps	A	67,30	T2
	A	65,60	T4
	B	52,19	T1
	C	28,80	T3
	C	19,50	T5
Les profondeurs	A	56,60	P1
	B	36,80	P2

Tableau X. Les groupes homogènes des teneurs du sol en azote minéral en fonction des facteurs étudiés

D'après ce classement, nous pouvons déduire que les doses de boues ont eu un effet différent sur la teneur du sol en azote minéral. Cet effet est proportionnel à la dose de boue apportée puisque les teneurs moyennes en azote minéral obtenues diminuent dans le sens suivant :

$$D3 > D2 > D1 > D0$$

Par ailleurs, la plus forte teneur en azote minérale est obtenue au temps T2 (soit 6 mois après l'épandage des boues) et la plus faible valeur est observée aux temps T3 (soit 9 mois après l'épandage des boues) et T5 (soit 15 mois après l'épandage des boues). Les teneurs en azote minéral ont évolué de façon significative dans le temps selon le classement suivant :

$$T2 = T4 > T1 > T3 = T5$$

La plus forte teneur en azote minéral est localisée au niveau de l'horizon de surface :

$$P1 > P2$$

1.1.2. L'azote total

Les résultats obtenus sur les teneurs du sol en azote total dans les deux profondeurs (P1 et P2) à différentes périodes après épandage des boues, sont présentés dans le tableau II en annexe.

Ces résultats montrent que par rapport au témoin (D0), les teneurs du sol en azote total augmentent à partir du temps T2 dans la profondeur P1 des traitements D2 (0.15 %) et D3 (0.17%) (figure 8).

En T3 et par rapport au témoin, les teneurs en azote total ont augmenté faiblement dans la profondeur P1 de D1 (0.14%) et moyennement dans la P1 des traitements D2 (0.19 %) et D3 (0.19 %).

En T4, il se produit une augmentation conséquente de la teneur en azote total dans les deux profondeurs (P1 et P2) des traitements D1, D2, D3. Cependant, les teneurs les plus élevées ont été constatées dans les traitements D2 (0.93% en P1 ; 0.54% en P2), et D3 (0.96% en P1 ; 0.75% en P2). Ces teneurs sont considérées comme très élevées selon les normes de Bruce et Rayment (1982) cité par Hazelton et Murphy (2007) (tableau XI).

Tableau XI. Les normes d'interprétation des teneurs du sol en azote total du sol (Bruce et Rayment, 1982 cité par Hazelton et Murphy, 2007)

Teneurs en azote total (N en %)	Description
< 0,05	Très faible
0,05 – 0,15	Faible
0,15 – 0,25	Moyenne
0,25 – 0,5	Elevée
> 0,5	Très élevée

En T5, les teneurs d'azote total ont diminué par rapport au T4.

Par ailleurs, l'évolution des teneurs en azote total dans le temps est comparable dans les deux profondeurs (P1 et P2) des traitements D1, D2, et D3. Par contre, au niveau de D0, les teneurs en azote total varient faiblement dans le temps dans les deux profondeurs (figures 9 et 10).

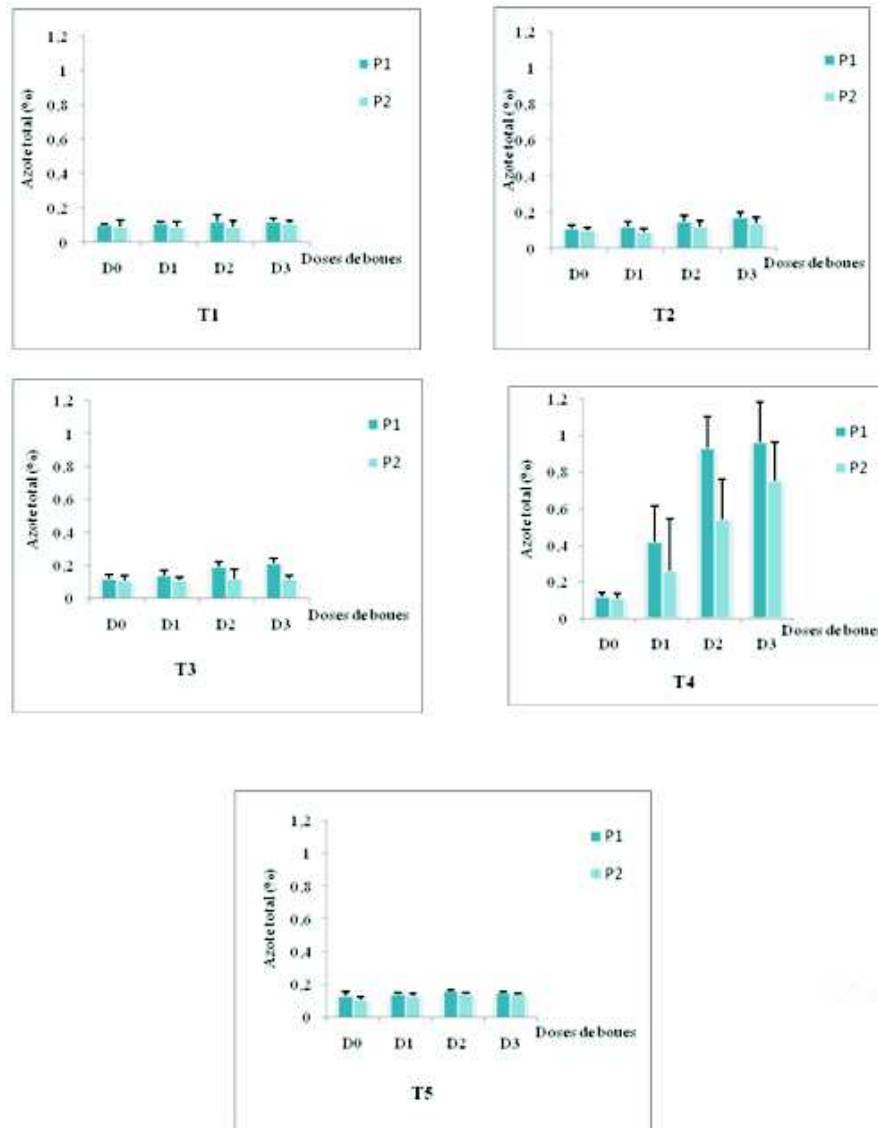


Figure 8. Variation temporelle des teneurs moyennes en azote total dans le sol en fonction des doses de boues et des horizons

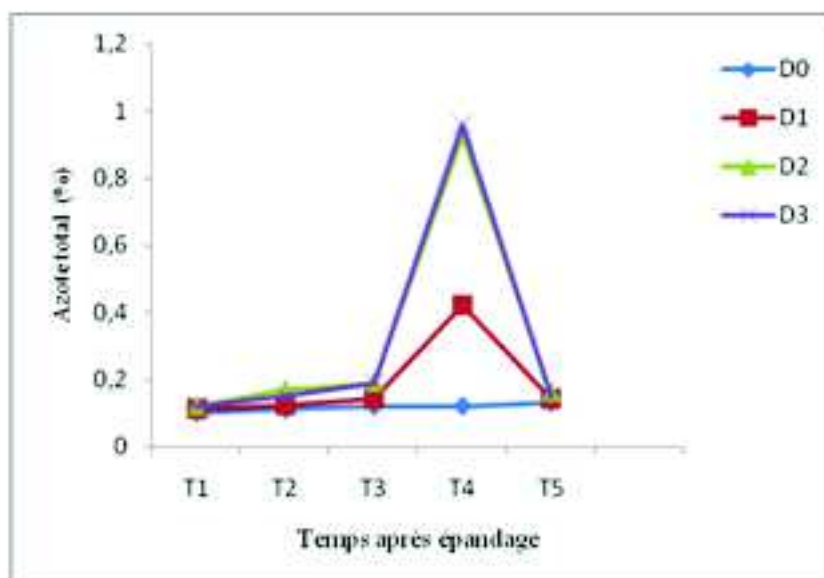


Figure 9. Evolution de la teneur en azote total dans l'horizon de surface du sol en fonction du temps et des doses de boues apportées

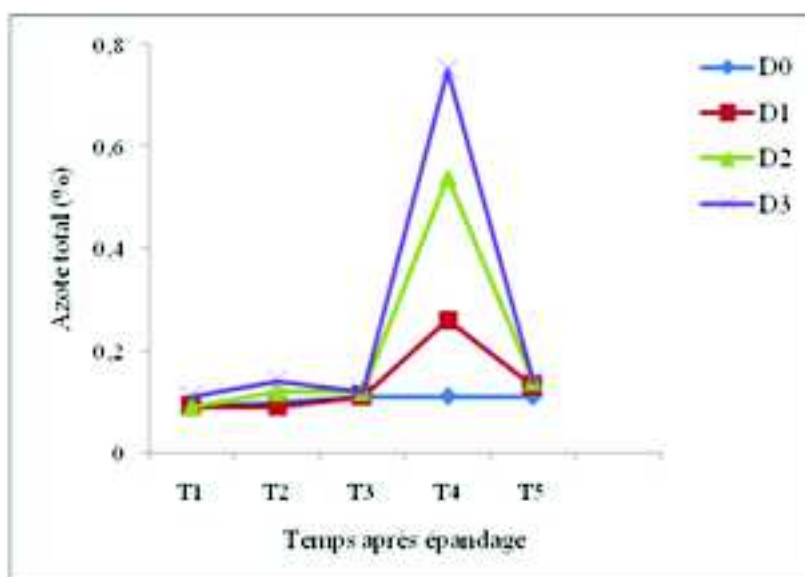


Figure 10. Evolution de la teneur en azote total dans l'horizon de subsurface du sol en fonction du temps et des doses de boues apportées

L'analyse de la variance au seuil de signification de 5% montre que les différences des teneurs du sol en azote total sont très hautement significatives entre les traitements (doses) ($p < 0.001$), entre les profondeurs ($p < 0.001$) et entre les temps après épandage ($p < 0.001$) (tableau XII).

Par ailleurs, dans tous les temps qui suivent l'épandage, la différence de la teneur du sol en azote total est très hautement significative entre tous les traitements (doses x temps) et entre les deux profondeurs (profondeurs x temps). Par contre, la différence de la teneur d'azote dans les profondeurs au niveau de tous les traitements est seulement significative ($p = 0.077$).

Enfin, l'interaction dose x profondeurs x temps a révélé une différence non significative

(p = 0.343).

Source de variations	DDL	SCE	CM	F. Observé	P
Blocs	3	0,0085	0,0028	0,38	
Doses	3	0,7721	0,2573	34,16	<,001
Profondeurs	1	0,1392	0,1392	18,48	<,001
Temps	4	3,8158	0,9539	126,59	<,001
Doses x Profondeurs	3	0,0529	0,0176	2,34	0,077
Doses x Temps	12	2,0767	0,1730	22,97	<,001
Profondeurs x Temps	4	0,1900	0,0475	6,31	<,001
Doses x Profondeurs x temps	12	0,1021	0,0085	1,13	0,343
Erreur	117	0,8816	0,0075		
Total	159	8,039398			

Tableau XII. Analyse de la variance de la teneur du sol en azote total en fonction des doses de boues, de la profondeur, du temps, et de leurs interactions

Au seuil de signification de 5 %, les PPDS entre les teneurs d'azote total dans les traitements (doses) (0,03844), dans les profondeurs (0,02718) et dans les différents temps (0,04298) ont permis de mettre en évidence les groupes homogènes présentés dans le tableau XIII.

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes Nt (%)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	0,28	D3
	A	0,26	D2
	B	0,16	D1
	C	0,11	D0
Les temps	A	0,51	T4
	B	0,14	T3
	B	0,14	T5
	B	0,13	T2
Les profondeurs	A	0,23	P1
	B	0,17	P2

Tableau XIII. Les groupes homogènes des teneurs du sol en azote total en fonction des facteurs étudiés

Ce classement montre que les traitements D3 et D2 ont eu le même effet sur la teneur du sol en azote total, les teneurs moyennes obtenues permettent de classer les doses ainsi :

$$D3 = D2 > D1 > D0$$

La plus importante teneur en azote total est obtenue pour T4, elle est restée stable pour T1, T2, T3, et T5 :

$$T4 > T3 = T5 = T2 = T1$$

Le cas de la période T4 pose un problème dans la mesure où la teneur en azote total du sol ne peut pas augmenter sans un apport externe.

La plus forte teneur en azote total est localisée au niveau de l'horizon de surface :

$$P1 > P2$$

1.1.3. Le carbone organique

Les résultats obtenus sur les teneurs du sol en carbone dans les deux profondeurs (P1 et P2), à différentes périodes après épandage des boues, sont présentés dans le tableau III en annexe.

Ces résultats montrent que pour toutes les doses étudiées (D0, D1, D2, et D3), les teneurs en carbone organique des deux profondeurs (P1 et P2) du sol sont relativement semblables en T1 (figure 11). La différence se manifeste en T2 avec une augmentation du taux de carbone (+ 1.02 %) au niveau de P1 du traitement D3.

En T3, une augmentation des teneurs en carbone est observée dans les deux horizons du sol pour les doses D1, D2 et D3. Toutefois cette augmentation est plus remarquable au niveau de l'horizon de surface.

En T4, le niveau du carbone diminue dans l'horizon de surface des doses D2 et D3.

En T5, la teneur en carbone augmente dans les deux horizons des doses D1, D2 et D3.

Toutefois, toutes ces teneurs sont considérées comme modérées selon les normes de Charman et Roper (2000), cité par Hazelton et Murphy (2007) (tableau XIV).

Tableau XIV. Les normes d'interprétation des teneurs en carbone du sol (Charman et Roper, 2000 cité par Hazelton et Murphy, 2007)

Niveau du carbone organique (%) (g/100g de sol sec)	Description
<0,400,40-0,600,60-1,001,00-1,801,80-3,00	Extremement faible Très faible Faible Modérée Elevée Très élevée

Les figures 12 et 13 montrent que l'évolution de la teneur en carbone organique dans le temps était comparable dans les deux horizons. Néanmoins, au niveau de l'horizon de surface, les doses D2 et D3 ont produit une augmentation relativement plus importante de la teneur du sol en carbone organique.

