

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques de l'Environnement
Filière : Science de l'environnement
Option : Environnement et santé publique



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

Impact des boues activées sur les propriétés physico-chimiques des sols des régions semi-arides.

Présenté par :

MOUASSAN Mounia & SAIDI Namir

Soutenu le : **15 Juin 2015**

Devant le jury composé de :

M. MOALI Aissa
M. RAMDANI Nacer
M. SIDI Hachemi

Professeur	Président
MAA	Encadreur
MCA	Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier notre promoteur M^r RAMDANI N. pour avoir accepté de nous encadrer, pour la confiance qu'il nous a fait, pour les conseils qu'il nous a accordés tout au long de la réalisation de ce modeste travail. Qu'il trouve ici nos sentiments de gratitude et l'expression de notre vive reconnaissance.

Nos remerciements vont aussi au Professeur MOALI A. d'avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nous remercions également M^r SIDI H. d'avoir accepté de juger ce travail.

Nos Vifs remerciement pour M^r BELHADI D. et M^r ADJAUD A. pour leurs aides et leurs précieux conseils.

Sans oublier les membres du laboratoire de Biologie des Sols : M^{me} RAMDANI et M^{me} ZIANE pour leur disponibilité, leur sympathie et leur gentillesse, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué a notre formation, qu'ils retrouvent à travers ce mémoire le fruit de leurs longues années de travail.

Nos sentiments de reconnaissances et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Mounia et Namir

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes très chers parents

Puisse ce modeste travail constituée une léger compensation pour tous les nobles sacrifices pour assurer mon bien être et mon éducation, vous m'avez toujours encouragé et soutenu, merci pour votre confiance et votre amour.

A mon frère

Hichem avec qui j'ai passé des bonne moments de mon existence, que j'adore.

Ma grande famille.

Mes amis et tous ceux qui me sont chers.

Je ne citerai pas de nom pour qu'il n'y a pas de jaloux et de n'oublier personne.

Mounia.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études et que je remercie chaleureusement ;

A mes sœurs Nesrine et Monia ;

A mon frère Mohand ;

A Celia qui a toujours été à mes côtés pour m'apporter son aide et ces encouragements ;

A Jugurta « Dodo » pour ces précieux conseil et son aide ;

A Rachid, Elyane et Zackary

A mes collègues et amis plus particulièrement Fahem, Hassna, Souhila pour les moments sympathiques qu'on a partagés ;

A Mokrane, Sarah, Ouafa, Lamine M, Noria, Lydia, Kahina, Fatiha et Yasmine, pour les bons et les mauvais moments qu'on a du passé et enduré ensemble.

Namir

Liste des Abréviations

A : argiles.

ADEME : Agence de l'environnement et la Maîtrise de l'Energie, France.

AMORCE : association nationale des collectivités, des associations et des entreprises pour la gestion des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur France.

BBA : Bordj-Bou-Arreridj.

CAH : le Complexe Argilo-Humique.

CEE : Communauté économique européenne.

CSRE : Conseil Scientifique Régional de l'Environnement.

EDTA : acide éthylène diamine tétra-acétique.

ETO : éléments traces organiques.

ETM : éléments traces métalliques.

INRA : Institut National de Recherche.

LANO : Laboratoire Agronomique De Normandie.

Lf : Limons fins.

Lg : Limons grossier.

Meq : Milliéquivalent.

MH : Matières humiques.

MVF : matière végétal fraîche.

ONA : Office national d'assainissement.

ppm : partie par million.

PVC : Polychlorure de vinyle.

rpm : rotation par minute.

Sf : sables fins.

Sg : Sables grossiers.

STEP : Station d'épuration des eaux usées.

USDA : United States Department of Agriculture.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Composition des boues.....	11
Tableau II : valeurs agronomiques indicatives de différents types de boues	12
Tableau III : Données géographiques et climatiques des régions (Bulletin agro-météorologique)	14
Tableau IV : Résultats des analyses physico-chimiques des sols étudiés.....	24
Tableau V : Classes de salinité des sols	25
Tableau VI : Interprétation des valeurs de la CEC donnée par LANO.....	27
Tableau VII : Résultats des analyses granulométrie des sols étudiés.....	28
Tableau VIII : Résultats des analyses physico- chimiques et granulométrique des boues	29

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration.	10
Figure 02 : Sites d'échantillonnages des sols.....	13
Figure 03 : Les boues utilisées	15
Figure 04 : Graines de <i>Pisum sativum</i> L. utilisées	15
Figure 05 : Photo de <i>Pisum sativum</i> L.(A : plante) et (B : gousses)	16
Figure 06 : Photo de mise en germination des graines de <i>Pisum sativum</i> L. (A : Avant germination) (B : Après germination).....	21
Figure 07 : Dispositif expérimental de l'essai.....	21
Figure 08 : Cinétique de minéralisation du carbone du sol témoin et du mélange sol + boue	31
Figure 09 : Minéralisation de l'azote du sol témoin et du mélange sol + boue.....	32
Figure 10 : Evolution du rapport C/N du sol témoin et du mélange sol + boue.....	33
Figure 11 : Evolution du rapport pH_{eau}	34
Figure 12 : Evolution du pH_{KCL}	35
Figure 13 : Effet des boues sur la hauteur des plantes	36
Figure 14 : Effet des boues sur la matière sèche des plantes	37
Figure 15 : Effet des boues sur les teneurs en proline dans les plantes	37
Figure 16 : Effet des boues sur les teneurs en Chlorophylles A et B dans les plantes	38
Figure 17 : Contenu azoté des plantes	39

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux et figures	
Introduction	1

CHAPITRE I : Synthèse bibliographiques

I- Matière organique et fertilisation	3
1. Matière organique	3
1.1. Définition	3
1.2. Sources de la matière organique.....	3
1.3. Rôles de la matière organique du sol (MOS)	4
1.3.1. Rôle physique	4
1.3.2. Rôle chimique et nutritionnel	4
1.3.3. Rôle énergétique et biochimique.....	5
2. La fertilisation	5
2.1. Les amendements	5
2.2. Les engrais	6
2.3. La fertilité des sols	7
2.3.1. Fertilité physique.....	7
2.3.2. Fertilité chimique	7
2.3.3. Fertilité biologique	8
2.3.4. Interactions entre la fertilité physique, chimique et biologique	8
II. Généralités sur les boues	9
1. Origine des boues	9
2. Types de boues	9
3. Composition des boues résiduaires	10
4. Traitement des boues et leur devenir	11
4.1. Traitement des boues.....	11
4.2. Valorisation des boues	12
5. Production des boues en Algérie	12

CHAPITRE II : Matériels et méthodes

I. Matériels	13
1. Sites d'échantillonnage des sols	13
2. Les boues.....	14
3. Le matériel végétal	15
3.1. Aspects botaniques de <i>Pisum sativum</i> L.	15
II. Méthodes	16
1. Analyses physico-chimiques des sols	16
1.1. Les analyses physiques.....	17
1.1.1. Humidité	17
1.1.2. La granulométrie	17
1.1.3. pH.....	17
1.1.4. Conductivité électrique (CE).....	17
1.2. Les analyses chimiques	18
1.2.1. Dosage du calcaire total CaCO ₃	18
1.2.2. Dosage du calcaire actif	18
1.2.3. Dosage de l'azote total	18