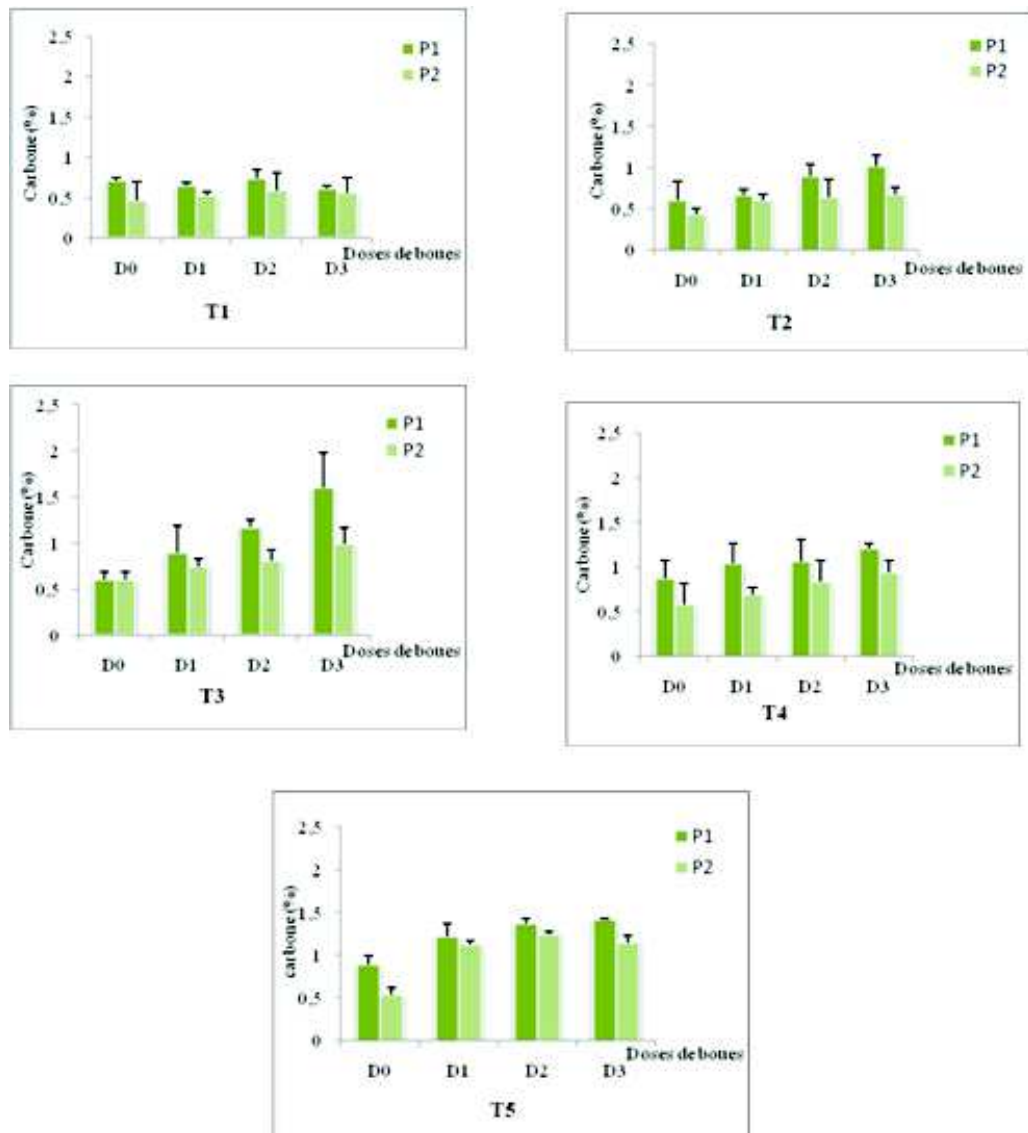


Figure 11. Variation temporelle des teneurs moyennes du carbone dans le sol en fonction des doses de boues et des horizons

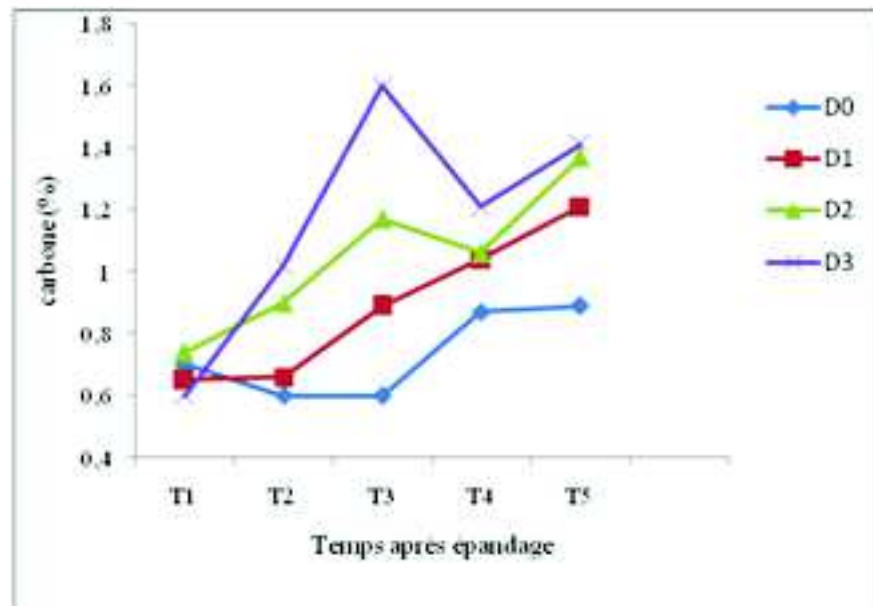


Figure 12. Evolution de la teneur en carbone dans l'horizon de surface en fonction du temps et des doses de boues

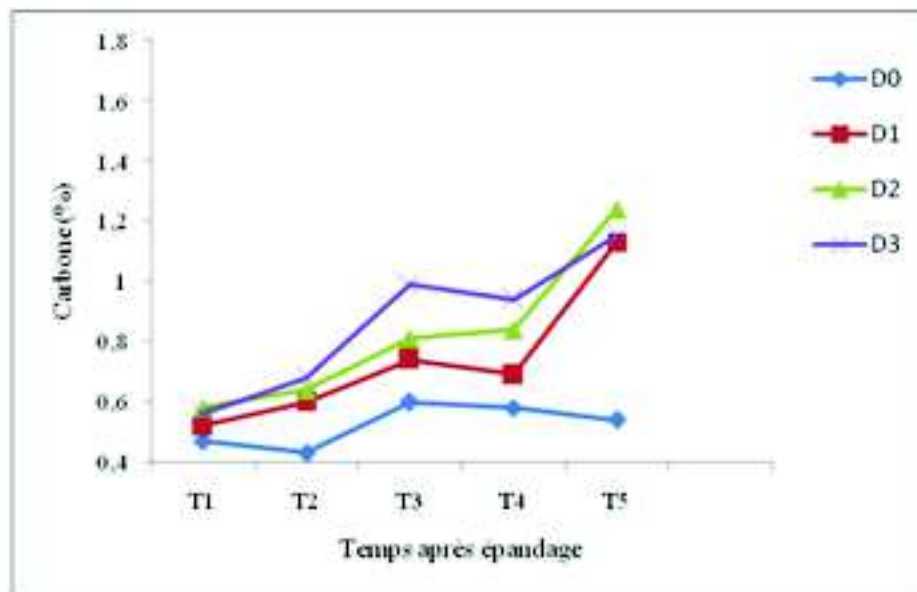


Figure 13. Evolution de la teneur en carbone dans l'horizon de subsurface en fonction du temps et des doses de boues

L'analyse de la variance au seuil de signification de 5% révèle que les teneurs du sol en carbone organique présentent des différences très hautement significatives ($p < 0.001$) entre les traitements, entre les profondeurs et entre les temps (tableau XV). L'interaction doses x profondeurs x temps donne une différence significative ($p = 0.071$). Les interactions doses x profondeurs et profondeurs x temps ont donné des différences non significatives.

Source de variations	DDL	SCE	CM	F Observé	P
Blocs	3	0,1743	0,0581	2,26	
Doses	3	3,4445	1,1482	44,62	<,001
Profondeurs	1	1,9936	1,9936	77,48	<,001
Temps	4	5,3360	1,3340	51,84	<,001
Doses x Profondeurs	3	0,1141	0,0380	1,48	0,224
Doses x Temps	12	1,5407	0,1284	4,99	<,001
Profondeurs x Temps	4	0,1093	0,0273	1,06	0,378
Doses x Profondeurs x temps	12	0,5312	0,0442	1,72	0,071
Erreur	117	3,0106	0,0257		
Total	159	16,2547			

Tableau XV. Analyse de la variance de la teneur du sol en carbone organique en fonction des doses, des profondeurs, du temps, et de leurs interactions

Au même seuil de signification (5 %), les PPDS entre les teneurs du carbone organique dans les traitements (0.0710 %); dans les temps (0.0794 %), et dans les profondeurs (0.0502 %) ont permis de déterminer les groupes homogènes (tableau XVI).

Les teneurs en carbone organique dans le sol varient en fonction des doses de boues selon le classement suivant :

$$D3 > D2 > D1 > D0$$

Les teneurs en carbone organique sont variables dans le temps selon le classement suivant :

$$T5 > T4 = T3 > T2 > T1$$

L'horizon de surface enregistre la plus forte teneur en carbone organique :

$$P1 > P2$$

1.1.4. Le rapport C/N

Les variations du rapport C/N obtenues dans les deux profondeurs du sol amendé en différentes doses de boues résiduaires sont présentées dans le tableau IV en annexe.

Ces résultats montrent que le rapport C/N du sol est faible dans les deux profondeurs de tous les traitements et à différents temps après épandage (figures 14, 15 et 16). Cependant, à T4 il se produit une diminution très remarquable du rapport C/N pour les doses D2 et D3.

L'analyse de la variance au seuil de signification de 5% (tableau XVII) révèle une différence non significative entre les traitements ($p = 0.521$) et entre les profondeurs ($p = 0.143$). Par contre la différence est très hautement significative ($p < 0,001$) entre les temps et pour l'interaction doses x temps.

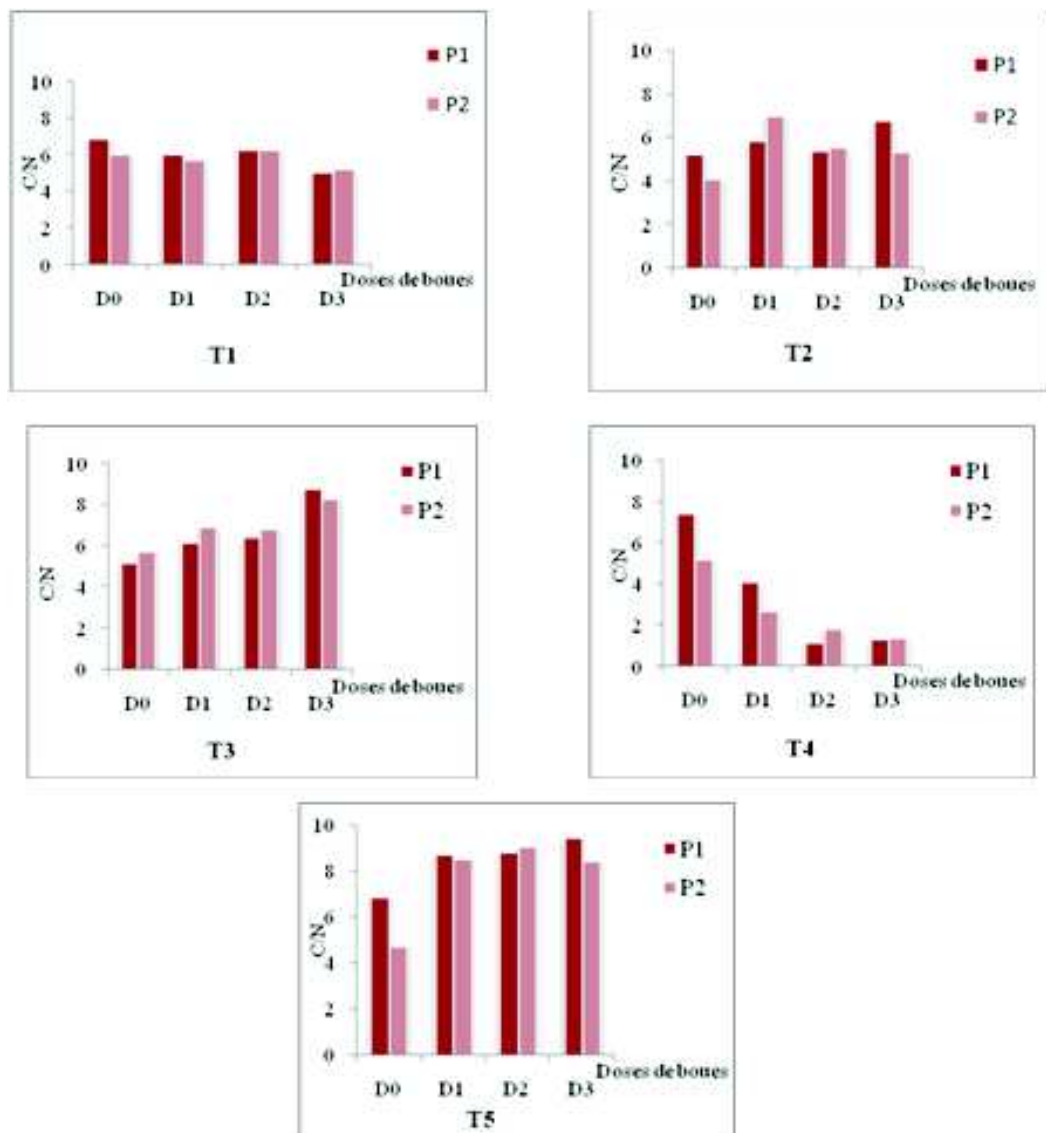


Figure 14. Variation temporelle du rapport C/N dans le sol en fonction des doses de boues et des horizons