1.2.4. Dosage du carbone organique	18
1.2.5. Dosage du phosphore assimilable	18
1.2.6. Capacité d'échange cationique (C.E.C)	19
1.2.7. Dosage des bases échangeables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+	19
2. Analyses physico-chimiques des boues	19
3. Etude de l'effet des boues sur les propriétés chimiques des sols et sur le développement du Pois	20
3.1. Conduite de l'essai	20
3.2. Dispositif expérimental	20
3.3. Germination des graines	20
3.4. Repiquage des plantules	21
3.5. Variables mesurées	22
3.5.1. Paramètres physico-chimiques du sol	22
3.5.2. Paramètres morpho-physiologiques de la plante	22
• Hauteur des plantes	22
• Matière sèche des plantes	22
• Dosage de l'azote des plantes	22
• Dosage des pigments chlorophylliens	22
• Dosage de la proline des plantes	23

CHAPITRE III : Résultats et discussions

I. Caractérisation physico-chimique des sols	24
1. pH	24
2. la conductivité	25
3. Le calcaire	25
4. L'azote	26
5. Le carbone et MO	26
6. Rapport C/N	26
7. Le phosphore assimilable	26
8. La capacité d'échange cationique	27
9. Texture des sols	28
II. Caractères physico-chimiques des boues	29
III. Effet des boues sur les caractéristiques physico-chimiques des sols et sur les paramètres morpho-physiologiques de la plante	31
1. Effets des boues sur les paramètres physico-chimiques du sol	31
1.1. Le carbone	31
1.2. L'azote	32
1.3. Le rapport C/N	32
1.4. Le pH	34
2. Effets des boues sur les paramètres morpho-physiologiques de la plante	35
2.1. La hauteur des plantes	36
2.2. La Matière sèche des plantes	37
2.3. La proline	37
2.4. La chlorophylle totale	38
2.5. Le contenu azoté des plantes	39
CONCLUSION	40
Références Bibliographiques	42
Annexes

Introduction

INTRODUCTION

Les problèmes majeurs de l'agriculture des Pays Sud de la Méditerranée (PSM) sont l'épuisement continu des sols et la dégradation intense de la couverture végétale. On assiste à une régression, voire la disparition des jachères et la raréfaction des pâturage (Bosma et *al.*, 1994; Dembélé, 1994), alors qu'une demande alimentaire s'est accrue du fait de la croissance démographique. Cette situation s'expliquerait par la dégradation des ressources naturelles qui résulte de la combinaison des facteurs climatiques, pédologiques et anthropiques.

L'Algérie compte plus de 2 millions de km² de zones arides, ce qui représente environ les 4/5 de la superficie totale du pays (Boutebila, 1973 cité par Cheloufi H et *al.*, 2012). Les sols y sont squelettiques et pauvres en éléments nutritifs indispensables à la vie des plantes, c'est à dire que leur fertilité naturelle est moindre, ce qui limite la mise en culture des terres.

Par ailleurs, le développement économique et social et la croissance démographique ont, en effet, engendré une demande en eau sans cesse croissante face à une offre qui a évolué dans des proportions nettement moindres et qui a de surcroît été réduite par les effets des pollutions qui fragilisent et détruisent notre environnement vital. L'inquiétude est née de la forte augmentation de ces polluants devenu dangereux pour notre environnement. Cette situation alarmante a heureusement suscité une prise de conscience universelle pour la protection et la sauvegarde de notre environnement (Meridja, 2008).

L'épuration des eaux de rejet dans les stations d'épuration avant leur déversement dans la nature constitue un moyen efficace pour la lutte contre la pollution. Les divers procédés d'épuration des eaux usées actuels entraînent une production de quantités non négligeables de boues résiduelles. La matière solide de ces résidus contient à la fois des éléments naturels valorisables et des composés toxiques. Ces derniers constituent une nouvelle menace pour l'environnement de part leur forte concentration en charge polluante, d'où il faut trouver les moyens de les éliminer. La gestion, la valorisation et l'élimination de ces boues sont devenues une nécessité primordiale pour la protection de l'environnement et elles constituent en général un problème préoccupant pour le gestionnaire du secteur de l'assainissement des stations d'épuration. Ces opérations sont complexes et coûteuses pour la collectivité (Oueslati et *al.*, 1995).

En Europe, la mise en décharge de ces boues est interdite, ainsi que le rejet en mer. Les deux voies majeures de valorisation sont la valorisation agricole et la valorisation énergétique, via l'incinération (Bennamoun et Leonard, 2011).

L'agriculture peut être une réponse à ce défi environnemental à travers la valorisation des produits organiques résiduaux issus du traitement de ces déchets. La voie de recyclage privilégiée est l'épandage agricole en raison des effets positifs des boues sur les propriétés physico-chimiques des sols (structure, stabilité) (Sastre et *al.*, 1996; Navas et *al.*, 1998, Annabi et *al.*, 2005). La valorisation biologique ou agricole constitue l'une des technologies vertes permettant de transformer les boues en produits à haute valeur ajoutée en minimisant les risques de pollution (Prevot, 2000 ; ADEME, 2001 ; Aubain et *al.*, 2002, in Amir, 2005). Rigoureusement contrôlées, de bonne valeur agronomique, les boues sont riches en carbone organique et en éléments fertilisants (N, P, K) indispensables aux cultures, ce qui leur confère un intérêt agronomique et explique leur utilisation en agriculture. De plus, ce sont des amendements peu chers pour les agriculteurs.

Le recyclage ou valorisation agricole des boues après compostage contribue à la correction des carences minérales et à la régénération de la fertilité des sols appauvris, ceci à travers la réintégration des éléments minéraux dans les sols, ce qui permet de se rapprocher des cycles naturels (de Bertoldi et *al.*, 1983). Des études ont montré que l'épandage de ces boues dans des parcelles agricoles ont permis d'augmenter significativement les rendements des cultures et d'améliorer la fertilité des sols (Salaheddine, 2005 ; Scheiner, 2005 ; Madrieres et Mohen, 2012). Néanmoins, leur utilisation ne doit pas se faire sans s'être assuré de leur hygiénisation, de leur stabilisation et de leur maturité. Les boues doivent être exemptes de phytotoxicité, avec des teneurs en métaux lourds et en micro-polluants organiques inférieures aux normes internationales en vigueur.

Notre travail s'inscrit dans l'un des axes de la politique environnementale de l'ONA (Ladjel et Abbou, 2014) qui vise à promouvoir la valorisation agricole des boues issues des stations d'épuration des eaux usées (STEP), et aussi dans l'optique de la protection de l'environnement et du développement durable.

Cette étude a pour objectif essentiel de tester, d'une part, la possibilité de recyclage et de valorisation agricole des boues résiduaux urbaines et, d'autre part, de déterminer l'efficacité et l'intérêt de ces boues vis-à-vis de certaines propriétés des sols des régions semi-arides de l'Est d'Algérie connus pour leur pauvreté en matière organique. Enfin de montrer par des essais en pots leur valeur agronomique sur une culture d'une légumineuse : pois (*Pisum Sativum* L.).

Synthèse
Bibliographique

I- Matière organique et fertilisation

1. Matière organique

1.1. Définition

Selon Duchaufour (1977, 1983), la matière organique du sol (MOS), désigne l'ensemble de substances et composés carbonés provenant de débris végétaux de toute nature et des cadavres d'animaux vivants dans le sol. La nature de la matière organique du sol est très complexe et hétérogène : principalement des composés humiques, des racines, des micro-organismes, des lombricidés. L'ensemble de matière organique comporte donc des produits frais ou peu évolués (peu transformés) : ce sont les matières organiques fraîches (MOF), et des produits évolués : ce sont les matières humiques (MH). L'ensemble (MOF et MH) constitue l'humus au sens large.