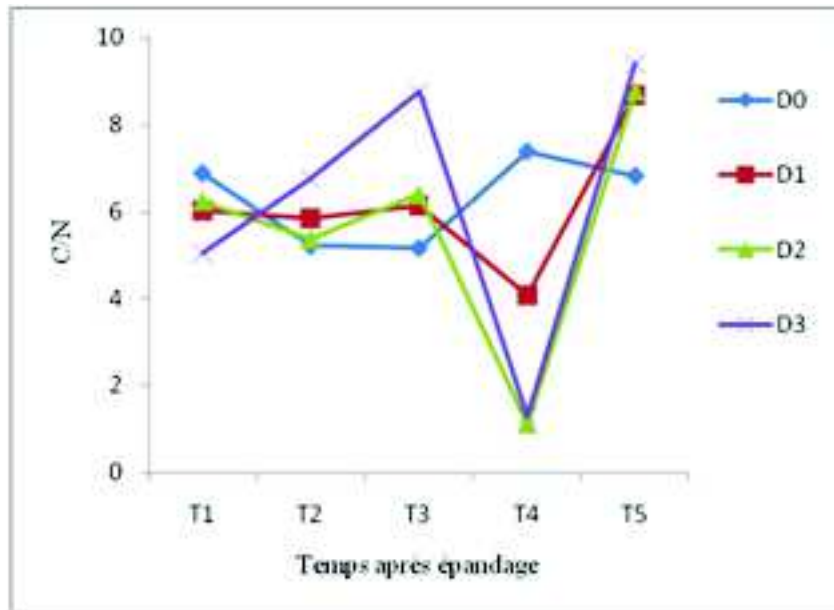


Figure 15. Evolution du rapport C/N dans l'horizon de surface du sol en fonction du temps et des doses de boues

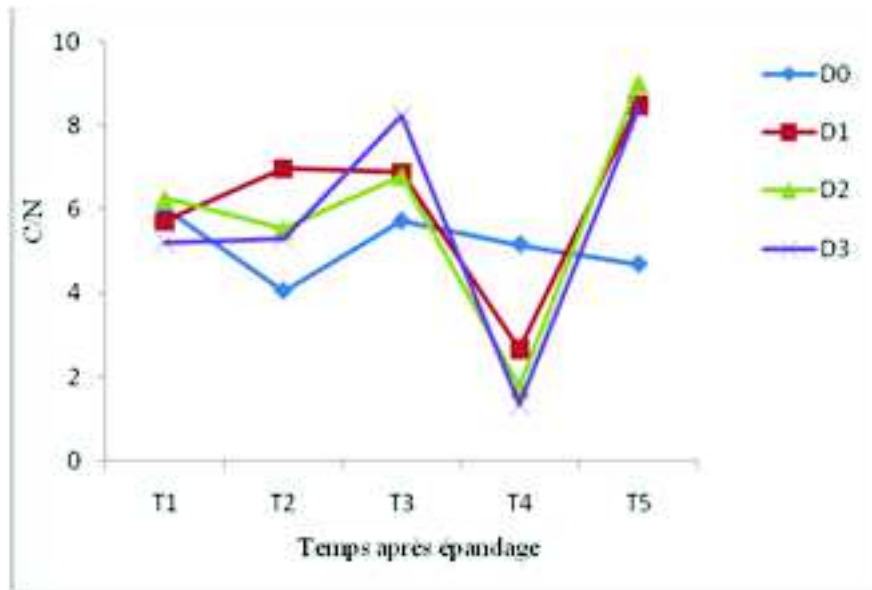


Figure 16. Evolution du rapport C/N dans l'horizon de subsurface en fonction du temps et des doses de boues

Source de variations	DDL	SCE	CM	F. Observé	P
Blocs	3	1,056	0,352	0,15	
Doses	3	5,318	1,773	0,76	0,521
Profondeurs	1	5,084	5,084	2,17	0,143
Temps	4	422,734	105,683	45,10	<,001
Doses x Profondeurs	3	12,461	4,154	1,77	0,156
Doses x Temps	12	240,515	20,043	8,55	<,001
Profondeurs x Temps	4	6,042	1,511	0,64	0,632
Doses x Profondeurs x temps	12	16,502	1,375	0,59	0,849
Erreur	117	274,184	2,343		
Total	159	983,895			

Tableau XVII. Analyse de la variance du rapport C/N en fonctions des doses de boues, des profondeurs, du temps, et de leurs interactions

Au seuil de signification de 5%, les PPDS entre les rapports C/N dans les différents traitements (0.678), dans les temps après épandage (0.758), et dans les profondeurs (0.479) ont mis en évidence des groupes homogènes (tableau XVIII).

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes C/N	Niveaux des facteurs
Les doses	A	6,15	D1
	A	5,98	D3
	A	5,73	D2
	A	5,71	D0
Les temps	A	8,04	T5
	B	6,76	T3
	C	5,93	T1
	C	5,63	T2
	D	3,10	T4
Les profondeurs	A	6,07	P1
	A	5,72	P2

Tableau XVIII. Groupes homogènes du rapport C/N en fonction des facteurs étudiés

Ces résultats montrent que les doses de boues n'ont pas eu un effet significatif sur le rapport C/N dans les deux horizons du sol. Par contre, le facteur temps a eu un effet très significatif sur le rapport C/N, les valeurs obtenues permettent de classer les traitements ainsi :

$$T5 > T3 > T1 = T2 > T4$$

1.1.5. Discussion

· L'azote minéral

Les teneurs du sol en azote minéral ont varié en fonction des doses de boues résiduelles apportées et en fonction du temps après épandage. Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées au niveau de l'horizon de surface (P1) des traitements D3 (60 t/ha) et D2 (45 t/ha) durant les périodes T1 (en été, 3 mois après l'épandage), T2 (en automne, 6 mois après épandage,) et T4 (au printemps, 12 mois après épandage). En effet, et par rapport au témoin (D0), nous avons relevé, respectivement, dans les traitements D3 et D2 des gains en azote minéral de 117.55 ppm et 110.2 ppm en T1, 127.6 ppm et 132.9 ppm en T2, et 100.1 ppm et 93.38 ppm en T4.

Les résultats obtenus dans ce travail concordent avec ceux de Daudin (2003), Scheiner (2005), et Karoune (2008) qui montrent que l'incorporation au sol d'une boue brute non compostée provoque une augmentation du sol en azote minéral. Houot (2009) trouve qu'environ 30% de l'azote des boues apportées au sol sont disponibles durant la première année du traitement. Korboulewsky *et al* (2001) montrent que l'apport de 90 t/ha de boues entraîne un enrichissement du sol en azote minéral jusqu'au niveau de l'horizon de subsurface (30-60 cm). L'augmentation de la teneur du sol en azote minéral lors de certaines périodes de l'expérimentation (T1, T2 et T4) est probablement due, d'une part, à la minéralisation de la matière organique des boues enfouies puisque les conditions environnementales (température et humidité du sol) étaient favorables, et d'autre part à la solubilisation de l'azote minéral contenu dans les boues et qui représente environ 7% de l'azote total (Girard *et al.*, 2005).

En plus des conditions du milieu (eau et température), la minéralisation de la matière organique est favorisée par le faible rapport C/N des boues épandues. En effet les boues utilisées présentent un rapport C/N de 6.65. Scheiner (2005) indique qu'un substrat possédant un rapport C/N <10 favorise la minéralisation nette de l'azote dans le sol, alors qu'un autre ayant un C/N > 30 provoque l'immobilisation de l'azote dans le sol.

En revanche, en T3 (en hiver, 9 mois après épandage) les teneurs du sol en azote minéral ont diminué dans ces traitements (D2 = 42 ppm et D3 = 46.20 ppm). Cette diminution serait provoquée par la lixiviation par les eaux de pluies, puisque cette période coïncide avec la saison hivernale. En effet, Benbrahim *et al*, (2003) ont indiqué que les moyennes annuelles de la lixiviation de l'azote nitrique mesuré 14 mois après épandage étaient de 53.5 et 21.3 kg/ha/an pour, respectivement, les boues liquides et les boues compostées. Ils stipulaient également, que la plus grande partie de ce lessivage est observée dans les trois mois qui suivent l'épandage car les conditions climatiques favorisent la lixiviation. De plus, il est fort probable qu'en cette période relativement froide, la minéralisation de la matière organique serait ralentie.

Au temps T5 (vers la fin du cycle végétatif de la culture du maïs), et après leur augmentation en T4, les taux d'azote minéral ont encore diminué dans ces traitements (D3 et D2) pour atteindre le même niveau qu'en T3. Cette diminution serait à rapprocher des prélèvements par la culture du maïs.

L'azote total

Les teneurs du sol en azote total dans les traitements (D1, D2 et D3) sont comparables dans les périodes T1, T2, T3 et T5. La moyenne des teneurs du sol en azote total obtenues dans les périodes (T1, T2, T3 et T5) a permis d'enregistrer dans l'horizon de surface (P1), par rapport au témoin, une augmentation de 8 % dans le traitement D1 et des augmentations de 33 % dans les deux traitements D2 et D3. Par ailleurs, au niveau de l'horizon de subsurface (P2), les augmentations de la teneur du sol en azote total, par rapport au témoin, sont de 10 %, 20% et 30% respectivement dans les traitements D1, D2 et D3.

Ces résultats corroborent ceux de plusieurs recherches ayant trait à la valorisation agricole /ou forestière des boues résiduaires. Benbrahim *et al* (2003), indiquent que les apports d'azote total par l'épandage de 3 t/ ha/an de matière sèche de boues liquides et de boues compostées (de mars à juin 2002) sont respectivement de 301 et de 360 kg /ha. Ces quantités, dans les 20 premiers centimètres de sol, représentent environ 30 % du stock initial en azote total.

Karoune (2008) a trouvé que, selon les doses de boues apportées, des teneurs du sol en azote total varient entre 0.10 à 0.43 %. Ati (2010) rapporte que la teneur moyenne en azote total du sol amendé en boue résiduaire est six fois plus élevée que celle du témoin.

Le carbone organique

Bien que les teneurs du sol en carbone organique dans tous les traitements ne soient pas stables dans le temps, elles restent proportionnelles aux doses de boues apportées. Ces teneurs sont remarquablement plus élevées dans l'horizon de surface de chaque traitement.

En effet, dans cet horizon la moyenne des teneurs en carbone de toutes les périodes étudiées montre des augmentations de la teneur en carbone organique de 21 %, 43,83 % et 60 % respectivement dans les traitements D1, D2 et D3 par rapport au témoin.

Ces résultats concordent avec ceux de plusieurs recherches. N'Dayegamiye et Drapeau (2009) ont trouvé que les apports de boues mixtes (18, 36 et 54 t/ha) ont accru de 14 à 36 % les teneurs du sol en carbone (selon les doses apportées). Aussi, Ati (2010) a indiqué que l'apport de boues résiduaires a permis d'avoir une teneur en carbone de 1,41% contre 0,58 % et 0,45 % respectivement pour l'engrais minéral et le témoin.

Par ailleurs, Fahd-Rachid (1993) a montré que l'apport de boues (100t/ha/2 ans) a augmenté la teneur du sol en carbone de 20% sous culture de pomme de terre et de 8 à 17 % sous culture de maïs irrigué.

Toutefois, les taux de carbone obtenus dans ce travail restent faibles par rapport au taux d'argile du sol (>40%). Ces taux de carbone ne constituent pas la matière organique stable du sol. En effet, et selon N'Dayegamiye *et al*, (2004), les boues résiduaires non compostées, contiennent des composés organiques facilement minéralisables, comme les sucres, les acides organiques, la cellulose et l'hémicellulose. Ces composés stimulent la microflore, mais laissent peu de matière organique stable.

Le rapport C/N

Les valeurs obtenues sont relativement faibles (<9) et favorables à la minéralisation. Ce rapport est indépendant des doses et des profondeurs, il présente une certaine variation en fonction des doses dans une gamme restreinte (C/N varie entre 5 et 8). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Daudin (2003), N'Dayegamiye (2007), Boutin *et al*. (2010).

Au temps T5, les valeurs du rapport C/N dans la profondeur (P1) des traitements (D1, D2 et D3) ont rehaussé pour atteindre, respectivement, les valeurs de 8.69, 8.76 et 9.04. Ce rehaussement peut être expliqué par le fait que les taux d'azote total ont beaucoup diminué, suite aux prélèvements de la culture.

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les boues résiduaires apportées au sol ont eu un effet positif sur la teneur du sol en azote total, en azote minéral et en carbone organique dès la première année d'épandage.

Les teneurs du sol en azote minéral les plus élevées ont été obtenues dans la première profondeur (P1) des traitements D3 (60t/ha) et D2 (45t/ha) dans les périodes T1 (3 mois après épandage), T2 (6 mois après épandage) et T4 (12 mois après épandage) qui suivent l'épandage. En effet, et par rapport au témoin (D0), nous avons relevé, respectivement, dans les traitements D3 et D2 des gains en azote minéral de +117.55 ppm et +110.2 ppm en T1, +127.6 ppm et +132.9 ppm en T2, et +100.1 ppm et +93.38 ppm en T4.

La teneur du sol en carbone a été aussi améliorée dans l'horizon de surface du sol (P1) suite à l'apport des boues résiduaires. Cette amélioration est proportionnelle à la dose de boues apportées. Comparativement au témoin (D0), nous avons enregistré en moyenne des augmentations de +21 %, +43,83 % et +60 % respectivement dans les traitements D1, D2 et D3. Cependant ces teneurs restent modérées par rapport à la teneur du sol en argile (>40%) et insuffisantes pour relever le niveau de la matière organique du sol qui était très faible (2.02 %) avant l'épandage des différentes doses de boues résiduaires.

Les valeurs du rapport C/N obtenues dans tous les traitements (D0, D1, D2 et D3), à différentes périodes (T1, T2, T3, T4 et T5) qui suivent l'épandage, sont relativement faibles (C/N < 9). Ceci indique que les conditions sont favorables à la minéralisation des composés organiques.

1.2. Les paramètres physiques

Les paramètres physiques étudiés sont la densité apparente et la rétention en eau à différentes forces de succion. Ils ont fait l'objet de déterminations au niveau de l'horizon de surface (P1 = 0-25 cm). La mesure de la densité a été faite à 3 périodes (T1' = 6 mois après épandage, T2' = 12 mois après épandage, T3' = 18 mois après épandage). Les courbes de rétention en eau ont été réalisées seulement à T1' et T2'.

1.2.1. Densité apparente

Les résultats obtenus sur la densité apparente du sol à différentes périodes (T1', T2' et T3') après épandage des boues résiduaires sont présentés dans le tableau V en annexe.