Selon Beauchamp (2003), les matières organiques du sol se répartissent en 4 groupes :

- les matières organiques vivantes, végétales et animales, qui englobent la totalité de la biomasse en activité,
- les débris d'origine végétale (résidus de végétaux ou exsudats) et animale (déjections, cadavres) regroupés sous le nom de « matières organiques fraîches »,
- des composés organiques intermédiaires, appelés matières organiques transitoires, provenant de l'évolution des matières organiques fraîches, (ex : Acide fulvique, ...)
- des composés organiques stabilisés, les matières humiques, provenant de l'évolution des matières précédentes : les matières organiques stables (ex : l'humine ; Acide humique ...).

1.2. Sources de la matière organique

Les débris végétaux constitués des feuilles, rameaux, brindilles, inflorescences, fruits et racines, qui, dans une végétation permanente, tombent sur le sol constitue la source essentielle de tous les composés organiques qu'ils soit simples ou complexes, isolés ou associés entre eux, mais aussi elle peut être sous la forme d'exsudats foliaires et radicaires. Une liste des principales sources de la matière organique dans les sols forestiers ont été établie par Loision et Niogret cités par Meridja Ouafa, 2008 :

- Débris végétaux.
- Bio faune du sol.
- Microflore du sol.
- Exsudats racinaires.

- Pluviólessivats qui correspondent à des apports de matières solubles ou de résidus variés de très petite taille (lessivage de la phyllosphère par les eaux de pluies).

La matière organique se transforme en permanence sous l'action de l'activité biologique (minéralisation), passant de l'état de matière organique fraîche (restes de récolte, pailles, fumier) à l'état d'éléments minéraux assimilables par les plantes.

1.3. Rôles de la matière organique du sol (MOS)

La matière organique joue de multiples rôles dans le fonctionnement global du sol, au travers de ses composantes physiques, chimiques et biologiques, qui définissent la notion de fertilité du sol mais aussi participe au maintien de l'ensemble de l'écosystème qu'il constitue (résilience, résistance à l'érosion, filtre et tampon pour polluants,...).

1.3.1. Rôle physique

- La matière organique contribue au renforcement de l'agrégation et de la cohésion des particules : l'incorporation des matières organiques permet d'améliorer la structure et la stabilité du sol. La biomasse, en dégradant la matière organique, s'accompagne du développement d'hyphes mycéliens et de la production de substances collantes qui vont favoriser la formation d'agrégats stables. Ces agrégats permettent de structurer les sols trop « légers » en cimentant les particules entre elles (meilleure résistance à l'érosion). Inversement dans le cas de sols « lourds », les matières organiques surtout fraîches (MOF) permettent de les aérer en augmentant la porosité (Vilain, 1989).
- L'association de l'humus et de l'argile forme le complexe argilo-humique (CAH) qui permet de retenir, grâce à leurs charges surfaciques, certains éléments nutritifs. Cette liaison intime entre matière organique et argiles contribue également à la formation d'agrégats stables et donc de macroporosité, synonymes d'une structure favorable au bon enracinement et fonctionnement racinaire des plantes, ainsi qu'à la bonne infiltration et au drainage de l'eau. (Huber et Schaub, 2011)
- La matière organique a une très forte capacité de rétention d'eau et permet donc d'augmenter la réserve utile (RU) du sol. Cette amélioration est particulièrement intéressante dans les sols sableux et filtrants (Vilain, 1989).

1.3.2. Rôle chimique et nutritionnel

La matière organique retient à sa surface des cations et anions adsorbés (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} oligoéléments) et augmente la capacité d'échange cationique du sol. Ainsi, la teneur en

matière organique du sol a une forte influence sur la capacité de ce sol à retenir et restituer les éléments nutritifs (N, S et P organique), en les protégeant de la lixiviation. Ces éléments nutritifs peuvent être libérés progressivement et rendus disponibles pour l'absorption par les plantes ou d'autres organismes du sol. (Vilain, 1989).

1.3.3. Rôle énergétique et biochimique

La MOS constitue une source d'énergie pour la vie du sol. C'est le substrat de base pour les micro-organismes saprophytes (composés de bactéries, d'archées et de champignons) et de nombreux organismes de la faune du sol, se nourrissent en métabolisant les composés organiques des litières et du sol. Ces organismes saprophages contribuent à l'évolution de la matière organique (minéralisation et humification) et servent de substrat pour divers organismes prédateurs et omnivores. (Huber et Schaub, 2011)

2. La fertilisation

La fertilisation est le processus consistant à apporter à un milieu de culture, tel que le sol, les éléments minéraux nécessaires au développement de la plante. Ces éléments peuvent être de deux types : les amendements et les engrais. Le plus souvent, on parle d'amendement lorsqu'un effort de fertilisation est destiné au sol et on parle d'engrais lorsque l'effort de fertilisation est destiné aux plantes (Pontailler, 1971).

La fertilisation a pour principal objectif l'entretien de la fertilité du sol pour satisfaire les besoins des cultures. Elle englobe un ensemble de techniques agricoles permettant la mise en œuvre des matières fertilisantes. Ces opérations ont pour but de conserver ou améliorer la productivité d'une terre. (Pontailler, 1971).

2.1. Les amendements

Les amendements sont destinés à préserver ou à améliorer la structure des sols, à réguler le pH et à favoriser une activité biologique propice à la croissance des plantes. Il y a deux sortes d'amendements : les amendements minéraux, qui apportent du calcium et/ou du magnésium et les amendements organiques qui enrichissent le sol en matière organique et dont certains fournissent aussi un grand nombre d'éléments minéraux. (Asdrubal, 2006)

Il s'agit des apports que l'on fait dans le sol, avec pour objectif d'agir sur le milieu physique, c'est-à-dire sur le sol lui-même. C'est aussi la fertilisation, mais ce terme

concerne plus le milieu chimique. Elle concerne la recherche d'un résultat plus immédiat au niveau des plantes (Catherine, 2001).

Il y a plusieurs types d'amendements, et selon Pontailler (1971) les principaux efforts de fertilisation sont :

- Amendements calcaires et magnésiens (minéral) :

Ils favorisent l'activité des bactéries du sol en régularisant l'état ionique de la solution du sol et en consolidant les complexe argilo-humique (Khelil, 1999).

- Amendements humifères (organique) :

Selon Khelil (1999), ils sont une source essentielle d'humus et surtout conditionnent favorablement l'activité des bactéries ou des champignons (source de carbone).

D'après Asdrubal (2006), ils enrichissent le sol en matière organique en améliorant sa structure et ils apportent des éléments nutritifs aux cultures. Les principaux amendements organiques sont les effluents d'élevage et les résidus de récolte provenant de l'exploitation agricole. D'autres, comme les déchets urbains ou certains sous-produits industriels, sont d'origine externe.

2.2. Les engrais

Les engrais sont des substances organiques ou minérales, souvent utilisées en mélanges, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, de façon à améliorer leur croissance, et à augmenter le rendement et la qualité des cultures sur la plupart des variétés de plantes. Les engrais font partie, avec les amendements, des produits fertilisants. Ils permettent d'apporter en quantité voulue, un ou plusieurs éléments fertilisants comme l'azote, le phosphore, la potasse, le calcium, le magnésium ainsi que des oligo-éléments. L'action consistant à apporter un engrais s'appelle la fertilisation. (Asdrubal , 2006).

Il y a plusieurs types d'engrais, dont :

- les engrais organiques qui proviennent de diverses matières premières d'origine animale ou végétale, que l'on dessèche ou que l'on broie. Ils ne sont pas solubles dans l'eau mais la majeure partie des éléments qu'ils contiennent est rapidement minéralisable et disponible pour la plante. Ils n'enrichissent pas le sol en humus mais

ils stimulent l'activité des êtres vivants du sol auxquels ils servent de nourriture. (Asdrubal, 2006)

- les engrais minéraux, proviennent du broyage d'éléments naturels et apportent des éléments dont la plante a besoin. Ils sont classés selon le nombre de leurs éléments fertilisants majeurs (N, P, K) (Asdrubal, 2006).

Selon Henri (1965), la différence entre les engrais et les amendements, est que le rôle des engrais est d'apporter les éléments nutritifs au végétal, alors que le rôle des amendements est de modifier la structure et l'acidité du sol, permettant ainsi aux plantes de profiter au maximum des engrais. La distinction entre engrais et amendement n'est pas toujours très nette car certains amendements contiennent d'importantes quantités d'éléments nutritifs (Asdrubal, 2006).

2.3. La fertilité des sols

Soltner (1986) définit la fertilité d'un sol comme étant la résultante de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Ces propriétés résultent elles-mêmes des interactions entre les milieux humains, naturels et techniques. Cependant, le concept de fertilité des sols a évolué au cours des dernières décennies et la plus communément reconnue actuellement est celle de Häberli et *al.* (1991), cités par Cousin et *al.*, (2012) qui définit un sol fertile lorsque celui-ci :

- *présente une faune et une flore variées et biologiquement actives, une structure typique, une capacité de dégradation intacte,*
- *permet une croissance normale des végétaux sans nuire à leurs propriétés,*
- *garantit une bonne qualité des produits.*

La fertilité est donc une combinaison d'éléments physiques et (bio) chimiques qui permettent la croissance harmonieuse de la culture (Cousin et *al.*, 2012).

2.3.1. Fertilité physique

La fertilité physique d'un sol correspond au potentiel de production lié à l'ensemble de ses propriétés physiques (aération, cohésion, humidité, etc.). Elle dépend de sa topographie, de sa structure et de sa texture.

2.3.2. Fertilité chimique

Les éléments majeurs dont les plantes ont besoin pour leur croissance sont : l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre. Les oligoéléments ou éléments traces reconnus

indispensables au développement des végétaux sont : le bore, le fer, le cuivre, le zinc, le molybdène, le manganèse et le chlore. Le calcium, souvent présent en quantité suffisante dans un sol riche, est également indispensable. L'importance de ces éléments minéraux et de leur passage sous forme assimilable détermine la capacité d'un sol à se maintenir chimiquement fertile ou au contraire à s'épuiser rapidement.

2.3.3. Fertilité biologique

La fertilité biologique d'un sol résulte surtout de l'activité biologique des micro-organismes, des vers de terre (lombrics), des termites et des racines des plantes. Les termites et les lombrics, contribuent à la fertilité des sols en dégradant les végétaux et en ameublissant les sols. Les micro-organismes se nourrissent de la matière organique du sol. Ce faisant, ils libèrent des éléments minéraux (nitrate, phosphate...) absorbables par les plantes et participent à la synthèse des acides humiques. Sans microorganismes telluriques, il n'y aurait ni décomposition organique, ni assimilation optimale par les racines, ni restauration naturelle des fonctions disparues sous l'action d'une pollution et d'une contamination (CSRE, 2003).

2.3.4. Interactions entre la fertilité physique, chimique et biologique

Un sol ne peut offrir les conditions favorables aux productions végétales que lorsque ses propriétés physiques, chimiques et biologiques sont optimales. En effet, en fonction de sa structure et de sa texture, le sol peut être plus ou moins riche. La porosité structurale et texturale jouent un rôle important dans la circulation de l'air, de l'eau et de la vie biologique dans le sol. Par la minéralisation de la matière organique, les organismes vivants dans le sol créent les conditions favorables au développement des végétaux. La macro faune augmente la porosité du sol par le creusage des galeries. L'azote fixé par les bactéries symbiotiques des légumineuses peut contribuer entre 20 et 70% dans la constitution d'un plant. Ces exemples d'interaction de la fertilité physique, chimique et biologique du sol montrent que le sol est un système complexe d'où la nécessité d'aborder son étude par une approche globale (Delville, 1996).

La réussite d'une culture résulte de facteurs de production parmi lesquels, on distingue :

- Facteurs fonciers : sont le sol et le climat ;

- Facteurs techniques : sont l'irrigation, les amendements, les techniques de culture et les engrais (Catherine, 2001).

II. Généralités sur les boues

D'après ADEME (2001), les boues sont définies comme étant un mélange d'eau et de matières solides, séparées par des procédés naturels ou artificiels de divers types d'eau qui le contiennent. Elles résultent du traitement des eaux usées dans des stations d'épuration urbaines ; des fosses septiques domestiques, commerciales ou urbaines ; des stations d'épuration industrielles ; des usines de filtration ou de traitement de l'eau potable.

Les eaux usées sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration où elles sont traitées. En fin de traitement, à la sortie de la station, l'eau épurée est rejetée vers le milieu naturel et il reste des sous-produits désignés sous le terme de boues résiduelles (Werther et Ogada, 1999). Ces boues représentent avant tout une matière première composée d'eau, de différents éléments composés de matière organique, d'éléments fertilisants (N, P, K...), d'éléments traces métalliques (ETM), d'éléments traces organiques (ETO) et d'agents pathogènes (Bousselhaj, 1996 cité par Amir S., 2005).

1. Origine des boues

Généralement, le traitement des eaux usées au sein d'une station d'épuration comporte d'après AMORCE (2012) quatre étapes successives (Figure 1) :

- **Les prétraitements** : ils consistent à éliminer les éléments grossiers (dégrillage), à enlever le sable (dessablage) ainsi que les graisses (désuilage).
- **La décantation primaire** : elle permet la capture des éléments en suspension.
- **La digestion aérobie ou traitement biologique** : réduction de la charge en matière organique de l'eau usée par des micro-organismes regroupés en « floes » et production de boues dites « activées ». Cette phase nécessite une aération conséquente.
- **La clarification** : elle permet la séparation du « floe » bactérien de la phase aqueuse.

2. Types de boues

- Les **boues primaires** : sont les dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées (dans les décanteurs-digesteurs par exemple). Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales et aussi en matières organiques.

- Les **boues physico-chimiques** : sont des boues issues des eaux traitées par des adjuvants chimiques comportant des coagulants/floculants (alun, sulfate ferreux, etc.) ;
- Les **boues biologiques** : elles proviennent d'une épuration biologique des eaux (boues activées, etc.) grâce à des bactéries aérobies ou anaérobies. Ces boues sont principalement constituées de corps bactériens et de leurs sécrétions (ADEME, 1996 ; Werther et Ogada, 1999 ; CEE, 2001).