Ces résultats montrent que la densité apparente mesurée dans les périodes T1', T2' et T3' est comparable dans les traitements D0, D1. En revanche, en T2' et T3', il se produit une certaine diminution de la densité apparente au niveau des traitements D2 et D3 par rapport aux traitements D0 et D1 (figure 17).

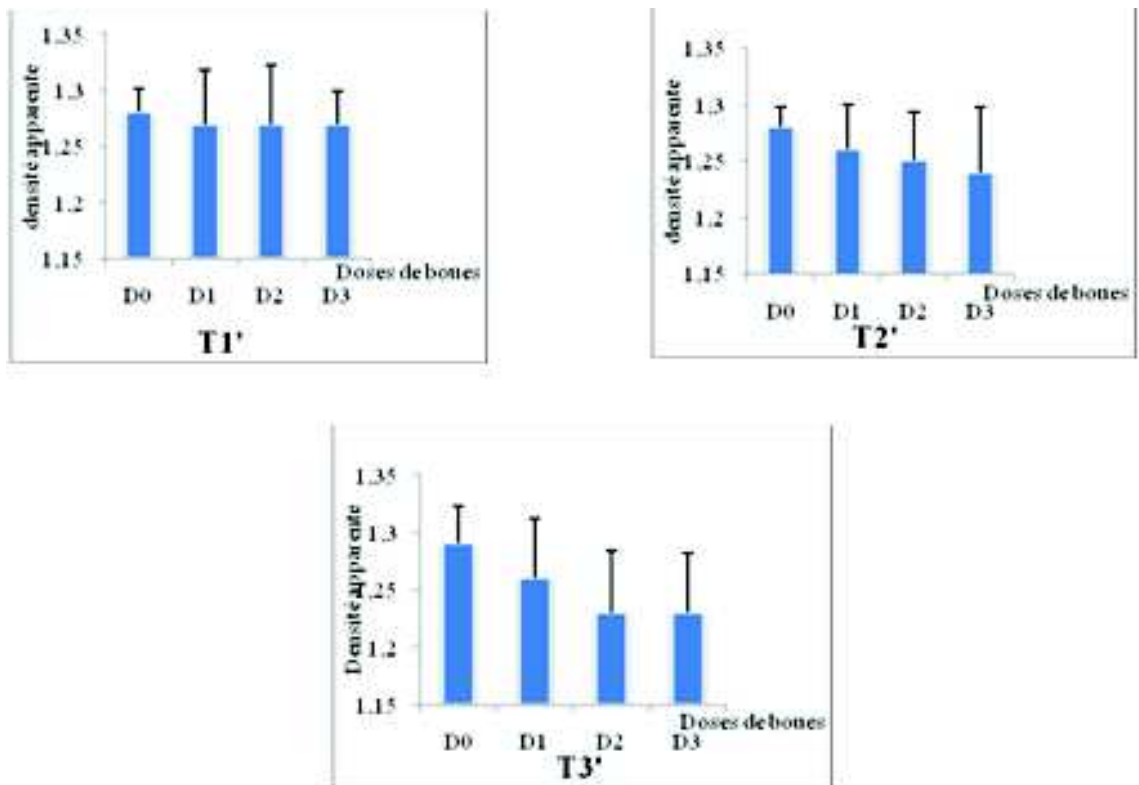


Figure 17. Variation temporelle de la densité apparente du sol en fonction des doses de boues épandues

L'évolution temporelle de la densité apparente est limitée aux traitements D2 et D3 (figure 18). En effet dans ces plus fortes doses, il se produit une faible diminution de la densité apparente dans les périodes T2' et T3' par rapport aux deux plus faibles doses (traitements D0 et D1) pour lesquelles la densité apparente reste relativement stable.

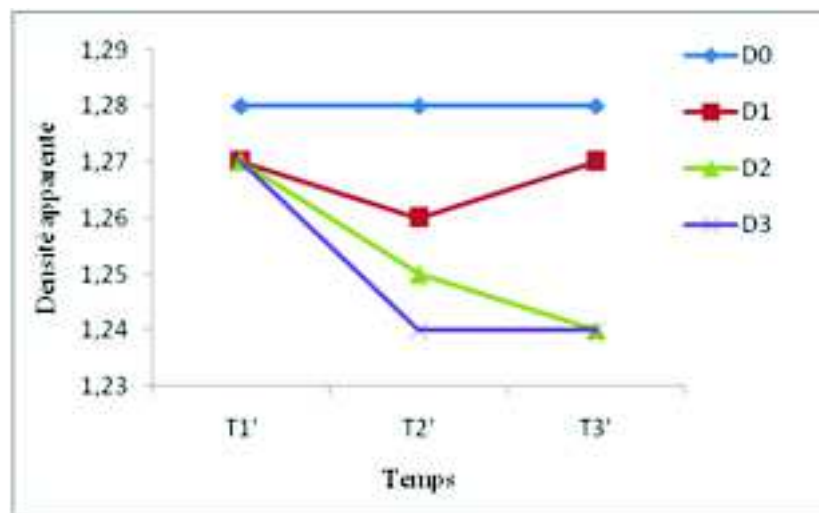


Figure 18. Evolution de la densité apparente dans l'horizon de surface en fonction du temps et des doses de boues

Au seuil de signification de 5%, l'analyse de la variance montre une différence non significative entre les traitements ($p = 0.199$), entre les temps ($p = 0.324$) et même pour l'interaction doses x temps ($p = 0.896$) (tableau XIX).

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	0,009173	0,003058	1,97	
Doses	3	0,007623	0,002541	1,64	0,199
Temps	2	0,003617	0,001808	1,17	0,324
Doses x Temps	6	0,003383	0,000564	0,36	0,896
Erreur	33	0,051102	0,001549		
Total	47	0,074898			

Tableau XIX. Analyse de la variance de la densité apparente du sol en fonction des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

1.2.2 La rétention en eau à différents pF

Les résultats obtenus sur la rétention en eau à différentes forces de succion (pF) en fonction des doses de boues apportées et en fonction du temps après épandage, sont présentés dans le tableau XX.

Traitements	Teneurs en eau (g/100g terre)											
	pF 1		pF 1,6		pF 1,9		pF 2,5		pF 3,5		pF 4,2	
	T1'	T2'	T1'	T2'	T1'	T2'	T1'	T2'	T1'	T2'	T1'	T2'
D0 Moyenne	47,67	50,02	42,29	40,22	35,19	37,33	29,82	31,40	26,06	27,63	25,00	27,14
Ecartype	(3,93)	(5,57)	(2,54)	(1,54)	(3,12)	(0,89)	(3,99)	(0,75)	(4,87)	(1,13)	(4,21)	(0,57)
D1 Moyenne	48,05	53,60	42,07	40,97	35,75	38,02	29,96	31,66	26,76	27,85	25,14	26,90
Ecartype	(5,08)	(4,64)	(3,49)	(2,73)	(3,28)	(1,81)	(3,39)	(1,87)	(3,79)	(1,87)	(3,44)	(1,8)
D2 Moyenne	48,34	54,08	42,43	42,21	37,42	39,05	31,51	32,01	28,00	28,20	26,73	26,98
Ecartype	(1,3)	(1,34)	(1,53)	(3,02)	(1,72)	(2,52)	(1,88)	(1,62)	(1,48)	(2,46)	(1,07)	(2,26)
D3 Moyenne	48,66	58,42	42,87	43,61	38,00	39,33	32,45	32,43	29,53	28,12	28,01	26,98
Ecartype	(1,91)	(3,01)	(1,67)	(0,69)	(1,17)	(0,43)	(1,49)	(1,41)	(1,07)	(1,66)	(0,95)	(1,64)

Tableau XX. Teneurs du sol en eau à différents pF en fonction des doses de boues et des temps après l'épandage

Ces résultats ont permis de tracer les variations de l'humidité en fonction du potentiel de l'eau (figures 19 et 20). Ils montrent que la teneur du sol en eau à différents potentiel est comparable dans tous les traitements (D0, D1, D2 et D3) et dans les deux périodes (T1' et T2') qui suivent l'épandage.

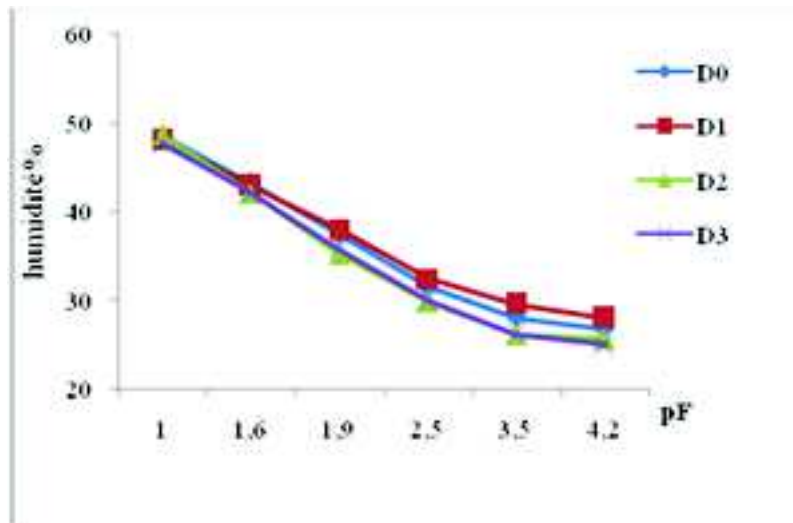


Figure 19. Taux d'humidité dans l'horizon de surface à différents pF en fonction des doses de boues à T1'

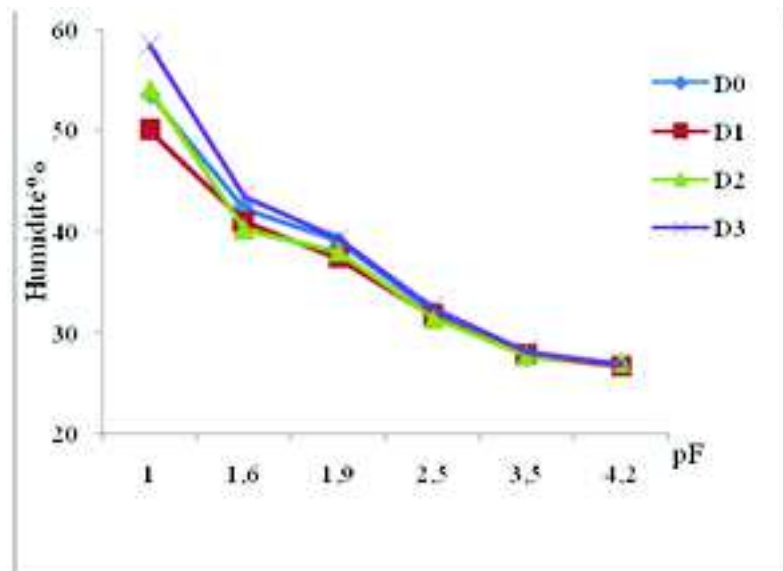


Figure 20. Taux d'humidité dans l'horizon de surface à différents pF en fonction des doses de boues à T2'

L'analyse de la variance réalisée pour chaque pF a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- Pour pF1 (tableau VI en annexe), au seuil de signification de 5%, la différence est non significative entre les doses de boues ($p=0.112$), la différence est significative pour l'effet du temps ($p=0.001$), et l'effet de l'interaction Doses x Temps n'est pas significative ($p=0.272$).
- Pour pF 1,6 (tableau VII en annexe), au seuil de signification de 5 %, les effets des doses ($p=0.215$), du temps ($p=0.357$) et l'interaction Doses x Temps ($p=0.546$) sont non significatifs.
- Pour pF 1,9 (tableau VIII en annexe), au seuil de signification de 5 %, la différence est significative pour l'effet des doses ($p=0.029$), elle est également significative pour

l'effet du temps ($p=0.005$), elle est non significative ($p=0.936$) pour l'interaction Doses x Temps.

- Pour pF 2,5 (tableau IX en annexe) au seuil de signification de 5 %, la différence est non significative pour l'effet des doses ($p=0.107$) et pour l'effet du temps ($p=0.110$), ainsi que pour l'interaction Doses x Temps ($p= 0.652$).
- Pour pF 3,5 (tableau X en annexe), au seuil de signification de 5%, la différence est non significative pour l'effet des doses ($p=0.230$), pour l'effet du temps ($p=0.608$), et pour l'interaction Doses x Temps ($p=0.470$).
- Pour pF 4,2 (tableau XI en annexe), au seuil de signification de 5 %, la différence est non significative entre les doses ($p=0.312$), entre les temps ($p=0.224$), et pour l'interaction Doses x Temps ($p=0.282$).

Finalement, les effets des doses et du temps, sur la rétention en eau sont significatifs pour pF 1,9.

Les PPDS entre l'effet des doses (1.74) et l'effet du temps (1.23) sur la rétention du sol en eau à pF 1,9 ont permis de dégager les groupes homogènes présentés dans le tableau XXI.

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes H (%)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	38,66	D3
	B A	38,23	D2
	B C	36,88	D1
	C	36,26	D0
Les temps	A	38,43	T2'
	B	36,59	T1'

Tableau XXI. Groupes homogènes au pF 1,9 en fonction des facteurs étudiés

Ces résultats montrent que les doses D3 et D2 ont presque le même effet sur la rétention du sol en eau, et les doses D1 et D0 se comportent également presque de la même manière. Ceci a permis d'avoir le classement suivant :

$$D3 \geq D2 > D1 \geq D0$$

L'effet temps a permis d'avoir le classement :

$$T2' > T1'$$

1.2.3. Discussion

- Densité apparente

L'apport des trois doses de boues ne semble pas modifier de façon significative la densité apparente du sol.

La quantité du carbone restante dans le sol amendé avec les trois doses de boues semble donc insuffisante pour affecter (d'une manière significative) la densité apparente du sol qui présente une teneur en argile relativement élevée (>40 %).

Pour la teneur du carbone la plus élevée (1.41%) apportée par la dose la plus élevée des boues (D3), le rapport argile / matière organique est de l'ordre de 28,94. Ce rapport est très élevé, il doit être de l'ordre de 10 pour que la matière organique affecte significativement les propriétés physiques du sol (Mémento de l'agronome, 1993).