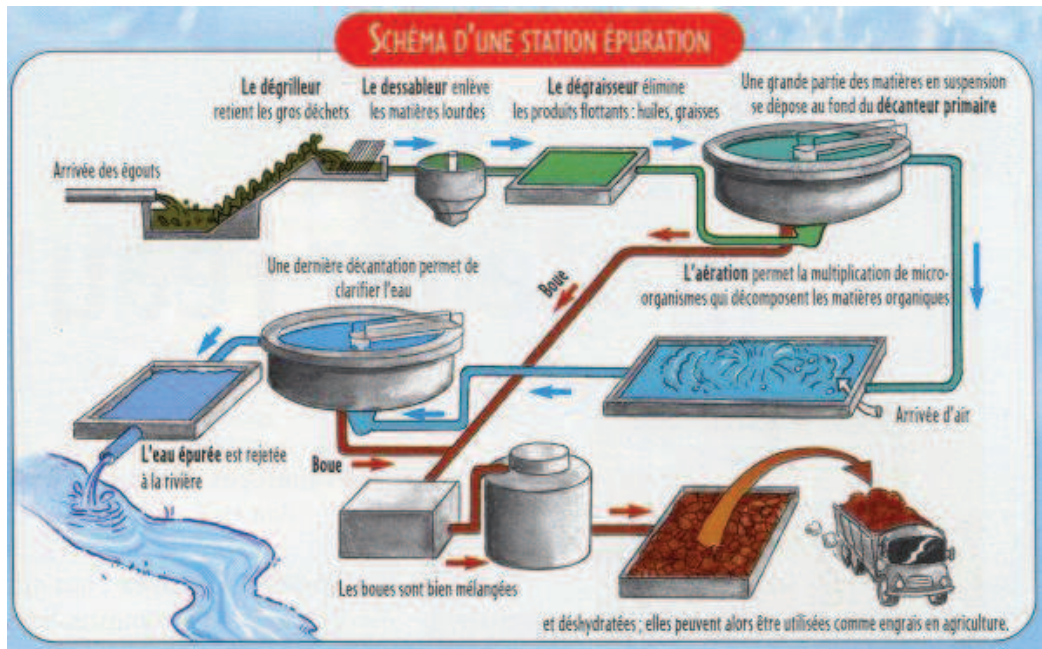


Figure 01 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration (ADEME., 1996).

3. Composition des boues résiduaires

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 (Jarde et *al.*, 2003 ; Singh et *al.*, 2004). D'une façon générale, la matière solide de ces résidus contient à la fois des éléments naturels valorisables (matière organique, des éléments fertilisants et amendements), des composés toxiques (contaminants chimiques inorganiques et organiques).

Le tableau I donne des exemples de composition de boues primaires brutes et digérées et de boues activées brutes (Metcalf et Eddy, 2004).

Tableau I : Composition des boues (Metcalf et Eddy, 2004)

Composants	Boue primaire brute		Boue primaire digérée		Boue activée brute
	Gamme	Typique	Gamme	Typique	Gamme
Matière solide sur une base sèche (MS) (%)	5-9	6	2-5	4	0.8-1.2
Matière volatile (% des MS)	60-80	65	30-60	40	59-88
Graisse et gras (% des MS) :					
• Soluble dans l'éther	6-30	-	5-20	18	-
• Extrait à l'éther	7-35	-	-	-	5-12
Protéine (% des MS)	20-30	25	15-20	18	32-41
Azote (N, % des MS)	1.5-4	2.5	1.6-3.0	3.0	2.4-5.0
Phosphore (P ₂ O ₅ , % des MS)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11
Potasse (K ₂ O, % des MS)	0-1	0.4	0-3.0	1.0	0.5-0.7
Cellulose (% des MS)	8-15	10	8-15	10	-
Silice (SiO ₂ , % des MS)	15-20	-	10-20	-	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0
Alcalinité (mg/L en CaCO ₃)	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Acides organiques (mg/L en HAc)	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
Contenu énergétique (kJ/kg MS)	23000-29000	25000	9000-14000	12000	19000 - 23000

4. Traitement des boues et leur devenir

4.1. Traitement des boues

En vue de leur valorisation ou de leur élimination, les boues résiduelles sont collectées puis traitées en fonction de leur destination finale. A leur sortie, les boues se présentent au départ sous forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes quelle que soit la destination des boues et imposent la mise en place d'une filière de traitement, c'est-à-dire une suite organisée de procédés qui agissent de façon complémentaire (Robert et *al.*, 1994). Ces traitements doivent répondre à au moins l'un des objectifs suivants :

- ✓ réduction de leur teneur en eau est ceci dans le but de réduire leur volume et d'éviter la putréfaction de la matière organique facilement décomposable ;
- ✓ stabilisation de la matière organique en diminuant sa fermentescibilité pour réduire ou supprimer les mauvaises odeurs ;
- ✓ Hygiénisation si nécessaire en détruisent les micros organismes pathogènes.

4.2. Valorisation des boues

La nature de la matière organique des boues d'épuration fait qu'elle est facilement minéralisée par les micro-organismes du sol et produit peu d'humus. Ainsi, les boues représentent un apport de matière fertilisante très bon marché en comparaison avec les engrais chimiques (Tableau II). Elles peuvent être valorisées comme matières résiduelles fertilisantes (MRF) et suppléer une partie de l'apport d'engrais minéraux nécessaire à des cultures économiquement importantes (blé, maïs, ...) tout en agissant favorablement sur les propriétés du sol (ADEME, 1996). En effet, des études de la valeur fertilisante ont démontré que l'application de boues résiduaires urbaines s'est traduite par une production importante d'azote minéral (Mench *et al.*, 1989) et une augmentation de la teneur de formes organiques et minérales du phosphore (Brossard *et al.*, 1989).

Tableau II : valeurs agronomiques indicatives de différents types de boues
(ADEME,1996)

	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Boue compostée
Matière sèche % de produit brut*	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Matière organique (% MS)	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Matière minérale (% MS)	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6,5 à 7	7 à 8	6 à 8	9 à 12	6 à 7
C/N	4 à 5	5 à 6	4 à 6	6 à 8	15 à 25
Azote (Kg N**/t (MB)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9
Phosphore (Kg P ₂ O ₅ / t MB)	2 à 3	6 à 9	50 à 70	6 à 10	6 à 8
Potasse (Kg K ₂ O/t MB)	0.9	0.8	5	1	1 à 2
Chaux (Kg CaO/t MB)	1 à 3	5 à 15	40 à 60	60 à 90	10 à 30

* produit brut signifie produit frais en l'état ;

** à 80-90 % sous forme organique et 10-20 % sous forme ammoniacale, si la boue est liquide.

MB : Matière Brute

5. Production des boues en Algérie

En Algérie, selon l'ONA (2013) environ 732 million de m³ de boue d'épuration sont produite chaque année à raison d'environ 539 tonnes par jour sur les 150 stations d'épuration en exploitation. Ces boues sont destinées à subir des traitements qui ont pour objectif de réduire le volume de boue et de les valoriser par une réutilisation à des fins agricoles, permettent ainsi d'enrichir les sols sans recourir à des engrais chimiques, ou encore de valoriser leur potentiel énergétique sous forme de biogaz.

Matériels

&

Méthodes

I. Matériels

Cette partie présente les différents matériaux ainsi que leurs propriétés et les dispositifs expérimentaux utilisés dans les différentes expérimentations.

1. Sites d'échantillonnage des sols

Nous avons utilisé, dans le cadre de cette étude, des sols prélevés dans les champs de blé de trois régions semi-arides situées à l'Est d'Algérie. Il s'agit des sols de Bordj-Bou-Arredj, Bouira et Sétif (Figure 02).