Ces résultats concordent avec ceux de Zerrouk (1992), Korboulewsky (2001), N'Dayegamiye *et al.*, (2004), N'Dayegamiye (2009), N'Dayegamiye et Drapeau (2009). Cependant ils contredisent d'autres qui ont trouvé des effets significatifs. Les résultats de ces travaux ont été obtenus à la suite d'apports très importants de boues, au minimum 150 t/ha (Ballif *et al.*, 1991), ou après des amendements très modérés mais répétés avec 45 t/ha quatre années consécutives, (Zebarth *et al.*, 1999), 100 t/ha renouvelé une fois à deux ans d'intervalle, (Prone *et al.*, 1999).

Cela suggère que dans ce travail la dose la plus élevée (60 t/ha) apportée une seule fois est insuffisante pour améliorer significativement la densité apparente d'un sol à caractère argileux.

Rétention en eau

Les courbes des pF réalisées dans les deux périodes (T1' et T2') montrent que les écarts de la teneur du sol en eau sont très faibles entre le témoin (D0) et les traitements (D1, D2 et D3).

Néanmoins, au pF=1,9 les teneurs en eau sont différentes entre les doses et entre les temps.

En T1', les teneurs en eau sont semblables dans D0 (35,19 %) et D1 (35,75 %) mais différentes de celles de D2 (37,42 %) et D3 (38 %) qui sont, aussi, comparables entre elles.

En T2' ces teneurs augmentent dans tous les traitements et elles restent comparables deux à deux : D0 (37,33 %) avec D1 (38,02 %) et D2 (39,05 %) avec D3 (39,33%).

Cela suppose que, par rapport aux doses D0 et D1, les doses D2 et D3 ont amélioré significativement la microporosité du sol. En effet, l'étude de la densité apparente a montré que ces mêmes doses (D2 et D3) ont permis une légère diminution de la densité apparente en T2' et T3'.

Les valeurs de l'humidité ainsi trouvées aux potentiels matriciels de 1,9 et 4,2 sont semblables à celles trouvées par Williams *et al.*, (1983), cité par (Hazelton et Murphy, 2007), qui indiquent, que pour un sol dont le taux d'argile est de 44 %, la teneur en eau à la capacité au champ (pF=2) est de 38 %, et au point de flétrissement (pF=4,2), elle est de 25 %. Rowell (1994) a montré, aussi, que pour un sol argileux, la teneur du sol en eau au point de flétrissement (pF=4,2) est de 23% et à la capacité au champ (pF=2-2,5) elle est de 44 %. Par ailleurs, dans un sol ayant 47 % d'argile, Ben Hassine *et al.* (2003) ont trouvé une teneur en eau à la capacité au champ de 33 à 37 %.

Mathieu et Pieltain (1998) indiquent, aussi, qu'à une teneur plus élevée en argile, correspond une teneur en eau plus élevée à n'importe quelle succion et une variation plus progressive de la pente de la courbe.

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les doses de boues apportées n'ont pas eu un effet significatif sur les paramètres physiques étudiés (densité apparente et rétention en eau du sol à différents pF).

2. Effet de l'apport des boues sur la culture

L'étude de l'effet des doses de boues résiduelles sur la culture du maïs fourrager a porté sur la croissance des plants à trois stades végétatifs (10 feuilles, floraison et maturité), les rendements en matière sèche totale, les rendements en grains et la teneur des graines du maïs en azote.

2.1. La croissance des plantes

Les hauteurs des plants du maïs fourrager ont été mesurées, durant les deux années d'expérimentation, aux stades 10 feuilles, à la floraison et à la maturité. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XII en annexe.

Durant la première année d'expérimentation, les résultats montrent qu'à chaque stade végétatif la hauteur des plants augmente légèrement avec la dose de boues apportée. Par contre, lors de la deuxième année, la hauteur des plants ne semble plus être affectée par la dose de boues (figure 21).

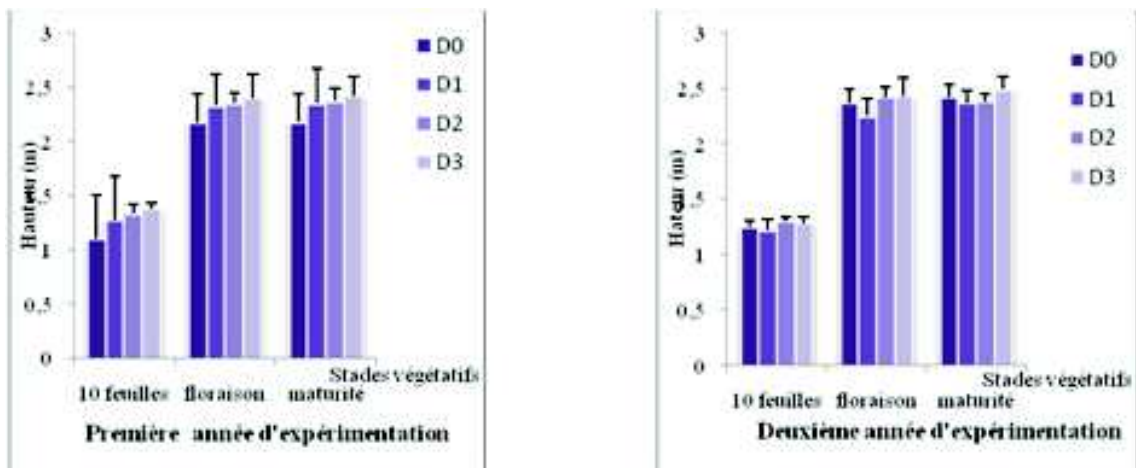


Figure 21. Hauteurs des plants du maïs fourrager à différents stades végétatifs, durant les deux années d'expérimentation, en fonction des doses de boues

L'analyse de la variance, au seuil de signification de 5 %, pour chaque stade végétatif, confirme cette constatation et donne les résultats suivants:

- **Stade 10 feuilles** : L'effet de doses de boues ($p= 0.409$) est non significatif, l'effet des deux années d'expérimentation ($p= 0.907$) est non significatif, l'interaction Dose x Année ($p= 0.608$) est non significative (tableau XIII en annexe).
- **Stade floraison**: L'effet de doses de boues ($p= 0.446$) est non significatif, l'effet des deux années d'expérimentation ($p=0.451$) n'est pas significatif, l'interaction Dose x Année est aussi non significative ($p= 0.588$) (tableau XIV en annexe).
- **Stade maturité** : Même à ce stade l'effet de doses de boues ($p=0.408$) est non significatif, de même que l'effet des deux années d'expérimentation ($p=0.104$) et l'interaction Doses x Année ($p=0.640$) (tableau XV en annexe).

En résumé, il s'avère que les apports de boue n'affectent pas la hauteur des plants du maïs.

2.2. Rendements en matière sèche totale

Les résultats obtenus sur les rendements en matière sèche totale (MST) du maïs fourrager, durant les deux années d'expérimentation sont présentés dans le tableau XVI en annexe. Ces résultats montrent que, pour les deux récoltes, les rendements obtenus en MS totale sont comparables dans les traitements D1, D2 et D3, et ils sont relativement plus élevés que ceux obtenus dans le témoin D0 (figure 22). Par ailleurs, les rendements obtenus lors de la première année dans les traitements D1, D2 et D3, sont plus élevés que ceux de la deuxième année.

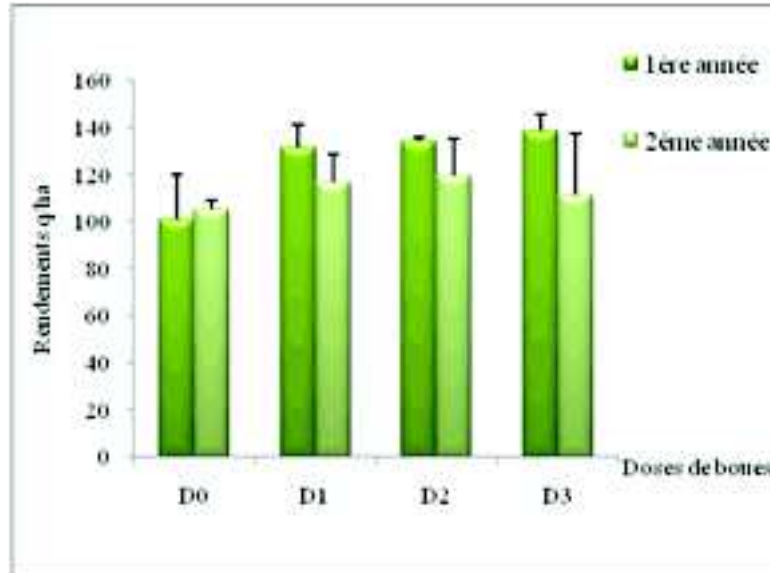


Figure 22. Variation des rendements de la matière sèche totale du maïs durant les deux années d'expérimentation en fonction des doses de boues

L'analyse de la variance, au seuil de signification de 5 %, révèle des différences significatives de l'effet doses ($p=0.014$) sur les rendements. Aussi, les rendements obtenus dans les deux années sont significativement différents ($p=0.023$), mais l'interaction Doses x Année n'est pas significative ($p=0.241$) (tableau XXII).

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	82,60	27,50	0,12	
Doses	3	2981,30	993,80	4,45	0,014
Année	1	1347,10	1347,10	6,03	0,023
Doses x Année	3	1013,20	337,70	1,51	0,241
Erreur	21	4690,20	223,30		
Total	31	10114,40			

Tableau XXII. Analyse de la variance des rendements en MST du maïs

Au seuil de signification de 5 %, les PPDS de l'effet dose sur les rendements (15.54) durant les deux années expérimentales (10.99) ont permis de mettre en évidence les groupes homogènes présentés dans le tableau XXIII.

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes rendements MST (q/ha)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	126,65	D2
	A	124,93	D3
	A	123,96	D1
	B	103,00	D0
Les années d'expérimentation	A	126,13	A1
	B	113,15	A2

Tableau XXIII. Les groupes homogènes des rendements en MST

Ces résultats montrent que les doses D1, D2 et D3 ont eu le même effet sur les rendements, cet effet se traduit par une augmentation du rendement par rapport au témoin :

$$D2 = D3 = D1 > D0$$

Par ailleurs, nous constatons que les rendements obtenus dans tous les traitements durant la première année d'expérimentation sont supérieurs à ceux de la deuxième année :

$$A1 > A2$$

2.3. Rendements en grains

Les résultats obtenus sur les rendements en grains du maïs fourrager, durant les deux années d'expérimentation sont présentés dans le tableau XVI en annexe.

Les rendements en grains sont comparables dans les traitements D1, D2 et D3 et ils sont supérieurs à celui du témoin D0 (figure 23). Les rendements obtenus lors de la première année semblent plus élevés que ceux de la deuxième année.

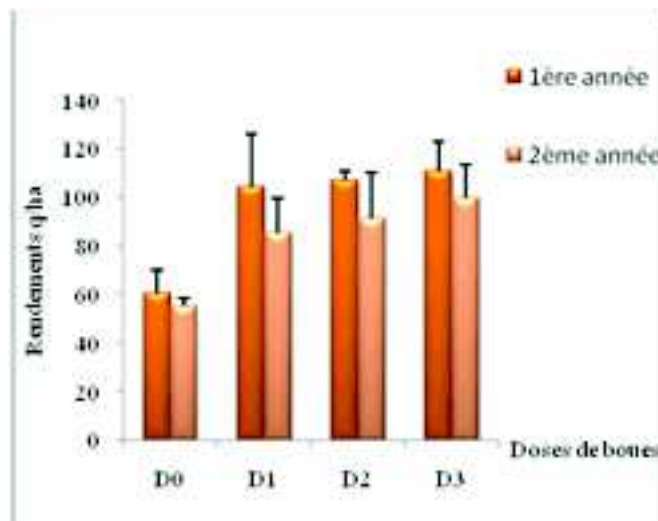


Figure 23. Variation des rendements en grains du maïs durant les deux années d'expérimentation en fonction des doses de boues

Les photos suivantes illustrent les aspects des épis du maïs fourrager obtenus dans les différents traitements (D0, D1, D2 et D3) durant les deux années d'étude:

• **Première année d'étude.**



Photo 5. D0. A1



Photo 6. D1. A1



Photo 7. D2. A1



Photo 8. D3. A1

• **Deuxième année d'étude**



Photo 9. D0. A2



Photo 10. D1. A2



Photo 11. D2. A2



Photo 12. D3. A2

A1= première année d'étude

A2= deuxième année d'étude

L'analyse de la variance, au seuil de signification de 5 %, montre que les doses de boues ont eu un effet très hautement significatif ($p < 0.001$) sur les rendements en grains du maïs. La différence des rendements obtenus dans les deux années d'expérimentation est significative ($p = 0,018$), mais l'interaction Doses x Années est non significative ($p = 0,798$) (tableau XXIV).

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	241,10	80,40	0,39	
Doses	3	10950,10	3650,00	17,87	<0,001
Année	1	1344,60	1344,60	6,58	0,018
Doses x Année	3	207,30	69,10	0,34	0,798
Erreur	21	4288,50	204,20		
Total	31	17031,60			

Tableau XXVI. Analyse de la variance des rendements en grains du maïs

Au seuil de signification de 5%, les PPDS de l'effet des doses de boues sur les rendements (14.86) durant les deux années d'expérimentation (10.51) ont permis de dégager les groupes homogènes présentés dans le tableau XXV.

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Moyennes rendements grains (q/ha)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	105,21	D3
	A	99,17	D2
	A	94,90	D1
	B	57,89	D0
Les années d'expérimentation	A	95,78	A1
	B	82,81	A2

Tableau XXV. Les groupes homogènes des rendements en grains du maïs

Ces résultats montrent que les doses de boues (D1, D2 et D3) ont produit le même effet sur les rendements en grains (groupe A). Cet effet est très différent de celui du témoin D0 (groupe B) :

$$D3=D2=D1>D0$$

Les rendements obtenus la première année d'expérimentation sont supérieurs à ceux de la deuxième année :

$$A1>A2$$

2.4. Teneurs des grains du maïs en azote

Les teneurs en azote des grains du maïs récoltés pendant les deux années en fonction des doses de boues épandues sont présentées dans le tableau XVI en annexe.

Ces résultats montrent que durant les deux années d'expérimentation, la teneur en azote des graines du maïs augmente avec la dose de boue apportée (figure 24). La teneur en azote des grains du maïs est relativement plus élevée lors de la première année de l'essai.

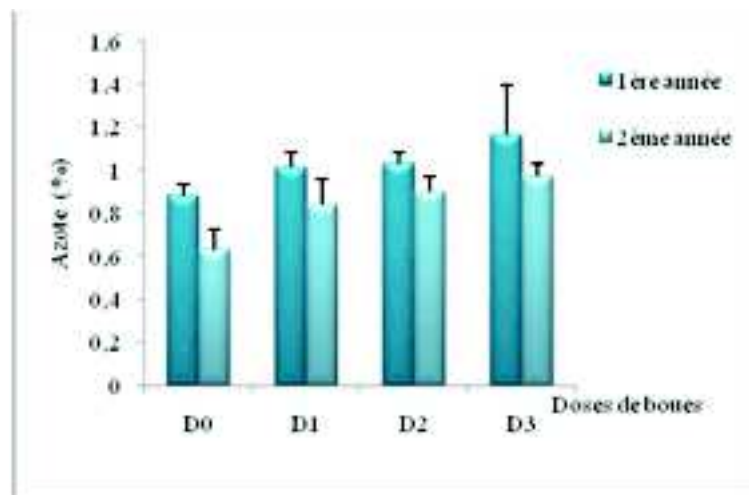


Figure 24. Variation des teneurs en azote des graines de maïs durant les deux années d'expérimentation, en fonction des doses de boues

L'analyse de la variance, au seuil de signification de 5 %, montre que les doses de boues ont eu un effet très hautement significatif ($p < 0.001$) sur la teneur en azote des graines

de maïs. La différence de la teneur en azote des graines est très hautement significative entre les deux années d'expérimentation ($p < 0.001$). Par contre l'interaction Doses x Années ne présente pas de différence significative ($p = 0.765$) (tableau XXVI).

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	0,00373	0,00124	0,09	
Doses	3	0,41113	0,13704	9,89	<0,001
Année	1	0,27195	0,27195	19,63	<0,001
Doses x Année	3	0,01601	0,00534	0,39	0,765
Erreur	21	0,29094	0,01385		
Total	31	0,99377			

Tableau XXVI. Analyse de la variance de la teneur en azote des graines du maïs

Au seuil de signification de 5 %, les PPDS de l'effet des doses de boues sur la teneur des graines du maïs fourrager en azote (0.1224) durant les deux années d'expérimentation (0.0865) ont permis de mettre en évidence les groupes homogènes présentés dans le tableau XXVII.

Facteurs étudiés	Groupes homogènes	Teneurs moyennes en azote (%)	Niveaux des facteurs
Les doses	A	1,07	D3
	BA	0,97	D2
	B	0,92	D1
	C	0,75	D0
Les années d'expérimentation	A	1,02	A1
	B	0,83	A2

Tableau XXVII. Les groupes homogènes des teneurs en azote des graines du maïs

Ces résultats montrent que la teneur en azote des graines varie ainsi :

$$D3 \geq D2 \geq D1 > D0$$

Ces résultats montrent aussi que les teneurs d'azote dans les graines récoltées la première année d'expérimentation sont plus élevées que celles de la deuxième année :

$$A1 > A2$$

2.5. Discussion

- **Croissance des plantes** : Les apports de boue n'affectent pas la hauteur des plants du maïs. Ce résultat signifie que les doses de boue apportées (30, 45 et 60 t /ha) ne seraient pas suffisantes pour affecter significativement la hauteur des plants.

L'apport des boues ne semble pas affecter la croissance des végétaux. En effet, Benbrahim *et al.* (2003) indiquent que les apports pendant 3 ans de 3 tonnes de matière sèche de

boues /ha /an de boues pâteuses et de boues compostées n'ont pas affecté la croissance des arbres de Pin maritime ni en diamètre ni en hauteur. Antolin *et al.* (2005) montrent que la dose de 15 tonnes de boue/ha apportée en une seule fois n'a pas affecté la croissance de l'orge par rapport à la dose de 45 t/ha fractionnée sur 3 années consécutives. En revanche, Mosquera-Losada *et al.* (2011) montrent que la hauteur des arbres forestiers (*Populus canadensis*) était significativement plus élevée, par rapport au témoin (sans boues), sous l'effet d'un apport de boues d'épuration (équivalent de 200 kg N total/ha /an avec chaulage de 2.5 t de CaCO₃ ; ou équivalent de 400 kg N total/ha/an sans chaulage).

Il existe donc une diversité de situations concernant l'influence de l'apport des boues sur la croissance des végétaux.

Rendements : Les résultats montrent que l'apport des boues augmente de façon significative le rendement en matière sèche totale ainsi que le rendement en grains par rapport au témoin. Par contre, l'effet des doses croissantes sur le rendement en matière sèche totale et en grains n'est pas significatif. Enfin, les rendements obtenus en matière sèche totale et en grains sont significativement plus élevés lors de la première année par rapport à la seconde année. L'effet des apports de boues sur le rendement et donc limité dans le temps.

Les travaux de N'Dayegamiye *et al.* (2004) révèlent que l'effet résiduel des boues mixtes (18, 36 et 54 t/ha) appliquées seuls en deux ans a permis des augmentations significatives des rendements de l'orge par rapport au témoin. Bipfubusa *et al.* (2006) montrent que les apports de 40 tonnes/ha de boues fraîches combinées avec les engrais ont accru les rendements du maïs de 64 % par rapport au témoin. Sans ajout d'engrais, les 40 t/ha ont augmenté les rendements de 26 % seulement. N'Dayegamiye (2009), indique que les apports répétés de boues mixtes, même sans complément d'engrais NPK, ont accru les rendements du maïs grain. Ces augmentations étant similaires à celles de l'engrais minéral NPK.

Des résultats similaires sont trouvés par Togay *et al.* (2008) sur le haricot sec, dont les plus faibles et les plus hauts rendements ont été obtenus respectivement dans le témoin (sans apport de boues) et le traitement (60 tonnes/ha de boues), néanmoins aucune différence significative des rendements en matière sèche et grains n'a été obtenue dans les traitements à 40 tonnes /ha et à 60 tonnes/ha de boues. Angin et Yaganoglu (2011), indiquent que, durant les 3 années d'étude de l'effet des doses de boues sur l'orge, les rendements de l'orge les plus élevés sont obtenus durant la première année d'expérimentation sous l'effet de la plus forte dose (120 t/ha) de boues. Les doses de 40 et 80 t/ha n'ont pas eu un effet significatif sur les rendements de l'orge.

L'effet de l'apport des boues sur le rendement des cultures s'avère donc relativement limité dans le temps.

Teneurs en azote des graines de maïs : Les résultats montrent que la teneur moyenne en azote des graines varie entre 0.83 % et 1.07 %. L'apport des boues augmente de façon significative la teneur en azote des grains, l'effet des doses croissantes des boues n'est pas significatif, et l'effet des boues sur la teneur en azote des grains est plus élevé lors de la première année.

Plusieurs travaux réalisés sur le maïs ont déjà montré que l'apport des boues provoque une augmentation de la teneur en azote des grains (N'Dayegamiye *et al.*, 2001 ; Bipfubusa *et al.*, 2006).

Cette augmentation serait provoquée par l'amélioration de la nutrition azotée engendrée par la minéralisation de l'azote organique contenu dans les boues.

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la hauteur des plants du maïs n'a pas été affectée par les doses de boues apportées.

En revanche, ces doses ont eu des effets positifs sur les rendements en matière sèche totale, les rendements en grains et la teneur des graines du maïs fourrager en azote.

3. Relation entre les paramètres étudiés

Pour mieux valoriser les résultats obtenus de ce travail, il est utile de réaliser des corrélations entre certains paramètres étudiés relatifs au sol et ceux relatifs au végétal.

3.1. Relation entre la teneur du sol en carbone et la densité apparente

L'équation de régression révèle que la diminution de la densité apparente est fortement liée à la présence du carbone organique dans le sol (figure 25). La corrélation entre la teneur du sol en carbone et la densité apparente est négative et hautement significative ($r = -0.3924$, $\alpha = 0.01$, $n = 48$). Cela suppose que les doses de boues apportées ont permis de diminuer significativement la densité apparente du sol et d'améliorer donc la porosité du sol.

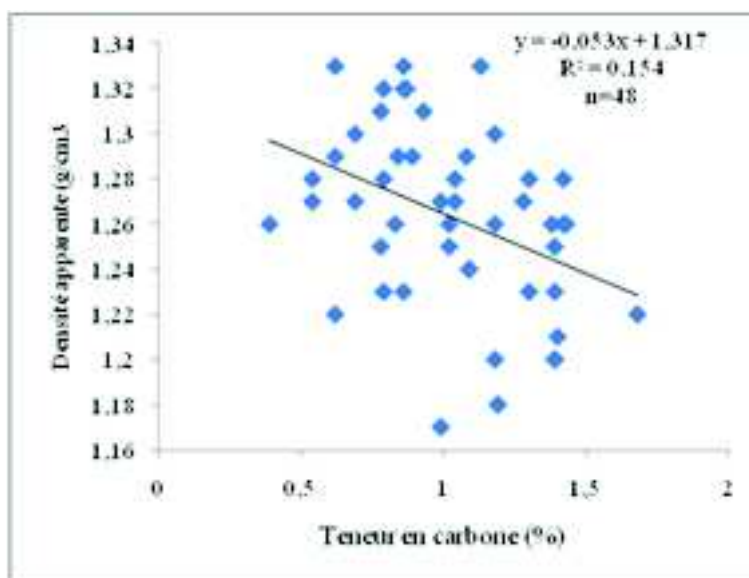


Figure 25. Corrélation entre la teneur du sol en carbone et la densité apparente

3.2. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et la teneur de la graine de maïs en azote

La droite de régression montre que la corrélation entre la teneur en azote dans le sol et dans la graine de maïs est très hautement significative ($r = 0.704$, $\alpha = 0.001$, $n = 32$) (figure 26). Cela signifie que la variabilité de la teneur de l'azote dans la graine est liée aux teneurs du sol en azote minéral.

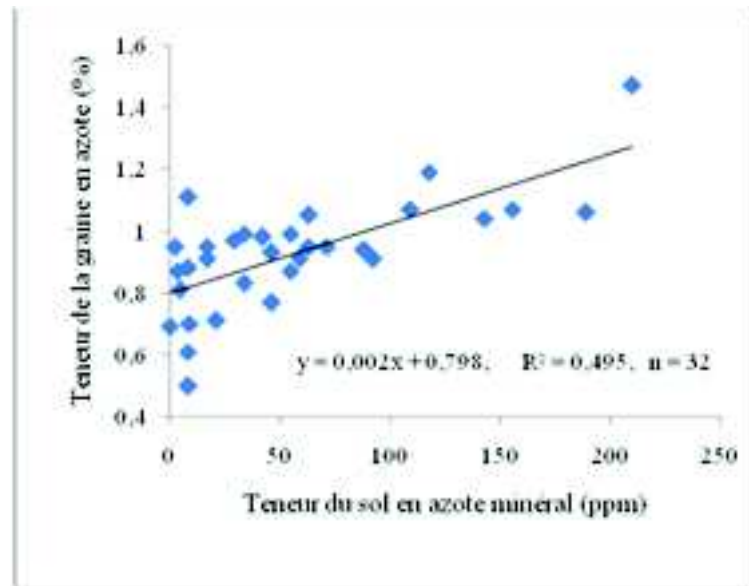


Figure 26. Corrélation entre la teneur du sol en azote minéral et la teneur de la graine du maïs fourrager en azote total

3.3. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement en matière sèche totale (MST)

La relation entre le rendement en MST et la teneur du sol en azote minéral est très hautement significative. En effet la droite de régression (figure 27) explique clairement la variabilité du rendement en MST en fonction de la teneur du sol en azote minéral ($r = 0.5514$, $\alpha = 0.001$, $n = 32$).

L'amélioration du rendement en MST s'explique donc par la richesse du sol en azote minéral.

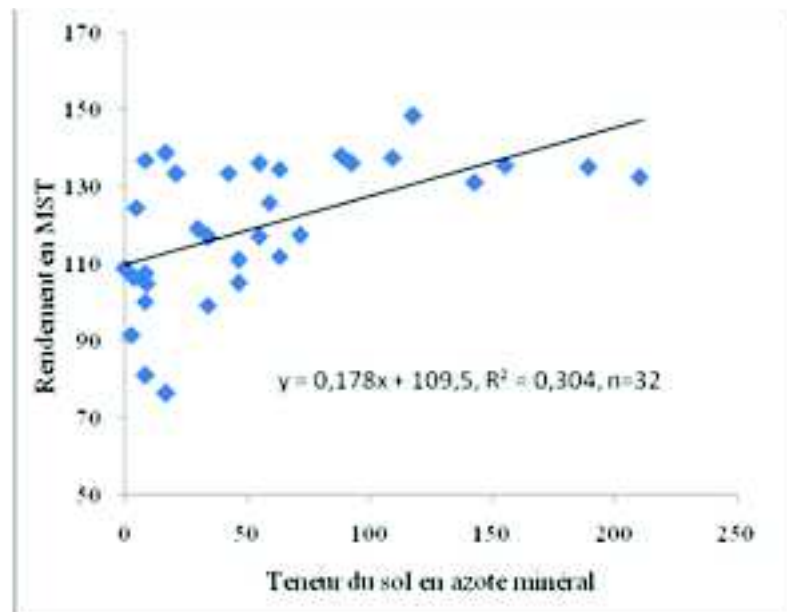


Figure 27. Corrélation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement en MST du maïs fourrager

3.4. Relation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement grains

La droite de régression obtenue dans la figure 28 montre que la variation du rendement en grains est très hautement corrélée à la teneur du sol en azote minéral ($r=0.5727$, $\alpha=0.001$, $n=32$). Cela signifie que l'augmentation du rendement grains est liée à l'augmentation de la teneur du sol en azote minéral.