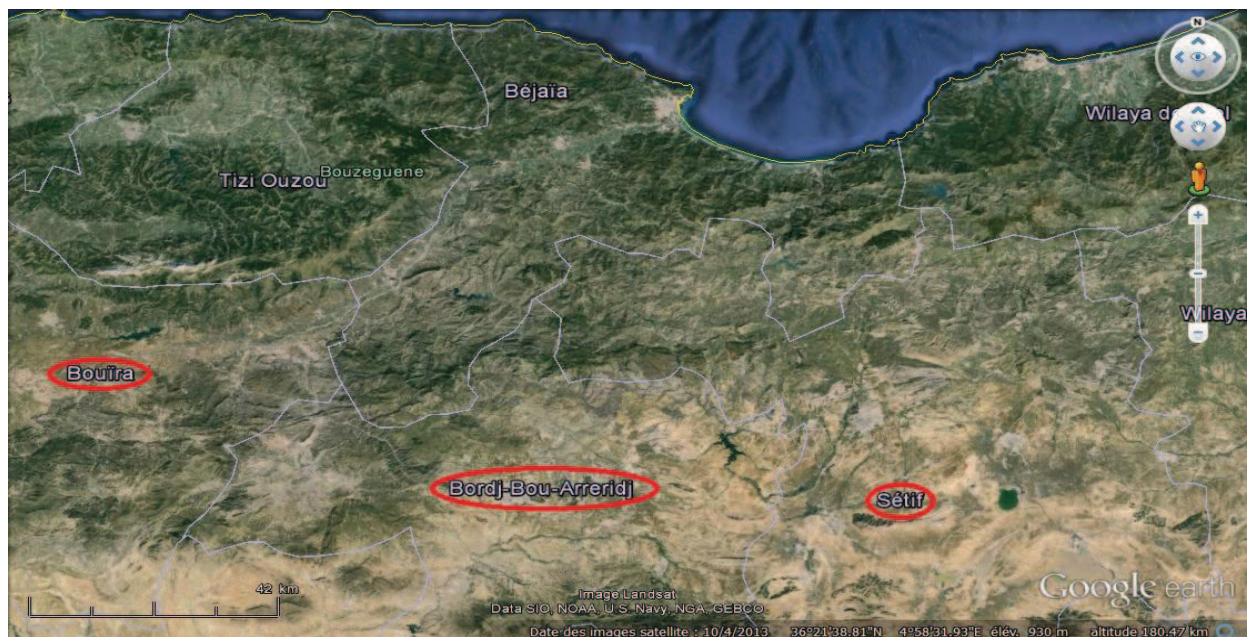


Figure 02 : Sites d'échantillonnages des sols

Les principales caractéristiques géographiques et climatiques de ces régions sont consignées dans le tableau III.

Tableau III : Données géographiques et climatiques des régions (Bulletin agro-météorologique)

Stations	Coordonnées (GPS)	Altitude (m)	Pluviométrie (mm/an)	Température moyenne (°C)
Bouira	36°15'0" Nord 3°55'0" Est	566	660 mm/an au nord et de 400 mm/an dans la partie sud	varient entre 20 et 40°C de mai à septembre et de 2 à 12 °C de janvier à mars.
BBA	36°04'00" Nord 4°46'00" Est	920	360	14
Sétif	36°10'0" Nord 5°30'0" Est	1,043	Nord: 700 m Hauts plains : 400 m Sud : 200 m	26,07

Les échantillons de sols sont prélevés sur une couche de 30cm de profondeur et transportés au laboratoire pour être soumis à plusieurs traitements dont :

- Le séchage à l'air libre pendant plusieurs jours ;
- Tamisage à travers un tamis de 2mm de diamètre ;
- Récupération et conservation de la terre fine.

2. Les boues

Les boues utilisées dans notre expérimentation ont été récupérées de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Bejaia, datant d'environ 2 ans. Pendant cette période, ces boues ont été laissées à l'air libre afin de subir un lessivage ; un retournement régulier pour aération et une évaporation naturelle de l'eau contenue dans les boues par exposition au rayonnement solaire et enfin une stérilisation thermique à une température qui varie entre 50 et 60°C jusqu'à ce que tous les microorganismes pathogènes disparaissent.

Ces boues sont d'une couleur noire foncée, caractérisées par des odeurs désagréables et une faune remarquable (larves, nématodes, acariens...) (Figure 03).



Figure 03 : Les boues utilisées.

3. Le matériel végétal

Le matériel végétal consacré à cette étude est constitué de graines de Pois cultivé (*Pisum sativum* L.) fournies gracieusement par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Oued-Ghir-Bejaia (Figure 04).



Figure 04 : Graines de *Pisum sativum* L. utilisées

3.1. Aspects botaniques de *Pisum sativum* L.

Le pois (*Pisum sativum* L.) est domestiqué depuis la préhistoire, largement cultivé dans le monde pour ses graines riches en énergie et en protéines pour l'alimentation humaine et animale.

C'est une espèce de plante annuelle de la famille des légumineuses. Elle appartient à l'embranchement des spermatophytes, le sous-embranchement des *Magnoliophyta*, la classe des *Magnoliopsidae* (Dicotylédones vraies), la sous-classe des *Rosidae*, l'ordre des *fabales*, la famille des *Fabaceae* (Légumineuses), la sous-famille des papilionacées, tribu des *fabaeae*, le genre *Pisum* et à l'espèce *sativum* (USDA, 2008)

Elle est caractérisée par un système racinaire de type pivotant et très ramifié. La tige quant à elle est peu ramifiée. Elle possède aussi un certain nombre de nœuds, ou mailles, dont les premiers sont purement végétatifs (émettent des feuilles ou des ramifications) et les suivants reproducteurs (portant des fleurs). Les fleurs, de type « papilionacé », sont zygomorphes et elles apparaissent à l'aisselle des feuilles. Le fruit est une gousse déhiscence bivalve, de 4 à 15 cm de long, contenant de 2 à 10 graines rondes lisses ou anguleuses, de 5 à 8 mm de diamètre (Figure 05) (Ferdaous et *al.*, 2007).

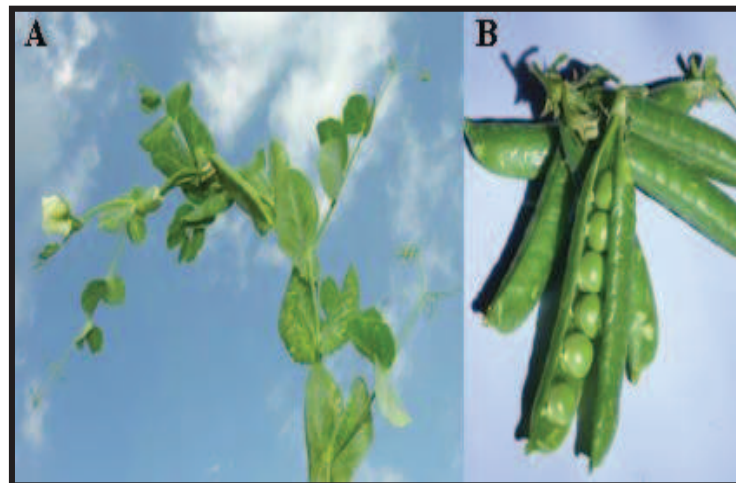


Figure 05 : Photo de *Pisum sativum* L.

(A : plante) et (B : gousses)

II. Méthodes

1. Analyses physico-chimiques des sols

Afin de déterminer les principales caractéristiques physico-chimiques des sols, nous avons procédé à différentes analyses physiques et chimiques :

1.1. Les analyses physiques

1.1.1. Humidité

L'humidité du sol est déterminée par pesée d'une certaine quantité de sol avant et après passage à l'étuve à 105°C. La perte du poids par le sol représente le poids d'eau évaporée pendant le séchage.

1.1.2. La granulométrie

L'analyse granulométrique a pour but de donner la composition élémentaire du sol ou texture du sol, en classant les particules minérales en groupes correspondants à des dimensions définies selon l'échelle d'Atteberg.

Cette analyse a été effectuée à la pipette de Robinson. Après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, du calcaire total à l'acide chlorhydrique (6N) et dispersion des ions flocculants à l'hexametaphosphate de sodium, les particules fines (argiles et limons fins) sont prélevées à la pipette Robinson dans des allonges à sédimentation, à des profondeurs et à des temps déterminés par application de la loi de Stokes (Aubert, 1978). La fraction grossière (Sables grossiers, sables fins et limons grossiers) sont déterminés par tamisage après élimination des fractions fines par siphonage.

1.1.3. pH

L'acidité des sols a été mesurée par un pH-mètre à électrode de verre combinée trempant dans une suspension aqueuse du sol dont le rapport sol/eau est 1/2.5 après 1 heure d'agitation puis décantation. Deux mesures d'acidité ont été faites: l'acidité actuelle (pH_{eau}) et l'acidité potentielle (pH_{KCl}). Cette dernière se fait par l'ajout d'une quantité de KCl.

1.1.4. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique des sols est mesurée à l'aide d'un conductimètre sur l'extrait de sol dont le rapport eau/sol = 1/5. Cette mesure physique, exprimée en ($\mu\text{S}/\text{cm}$), nous donne une idée sur la concentration des électrolytes dans les solutions des sols d'une part et du degré de salinisation des sols d'autre part (Aubert, 1978).

1.2. Les analyses chimiques

1.2.1. Dosage du calcaire total CaCO_3

Le dosage du CaCO_3 total est réalisé par la méthode volumétrique, en décomposant les carbonates de calcium du sol par l'acide chlorhydrique ($\text{HCl } \frac{1}{2}$) et mesurer le volume du CO_2 dégagé à l'aide du calcimètre de Bernard.

1.2.2. Dosage du calcaire actif

Le calcaire actif correspond à la partie la plus fine des carbonates et facilement solubilisable par les solutions du sol. Pour son dosage, on utilise la méthode Drouineau-Galet, qui utilise la propriété du calcium de se combiner aux oxalates pour donner de l'oxalate de calcium insoluble, l'excès d'oxalate d'ammonium est ensuite dosé par une solution de permanganate de potassium en milieu sulfurique (Soltner, 2005).

1.2.3. Dosage de l'azote total

Dans la méthode de Kjeldahl, l'azote des composés organiques est transformé en azote ammoniacal sous l'action de l'acide sulfurique concentré à l'ébullition, qui se comporte comme un oxydant et détruit les matières organiques. Pour accélérer cette transformation on utilise un catalyseur renfermant du sulfate de cuivre, de sulfate de potassium et de sélénium. Lorsque la matière organique est entièrement oxydée, la solution du sulfate d'ammonium obtenue est récupérée, on procède par la suite au dosage. L'ammoniaque est déplacée de sa combinaison par la soude, distillé grâce à l'appareil VELP et recueilli dans une solution d'acide borique. On titre celui-ci avec une solution d'acide sulfurique de normalité connue.

1.2.4. Dosage du carbone organique

Le carbone organique d'un sol est dosé par la méthode Anne modifiée où il est oxydé à chaud par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. L'excès de bichromates de potassium est titré par une solution de sel de Mohr en présence de diphénylamine.

La matière organique est obtenue par la formule suivante : $\text{MO \%} = \text{C \%} \times 1,72$.

1.2.5. Dosage du phosphore assimilable

Le phosphore assimilable du sol est déterminé selon la méthode Olsen (1954).

L'acide phosphorique du sol est d'abord extrait par une solution de bicarbonate de sodium (NaHCO_3 , 0.5N, pH= 8,5) dans un rapport prise d'essai/volume d'extraction ($m/v = 1/20$), suivie d'une filtration. Les ions phosphates réagissent ensuite avec les ions molybdates en milieu acide pour former un complexe phospho-molybdique qui est réduit par les chlorures stanneux, développe une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration de la solution en orthophosphates.

Le phosphore extrait est dosé par spectrophotométrie à une longueur d'onde $\lambda = 660\text{nm}$. Les teneurs du sol en P sont déterminées à partir d'une courbe standard et exprimées en ppm (Annexe I).

1.2.6. Capacité d'échange cationique (C.E.C)

La capacité d'échange cationique des sols est déterminée par la méthode Metson. Le sol est lessivé avec une solution aqueuse et molaire d'acétate d'ammonium à pH 7 de manière à provoquer un échange complet entre les cations de l'échantillon (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) et les ions ammonium de la solution. Le complexe absorbant, après déplacement des bases échangeables est saturé par de l'ammonium (NH_4^+). L'excès de NH_4^+ est éliminé par rinçage à l'éthanol. Ensuite, les ions ammonium fixés sur le complexe sont extraits par une solution aqueuse et molaire de chlorure de potassium (KCl, 1M). Les ions ammonium récupérés par le lavage sont dosés avec une solution d'acide sulfurique de titre connu après distillation à l'aide d'un appareil de VELP.

1.2.7. Dosage des bases échangeables Ca^{2+} , Mg^{2+}

Les teneurs du sol en Ca^{2+} et Mg^{2+} échangeables sont déterminées par complexométrie à l'EDTA sur le percolât obtenu par extraction à l'acétate d'ammonium.

Les teneurs du sol en K^+ et Na^+ n'ont pas été mesurés pour absence de photomètre à flamme.

2. Analyses physico-chimiques des boues

Afin d'avoir un aperçu général sur les propriétés physico-chimiques ainsi que leur richesse en éléments fertilisants, les boues prélevées au niveau de la station STEP de Bejaia ont fait l'objet d'analyses qui ont porté sur les éléments majeurs suivants : C, N, P, pH, CE, granulométrie, Carbonates, CEC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , humidité et matières sèches. Ces

paramètres sont déterminés selon les méthodes décrites précédemment pour l'analyse des sols.

3. Etude de l'effet des boues sur les propriétés chimiques des sols et sur le développement du pois

3.1. Conduite de l'essai

L'essai a été conduit au laboratoire de Biologie des Sols de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Bejaia.

3.2. Dispositif expérimental

Les échantillons du sol, légèrement humidifiés, sont répartis dans des pots en PVC (hauteur : 14 cm, diamètre : 12cm) à raison de 800g de sol par pot.

L'essai comporte deux traitements :

- ✓ Traitement 1 : constitué de pots contenant les échantillons de sols sans apport (Témoin),
- ✓ Traitement 2 : constitué de pots contenant les échantillons de sols amendés par les boues.

La série de pots du traitement 2 reçoit une quantité de boues séchées dans un rapport boues/sol de 3% (p/p). Les boues sont soigneusement mélangées avec le sol pour réaliser une distribution uniforme de cet amendement.

3.3. Germination des graines

Afin de faciliter leur germination, les graines de Pois ont été triées à la main en fonction de leur bon état visuel (notamment téguments intacts, absence de taches ou autres). Elles ont été ensuite stérilisées en surface avec de l'eau de javel (3°) pendant 3 min, puis rincées abondamment à l'eau distillée stérile. Après désinfection, nous les avons mises à germer à 30°C et à l'obscurité dans des boîtes de Pétri en verre tapissées du papier filtre imbibé d'eau distillée stérile pour assurer l'humidité (Figure 06).



Figure 06 : Germination des graines de *Pisum sativum* L.

3.4.Repiquage des plantules

Les graines utilisées dans l'essai sont celles dont les radicelles mesuraient entre 1 et 2 cm de longueur après incubation. Après la pré-germination, les plantules sont repiquées soigneusement à raison de 5 plantules par pots, qui sont immédiatement arrosés avec de l'eau de robinet pour permettre un bon contact sol-graine. Les pots ainsi préparés sont placés sur une table (h = 90 cm). L'éclaircissage a été effectué à deux plants par pot une semaine après semis.

Les cultures sont conduites sous des conditions de températures et de luminosité du laboratoire et l'irrigation a été faite de manière à maintenir le sol dans une humidité suffisante et éviter tout stress hydrique durant l'expérimentation (Figure 07).



Figure 07 : Dispositif expérimental de l'essai

3.5. Variables mesurées

3.5.1. Paramètres physico-chimiques du sol

Afin de suivre la cinétique de la dégradation de la matière organique, nous avons procédé à l'analyse du taux de carbone, d'azote, du rapport C/N et du pH sur des échantillons de sols prélevés à un intervalle de 15 jours.