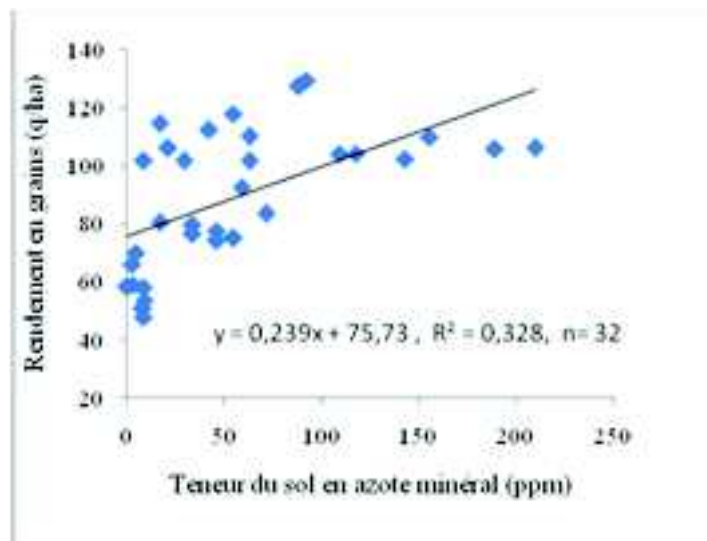


Figure 28. Corrélation entre la teneur du sol en azote minéral et le rendement en grains du maïs fourrager

Conclusion

Les calculs statistiques montrent que le carbone apporté par les boues a permis de diminuer la densité apparente du sol.

Par ailleurs, la teneur en azote minéral du sol obtenu par la minéralisation des boues apportées, affecte de façon significative la production du végétal sur le plan quantitatif (rendement en grains et matière sèche totale produite) et sur le plan qualitatif (teneur du grain en azote, et donc en protéines).

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de tester une possibilité de valorisation agricole des boues d'une station d'épuration. Il s'agit de caractériser les boues résiduelles issues de la station d'épuration de Réghaïa et ensuite d'étudier leurs effets sur le sol et sur le végétal. L'étude expérimentale en plein champ a été réalisée à la station expérimentale de l'INRAA à Mehdi Boualem (Alger). Les essais ont porté sur l'étude de l'effet des doses croissantes des boues (0 – 30 – 45 – 60 T/ha) sur les propriétés du sol et le comportement d'une culture de maïs. Différents paramètres concernant le sol et le végétal ont été étudiés pendant les deux années d'expérimentation.

Le travail rapporté dans ce mémoire montre que les boues résiduaires étudiées présentent certaines caractéristiques chimiques (teneurs en carbone et en azote, absence des éléments traces métalliques) favorables pour leur valorisation en agriculture. Concernant l'influence des boues sur les caractéristiques du sol, les résultats obtenus montrent que la matière organique des boues diminue la densité apparente de l'horizon de surface et augmente la rétention en eau à pF 1.9. Sur le plan chimique, l'apport des boues engendre une augmentation en matière organique, en azote total et en azote minéral au niveau de l'horizon de surface et cela dès la première année de l'utilisation des boues. Les valeurs du rapport C/N obtenues dans tous les traitements et à différentes périodes qui suivent l'épandage des boues, sont relativement faibles ($C/N < 9$). Ceci indique que les conditions sont favorables à la minéralisation des composés organiques des boues.

Concernant le végétal, l'apport des boues résiduaires a eu des effets différents sur le comportement de la plante. Leurs effets sur la hauteur de la plante n'étaient pas significatifs. En revanche, ils étaient bénéfiques sur les rendements en MST, les rendements grains et la teneur des graines de maïs fourrager en azote.

La recherche de corrélation entre les paramètres étudiés a permis de mettre en évidence une relation hautement significative et négative entre la teneur du sol en carbone et la densité apparente. Par ailleurs, la teneur en azote minéral du sol affecte de façon significative le rendement en grains du maïs, la production en matière sèche totale ainsi que la teneur des grains de maïs en azote.

Finalement, ce travail confirme la possibilité de valorisation agricole des boues de station d'épuration. Des travaux complémentaires sont, néanmoins, nécessaires pour déterminer la fréquence des apports et les doses utilisables sans risques sanitaires et environnementaux, dans un cadre d'une réglementation juridique adéquate.

Références bibliographiques

- Abdallahi M.M. et N'Dayegamiye A., 2000.** Effets de deux incorporations d'engrais verts sur le rendement et la nutrition en azote du blé (*Triticum aestivum* L.), ainsi que sur les propriétés physiques et biologiques du sol. *Can. J. Soil Sc.* 80 : 81-89.
- ADEME, 1996.** La valeur azotée des boues résiduares des stations d'épuration urbaines. 336 p .
- ADEME, 2001.** Les boues résiduares municipales et leur utilisation en agriculture. Dossier élaboré par le Comité National des Boues (C.N.B).
- ADEME, 2010.** L'intégration des boues d'épuration dans le plan de fertilisation. Fiche technique d'épandage.
- AFNOR, 1994.** Qualité des sols. Environnement. Recueil des normes françaises. A.F.N.O.R., Paris, 154 p.
- Aït Hamou R. et Boulahbal O., 1998.** Etude de l'effet dose de boues résiduares sur un sol agricole. *Revue «Recherche Agronomique »* N° 2 : 37-42.
- Aït Mbark K., 2010.** La valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech. Mémoire professionnel (niveau M), Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Amir S., 2005.** Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage. Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques de l'institut National Polytechnique de Toulouse. 312 p.
- Angin I. et Yaganoglu A.V., 2011.** Effects of sewage sludge application on some physical and chemical properties of a soil affected by wind erosion. *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 13 :757-768.
- Annabi M., 2005.** Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon. 270 p.
- Antolin M.C., Pascual I., Garcia C., Polo A. et Sanchez-Diaz M., 2005.** Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 94: 224-237.
- Ati S., 2010.** Etude de l'effet des boues résiduares sur sol cultivé: Dynamique du phosphore et son utilisation en zone semi-aride. Mémoire de magistère en sciences agronomiques de l'université El Hadj Lakhdar (Batna) 45p.
- Baize D., Courbe C., Suc O., Schwartz C., Tercé M., Bispo A., Sterckman T. et Ciesielski H., 2006.** Epandage de boues d'épuration urbaines sur des terres agricoles : impact sur la composition en éléments en traces des sols et des grains de blé tendre. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°53 : 35-61.

- Balesdent J. et Chenu C., 2009.** Le sol et le recyclage de la matière vivante. Le Sol, dossier INRA, janvier 2009 : 38-41.
- Ballif J.L., Moncomble D. et Descotes A., 1991.** Influence sur le ruissellement et l'érosion de couvertures de compost urbain et d'écorces fraîches broyées dans le vignoble champenois. ANPP, 3 : 359-365.
- Bechac J.P., Boutin P., Mercier B. et Nuer P., 1983.** Traitement des eaux usées. Edition Eyrolles, 1983. 281 p
- Benbrahim M., Denaix L., Carnus J.M., Timbal J., Chossat J.C., Scheifler R., Vaufleury A. G., Badot P. M., Tricot A. et Lolive J., 2003.** Effets environnementaux des épandages de boues de stations d'épuration en plantation de pin maritime. Dossier de l'environnement de l'INRA N° 25 :95-105.
- Ben Hassine H., Ben Salem M., Bonin G., Braudeau E. et Zidi C. 2003.** Réserve utile des sols du Nord-Ouest Tunisien, évolution sous culture. Etude et gestion des sols, volume 10, 1, 2003 : 19-33.
- Benmouffok A., 1994.** Caractérisation et valorisation agricole des boues résiduares de Draa Ben Khedda (Algérie). Cahiers Agricultures 1994 ; 3 :295-299.
- Bennabi B. et Hamici F., 1992.** Etude de l'effet dose de boues résiduares comme source de matière organique sur un sol agricole. Essai en vase de végétation sur une culture teste: Trifolium alexadrinum L. Var. M. R. 90. Mém. Ingé. d'état en agronomie, univ. de Tizi-Ouzou, 105 p.
- Benterrrouche I., 2007.** Réponse écophysologique d'essences forestières urbaines soumises à une fertilisation avec les boues d'épuration. Mémoire de magistère en écologie et environnement. Fac. Sci. Nat. Vie. Uuniv. «Mentouri», Constantine, 178 p.
- Bhattacharyya P., Chakraborty K. et Chakraborty B., 2003.** Evaluation of MSW compost as a component of integrated nutrient management in wet-land rice. Compost Science & Utilization 11: 343-350.
- Bipfubusa M., N'Dayegamiye A. et Antoun H., 2004.** Effets de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur l'agrégation du sol, l'inclusion et la minéralisation du carbone dans les macro-agrégats stables à l'eau. Can. Journ. of soil sci. : 47-55
- Bipfubusa M., N'Dayegamiye A. et Antoun H., 2006.** Evaluation des effets de boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. Agrosolutions, vol. 17 N°1 : 65-72.
- Boutin E., Blais J.F., Mercier G., Drogui P et Chartier M., 2010.** Valorisation de coproduits de l'industrie agro-alimentaire par production de compost de haute qualité. Rev. Can. génie civ. 37 : 156-166 (2010).
- Capowiez Y., 2009.** Effets bénéfiques des composts de boues sur les vers de terre. Magazine de bout en bou(es) N° 14, décembre 2009.
- Celierier J., 2008.** Caractérisation moléculaire et dynamique de la matière organique de compost (déchets verts/biodéchets) dans un sol. Thèse de doctorat en chimie organique, minérale et industrielle, Univ. de Poitiers. 333 p.
- Culot M., 2005.** Filières de valorisation agricole des matières organiques. Rapport technique de 73 p.

- Daudin D., 2003.** Caractérisation d'un substrat élaboré à base de boues de stations d'épuration conditionnées par mélange avec différents composants. ECOTECHNA, rapport final de 25 p.
- Dridi B. et Toumi C., 1998.** Influence d'amendements organiques et d'apport de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. Rev. Etude et gestion des sols, 6, 1:7-14.
- Dudkowski A., 2000.** L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. INRA-ME&s. 96p.
- F.A.O, 2005.** Utilisation des engrais par culture en Algérie. 43 p
- Fahd-Rachid A., 1993.** Effet à long terme d'apports continus de déchets urbains sur les caractéristiques du sol. Conséquences sur les propriétés de la matière organique en relation avec sa teneur en lipides. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, spécialité science du sol, de l'E.N.S.A de Montpellier. 151 p
- Gagnon B., Lalande R., Simard R.R. et Roy M., 2000.** Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation. Can. J. Soil Sci. 80:91-97.
- Garrec N., Picard-Bonnaud, F. et Pourcher, A.M., 2003.** Occurrence of *Listeria* sp and *L. monocytogenes* in sewage sludge used for land application: effect of dewatering liming and storage in tank on survival of *Listeria* species. FEMS Immunol. Med. Microbiol. 35 (3): 275-280.
- Giller K.E., Cadish G., Ehaliotis C. et Adams E., 1997.** Building soil Nitrogen capital in Africa. Replenishing soil fertility in Africa. SSSA, special publication N° 51: 151-192
- Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. et Morel J.L., 2005.** Sols et environnement. Chapitre 11 : recyclage de déchets sur les sols, valeur agronomique et impacts environnementaux : 262-281
- Guivarche A., 2001.** Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'INPL. 275 p
- Grimaud L., 1996.** La valorisation des boues de station d'épuration en agriculture. Mém. DU. «Eau et Environnement», D.E.P., Univ. Picardie, Amiens, 44p.
- Hazelton P. et Murphy B., 2007.** Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO Publishing, 149 p.
- Houot S., 2009.** Les produits résiduels organiques : qualité, impact et devenir. Le Sol, dossier INRA, janvier 2009 : 106-113.
- Igoud S., 2001.** Valorisation des boues résiduelles issues des stations d'épuration urbaines par leur épandage dans les plantations forestières. Rev. Energ. Ren : Production et Valorisation-Biomasse, (2001) : 69-74.
- Impens R. et Avril C., 1992.** Code de bonnes pratiques pour l'utilisation en agriculture de fertilisants et amendements riches en cadmium. Note de synthèse. Unité d'enseignement et de recherche de biologie végétale. Faculté de sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 76 p.
- INRA Maroc, 1997.** **Aliments grossiers: fourrages verts (maïs fourrager). Fiche technique du maïs fourrager, 2 p.**

- IRDA, 2004.** Effets bénéfiques des boues mixtes appliquées fraîches ou sous forme de composts sur le potentiel de fertilité des sols en grandes cultures. Rapport de recherche, partenariat entre l'IRDA et les composts du Québec, 40 p.
- Juste C. et Solda P., 1977.** Effets d'application massive de boues de stations d'épuration urbaines en monoculture de maïs. Bulletin A.F.E.S (France), N° 3 : 147-157.
- Karoune S., 2008.** Effets des boues résiduelles sur le développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L.). Mémoire de magistère en écologie végétale de l'université « Mentouri » de Constantine. 175 p.
- Koller E., 2004.** Traitement des pollutions industrielles, eau, air, sols, boues. Ed. Dunod. 424 p.
- Korboulewsky N., Masson G., Bonin G., Massiani C. et Prone A., 2001.** Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du sud de la France. Revu. Etude et gestion des sols, vol., 8, 3, 2001:203-210.
- Kribaa M., Hallaire V., Curmi P. et Lahmar R., 2001.** Effects of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil, in a semi-arid climate. Soil Till. Res. 60: 43-53.
- Le Bissonnais Y., 2009.** Effets bénéfiques des composts de boues sur la stabilité du sol. Magazine de bout en bou(es) N° 14, décembre 2009.
- Lemercier B., 2002.** L'écosystème Sol. Revue, techniques culturales simplifiées N°20: 8-22.
- Le Tacon F., Bouchard D., Garbaye J., 1988.** Augmentation de la croissance initiale du frêne par épandage de boues de station d'épuration urbaine et plantation intercalaire d'Aulne blanc, revue forestière Française, xl (2) : 117-125.
- Mathieu C. et Pieltain F., 1998.** Analyse physique des sols : méthodes choisies. Edition, Technique & Documentation, 1998, 275 p.
- Mazen A., Faheed F. A. et Ahmed A. F., 2010.** Study of potential impacts of using sewage sludge in the amendment of desert reclaimed soil on wheat and jews mallow plants. Braz. Arch. Biol. Technol. V. 53 N°4 : 917-930. July/August 2010
- Mémento de l'agronome, 1993.** Agriculture générale, Agriculture spéciale. Collection techniques rurales en Afrique : 9-1015.
- Moleta R. et Consell F., 2003.** Méthanisation des déchets organiques. Etude bibliographique N°01-0408/1A, 104 p.
- Morel C., 2009.** Les boues véritables engrais phosphatés. Magazine de bout en bou(es) N° 14, décembre 2009
- Mosquera-Losada R., Moran-Zuloaga D. et Rigueiro-Rodriguez A., 2011.** Effects of lime and sewage sludge on soil, pasture production and tree growth in a six-year-old *Populus canadensis* Moench silvopastoral system. J. Plant Nutr. Soil Sci., 174: 145-153.
- N'Dayegamiye A., Huard S. et Thibault Y., 2001.** Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières (biosolides) dans des sols cultivés en maïs-grain, soya et orge. Agro-sol, vol. 12, N° 1 : 25-34.

- N'Dayegamiye A., Drapeau A., Huard S. et Thibault Y., 2004.** Intégration de boues mixtes et de fumier dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interaction avec les propriétés du sol. *Agro-sol*, vol. 15, N° 2 : 83-90.
- N'Dayegamiye A., 2007.** La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Présentation orale au colloque sur l'azote organisé par CRAAQ-OAQ, 2007.
- N'Dayegamiye A., et Drapeau A., 2009.** Influence de la nature des fertilisants apportés sur la dynamique de la structure et les teneurs en carbone et en substances humiques pour un loam argileux Sainte-Rosalie. *Agro-sol*. vol. 20, N° 1 : 16-22.
- N'Dayegamiye A., 2009.** Soil properties and crop yields in response to mixed paper mill sludge, dairy cattle manure and inorganic fertilizer application. *Agronomy Journal*.
- Nicourt C. et Barbier R., 2009.** Boues des villes et boues des champs. *Le Sol*, dossier INRA, janvier 2009 : 118-119.
- O.N.A., 2009.** Valorisation des produits issus de l'épuration des eaux. Rapport technique, 2 P.
- O.T.V., 1997.** Traiter et valoriser les boues. Collection OTV, N° 2, 457 p.
- Ouanouki B., Abdellaoui N. et Ait Abdallah N., 2009.** Application in agriculture of treated waste water and sludge from a treatment station. *Eur. J. of Sci. Research*. ISSN 1450-216 X Vol. 27 N° 4: 602-619.
- Palm C.A., Myers J.K. et Nandwa S.M., 1997.** Combined use of organic and inorganic nutrient sources, for soil fertility maintenance and replenishment. Replenishing soil fertility in Africa. SSSA, Special publication N°51: 193-217.
- Pascual I., Avilès M., Aguirreolea J. et Sanchez-Diaz, 2008.** Effect of sanitized and non-sanitized sewage sludge on soil microbial community, and the physiology of pepper plants. *Rev. plant soil* (2008) 310: 41-53.
- Pascual I., Azcona I., Morales F., Aguirreolea J. et Sanchez-Diaz, 2009.** Growth, yield and physiology of *Verticillium*-inoculated pepper plants treated with ATAD and composted sewage sludge. *Rev. plant soil* (2009) 319: 291-306.
- Pommel B., 1979.** La valorisation agricole des déchets. Publication : INRA, Bordeaux, France. 70 p.
- Prone A., Rodriguez M.L., Blanchon F., et De Sweemer C., 1999.** Suivi des modifications physiques et chimiques des sols de vignobles à textures différentes après apport de compost urbain. *Courr. Sci. Parc. Nat. Luberon*, 3 : 59-72.
- Ramdani N., 2010.** Valorisation des boues urbaines de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Sidi Belabbes (Ouest Algérien). Effet sur un sol sableux. Recueil d'un séminaire sur les enjeux de la qualité dans le secteur de l'eau et de l'assainissement en Algérie, apport des techniques nucléaires. EQSEAATN, Tipasa, les 11-12 mai 2010.
- Riguero-Rodriguez A., Mosquera-Losada M.R. et Gatica –Trabanini E., 2000.** Pasture production and tree growth in a young pine plantation fertilized with inorganic fertilizers and milk sewage in northwestern Spain. *Agroforestry systems* 48 : 245-256.
- Robert M. et Cheverry C., 2009.** Le sol : une contrainte pour la sécurité alimentaire mondiale. *Le Sol*, dossier INRA, janvier 2009 : 122-125.

- Roula S., 2005.** Caractérisation physico-chimique et valorisation des boues urbaines pour la confection de substrats de culture en pépinière hors-sol. Mémoire de magistère en sciences agronomiques de l'université «Colonel El hadj Lakhdar» de Batna. 99 p.
- Rowell D.L., 1994.** Soil Sciences. Methods and applications. Longman.
- Sahlström L., Aspan A., Bagge E., Tham M.L.D. et Albihn A., 2004.** Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. Water Research, 38: 1989-1994.
- Scheiner J.D., 2005.** Spéciation du carbone, de l'azote et du phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol. Thèse de doctorat en agronomie de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 218 p.
- Simard R.R., 2001.** Combined primary/secondary peppermill sludge as a nitrogen source in a cabbage-sweet corn cropping sequence. Can. J. Soil Sci.81: 1-10.
- Tamrabet L., Bouzerzour H., Kribaa M et Makhlouf M., 2009.** The effect of sewage sludge application on durum wheat (*Triticum durum*). Int. J. Agric. Bio., 11: 741-745.
- Terce M., 2001.** Les impacts du recyclage des boues de station d'épuration. INRA-ME&S-75338 Paris.
- Tessier D., 2009.** Les sols de France sont-ils fatigués ou appauvris. Le Sol, dossier INRA, janvier 2009 : 126-127.
- Togay N., Togay Y et Dogan Y., 2008.** Effects of municipal sewage sludge doses on the yield, some yield components and heavy metal concentration of dry bean (*phaseolus vulgaris L*). African J. of Biotech. Vol. 7 (17): 3026-3030.
- U. S. Salinity Laboratory. Staff. (1954).** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils , U.S.D.A. Hand book n°60 ; 160p.
- Wu D., Liu P., Luo Y., Tian G. et Mahmood Q., 2010.** Nitrogen transformation during co-composting of herbal residues, spent mushrooms, and sludge. J. zhejiang, Univ. Sci. B (Biomed&Biotechnol) 201 11(7): 497-505.
- Zebarth B.J., Neilsen G.H, Hogue E., et Neilsen D., 1999.** Influence of organic waste amendments on selected soil physical and chemical properties. Can. J. Soil Sci, 79: 501-504. .
- Zebarth B.J., Mcdougall R., Neilsen G.H, et Neilsen D.et al 2000.** Availability of nitrogen from municipal sewage sludge for dryland forage grass. Can. J. plant Sci. 80: 575-582.
- Zerrouk F., 1992.** Valorisation agricole de boues de stations d'épuration : incidences sur quelques propriétés physiques d'un sol cultivé. Mém. ing. D'Etat en agronomie, spécialité en pédologie, de l'ENSA d'El Harrach, 62 p.

ANNEXES

Doses	Profondeurs	Teneurs en azote minéral (N ppm)				
		T1	T2	T3	T4	T5
D0	P1	5,30	4,70	6,30	9,10	1,60
	P2	4,20	2,70	7,90	7,90	1,60
D1	P1	50,60	54,60	31,50	49,35	24,23
	P2	20,00	28,90	18,50	42,00	9,14
D2	P1	115,50	137,60	42,00	104,50	38,60
	P2	36,70	53,50	38,90	97,9	15,15
D3	P1	122,90	132,30	46,20	109,20	48,30
	P2	62,50	124,10	39,40	107,10	17,06

Tableau I. Teneurs moyennes temporelles en azote minéral dans les deux profondeurs du sol amendé en différentes doses de boues résiduaires

Doses	profondeurs	Teneurs en azote total (%)				
		T1	T2	T3	T4	T5
D0	P1	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13
	P2	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11
D1	P1	0,11	0,12	0,14	0,42	0,14
	P2	0,09	0,09	0,11	0,26	0,13
D2	P1	0,12	0,15	0,19	0,93	0,16
	P2	0,09	0,12	0,12	0,54	0,14
D3	P1	0,12	0,17	0,21	0,96	0,15
	P2	0,11	0,14	0,12	0,75	0,14

Tableau II. Teneurs moyennes temporelles en azote total dans les deux profondeurs du sol amendé en différentes doses de boues résiduaires

Doses	profondeurs	Teneurs en carbone organique (%)				
		T1	T2	T3	T4	T5
D0	P1	0,70	0,60	0,60	0,86	0,89
	P2	0,47	0,43	0,60	0,58	0,54
D1	P1	0,65	0,66	0,89	1,04	1,22
	P2	0,52	0,60	0,74	0,69	1,13
D2	P1	0,74	0,90	1,17	1,06	1,38
	P2	0,59	0,64	0,81	0,84	1,24
D3	P1	0,61	1,02	1,60	1,21	1,41
	P2	0,56	0,68	0,99	0,94	1,15

Tableau III. Teneurs moyennes temporelles en carbone organique dans les deux profondeurs du sol amendé en différentes doses de boues résiduaires

Doses	profondeurs	Teneurs en azote minéral (mg/kg)				
		T1	T2	T3	T4	T5
D0	P1	6,89	5,21	5,16	7,39	6,83
	P2	6,03	4,05	5,72	5,16	4,69
D1	P1	6,03	5,84	6,14	4,07	8,69
	P2	5,72	6,98	6,88	2,65	8,51
D2	P1	6,24	5,37	6,39	1,13	8,76
	P2	6,26	5,33	6,80	1,77	9,03
D3	P1	5,04	6,76	8,76	1,30	9,40
	P2	5,21	5,31	8,24	1,34	8,40

Tableau IV. Variation temporelle du rapport C/N dans les deux profondeurs du sol en différentes doses de boues

Doses	Densité apparente (g/cm ³)		
	T1'	T2'	T3'
D0	1,28	1,28	1,28
D1	1,27	1,27	1,27
D2	1,27	1,25	1,24
D3	1,27	1,24	1,24

Tableau V. Valeurs moyennes de la densité apparente du sol en fonction des doses de boues et en fonction du temps après épandage

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	43,77	14,59	1,11	
Doses	3	88,95	29,65	2,26	0,112
Temps	1	273,92	273,92	20,84	<,001
Doses x Temps	3	55,28	18,43	1,40	0,270
Erreur	21	275,96	13,14		
Total	31	737,88			

Tableau VI. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=1$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	28,475	9,492	2,40	
Doses	3	19,261	6,420	1,62	0,215
Temps	1	3,512	3,512	0,89	0,357
Doses x Temps	3	8,655	2,885	0,73	0,546
Erreur	21	83,156	3,960		
Total	31	143,059			

Tableau VII. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=1,6$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	47,803	15,934	5,72	
Doses	3	30,550	10,183	3,66	0,029
Temps	1	27,186	27,186	9,76	0,005
Doses x Temps	3	1,159	0,386	0,14	0,936
Erreur	21	58,484	2,785		
Total	31	165,182			

Tableau VIII. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=1,9$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	72,486	24,162	9,50	
Doses	3	17,529	5,843	2,30	0,107
Temps	1	7,106	7,106	2,79	0,110
Doses x Temps	3	4,213	1,404	0,55	0,652
Erreur	21	53,424	2,544		
Total	31	154,757			

Tableau IX. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=2,5$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	78,684	26,228	6,68	
Doses	3	18,291	6,097	1,55	0,230
Temps	1	1,065	1,065	0,27	0,608
Doses x Temps	3	10,302	3,434	0,87	0,470
Erreur	21	82,460	3,927		
Total	31	190,802			

Tableau X. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=3,5$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	63,376	21,125	6,76	
Doses	3	11,867	3,956	1,26	0,312
Temps	1	4,920	4,920	1,57	0,224
Doses x Temps	3	12,759	4,253	1,36	0,282
Erreur	21	65,671	3,127		
Total	31	158,593			

Tableau XI. Analyse de la variance de la teneur du sol en eau à $pF=4,2$ en fonctions des doses de boues, du temps, et de leurs interactions

Tableau XII. Hauteurs moyennes des plants (mètre) du maïs à différents stades végétatifs en fonction des doses de boues durant les deux années d'expérimentation

	Stade 10 feuilles (m)		Stade Floraison(m)		Stade Maturité(m)	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
D0	1,10	1,25	2,18	2,38	2,18	2,42
D1	1,28	1,22	2,33	2,25	2,36	2,37
D2	1,33	1,30	2,35	2,42	2,30	2,38
D3	1,38	1,27	2,40	2,43	2,42	2,49

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	0,30758	0,10253	2,71	
Doses	3	0,11438	0,03813	1,01	0,409
Année	1	0,00053	0,00053	0,01	0,907
Doses x Année	3	0,07076	0,02359	0,62	0,608
Erreur	21	0,79494	0,03785		
Total	31	1,28820			

Tableau XIII. Analyse de la variance des différentes hauteurs des plants du maïs au stade 10 feuilles

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	0,04530	0,01510	0,37	
Doses	3	0,11388	0,03796	0,93	0,446
Année	1	0,02420	0,02420	0,59	0,451
Doses x Année	3	0,08088	0,02696	0,66	0,588
Erreur	21	0,86155	0,04103		
Total	31	1,12580			

Tableau XIV. Analyse de la variance des différentes hauteurs des plants du maïs au stade floraison

Sources de variations	DDL	SCE	CM	F observé	P
Blocs	3	0,03288	0,01096	0,32	
Doses	3	0,10413	0,03471	1,01	0,408
Année	1	0,08100	0,8100	2,36	0,140
Doses x Année	3	0,05883	0,01961	0,57	0,640
Erreur	21	0,72159	0,03436		
Total	31	0,99845			

Tableau XV. Analyse de la variance des différentes hauteurs des plants du maïs au stade maturité

	Rendements en MST (q/ha)		Rendements en grains (q/ha)		Teneurs des graines en azote (%)	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
D0	100,8	105,2	60,7	55,1	0,87	0,63
D1	131,3	116,6	104,5	85,3	1,00	0,84
D2	133,9	119,4	107,0	91,3	1,03	0,90
D3	138,5	111,4	110,9	99,5	1,16	0,97

Tableau XVI. Effets des différentes doses de boues sur les rendements en MST (q/ha), les rendements en grains (q/ha) et la teneur en azote des graines du maïs durant les deux années expérimentales