3.5.2. Paramètres morpho-physiologiques de la plante

Au 30^{ème} jour de l'essai de culture, les plantes ont été déterrées soigneusement, leurs racines lavées à l'eau courante et les parties aériennes et racinaires sont séparées. Les paramètres morpho-physiologiques suivants : longueur, matière sèche, pigments chlorophylliens, l'azote et les teneurs en proline ont été mesurés sur les parties aériennes des plantes.

- **Hauteur des plantes**

La taille des plantes a été mesurée à l'aide d'un papier millimétrique.

- **Matière sèche des plantes**

La matière sèche des parties aériennes des plantes a été déterminée par la masse de la matière fraîche (**Pf**) puis sèche (**Ps**) après séchage à l'étuve réglée à 65°C jusqu'à poids constant. La masse sèche des parties aériennes a ensuite été mesurée selon la formule :

$MS \% = (Ps/Pf) \times 100$ où (**MS%** : % de sèche de matière ; **Ps** : poids sec et **Pf** : Poids frais).

Les échantillons secs sont broyés dans un mortier à l'aide d'un pilon et la poudre fine obtenue de chaque échantillon est placée séparément dans des tubes à essai fermés hermétiquement.

- **Dosage de l'azote des plantes**

Les teneurs en azote du végétal ont été déterminées sur 0.1g de poudre végétale selon la méthode Kjeldahl décrite précédemment.

- **Dosage des pigments chlorophylliens**

L'extraction des pigments chlorophylliens des tissus foliaires a été réalisée suivant la méthode de Mc Kinney et *al.*; (1941) cités par Arnon (1949).

20mg de matière végétale fraîche sont broyés dans une solution d'acétone (80%), en présence de quelques milligrammes de carbonate de calcium (CaCO₃) pour faciliter la

libération des pigments chlorophylliens. L'extrait est récupéré après filtration pour lecture de la densité optique à des longueurs d'ondes $\lambda = 663 \text{ nm}$; $\lambda = 646 \text{ nm}$ et $\lambda = 470 \text{ nm}$.

Les teneurs en chlorophylle A, B et celles des caroténoïdes+Xanthophylles ont été déterminées à partir des formules de Mc Kinney et *al.* (1941) cités par Arnon (1949) et exprimées en ($\mu\text{g/g}$ MVF).

$$\text{Chlorophylle A} = [(12.21 * \text{DO}_{663}) - (2.81 * \text{DO}_{646})] * V / P$$

$$\text{Chlorophylle B} = [(12.21 * A_{646}) - (2.81 * A_{663})] * V / P$$

$$\text{Caroténoïdes+ Xanthophylles} = [(100 * \text{DO}_{470}) - (3.27 * \text{ChlA} - 104 * \text{ChlB})] / 229$$

Avec:

DO : Densité optique de l'échantillon mesuré à 663, 646 ou 470 nm.

V : Volume de l'extrait sur 1000 ml.

P : Poids frais de l'échantillon en mg.

- **Dosage de la proline des plantes**

Dans la méthode de Bates et *al.* (1973), l'échantillon foliaire frais est broyé avec de l'acide sulfosalicylique (3%) et le résidu est éliminé par centrifugation à 6000 tours/min pendant 10 minutes. 1ml du surnageant réagit avec 2 ml de la solution de ninhydrine et de l'acide acétique glacial et le tout est incubé pendant 1 heure à 100°C. Après refroidissement dans un bain de glace, 6 ml de toluène sont ajoutés à l'extrait. La phase supérieure contenant la proline est récupérée et sa densité optique est mesurée à 520 nm.

La concentration en proline est déterminée en se reportant à une courbe standard préparée à partir d'une solution de proline sur la base des concentrations connues (Annexe 02).

La quantité de proline du végétal est exprimée en $\mu\text{g/g}$ MVF.

Résultats
&
Discussions

I. Caractérisation physico-chimique des sols

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons des sols sont regroupés dans le tableau IV :

Tableau IV : Résultats des analyses physico-chimiques des sols étudiés.

<i>Sols</i>	<i>BBA</i>	<i>Bouira</i>	<i>Sétif</i>
<i>Paramètres *</i>			
pH _{eau}	7.35	7.75	7.15
pH _{KCl}	6.90	7.10	7.00
CE (µs/cm à 25°C)	334	255	251
%CaCO ₃ total	16.63	3.75	47
%CaCO ₃ actif	7.04	1.75	15.04
N%	0.41	0.32	0.58
C%	0.72	1.03	1.76
MO%	1.24	1.77	3.04
C/N	8.59	13.95	12.20
P (ppm)	0.06	0.12	0.28
CEC (meq/100g de sol)	266.33	53.90	455.33
Ca ²⁺ (meq/100g de sol)	50.68	39.36	38.24
Mg ²⁺ (meq/100g de sol)	0.9	1.18	0

(*) : Valeur moyenne de trois répétitions

❖ pH

La mesure du pH d'un sol permet de définir son état d'acidité ou d'alcalinité. En se référant à la classification établie par Gaucher (cité par Soltner ,1988), le sol de Sétif est neutre (pH_{eau} = 7.15), tandis que les sols de BBA et de Bouira sont légèrement alcalin à alcalin avec des valeurs de pH_{eau} respectivement de 7.35 et 7.75.

Le pH_{KCl} exprime l'acidité d'échange ou l'acidité potentielle. C'est un indice d'expérience du degré de saturation du complexe absorbant, ainsi que la nature chimique des ions fixés. Pour la plupart des sols on note des valeurs comprises entre 6.90 et 7.1. Elles sont inférieures à celles du pH_{eau}. La valeur de pH_{KCl} la plus faible est enregistrée au niveau du sol de BBA.

Le sol de Sétif avec un pH neutre est considérés comme étant de bonne terre, la plupart des plantes s’acclimatent bien dans ces types de sols qui favorisent l’assimilation des éléments nutritifs.

❖ **la conductivité**

La conductivité électrique (CE) des sols détermine leur degré de salinité. L’échelle de Durand (1983) (tableau V) a été utilisée pour indiquer la classe de salinité des sols sur extrait 1/5 et l’effet sur le rendement des cultures. Ainsi, les résultats obtenus montrent que tous les sols appartiennent à la classe 1, qui regroupe les sols non salés. Ces sols ne présentent aucun effet défavorable sur les cultures.

Tableau V : classes de salinité des sols (Durand, 1983)

Classes	CE en $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 25°C	Qualité des sols	Effet sur le rendement
Classe I	0 à 500	Non salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	Salé	Diminution des rendements de la plus part des cultures
Classe IV	2000 à 4000	Très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	Extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

❖ **Le calcaire**

Le calcaire total est présent en proportion relativement importante dans le sol de BBA (16.63%) et très élevée dans le sol de Sétif (47%), avec des taux de calcaire actif respectivement de 7 et 15%. Par contre le sol de Bouira présente une proportion très faible en calcaire total (3.75%). En comparant les valeurs obtenues à celles signalées par Baize (1988), nous constatons que le sol de Sétif est fortement calcaire.

Le calcaire intervient dans la stabilisation et la formation du complexe argilo-humique qui est la base de la fertilité du sol. Cependant, l’excès de calcaire actif dans le sol est à l’origine de l’apparition de symptômes de chlorose et d’effets négatifs sur la croissance des cultures. Dans nos conditions, le sol de Sétif peut présenter un risque de chlorose ferrique à cause de sa richesse en calcaire actif. Ce dernier risque de bloquer l’assimilation des oligo-

éléments notamment le fer nécessaire aux plantes (Juste et Pouget, 1980 ; Lopez-Bellido et Fuentes, 1986 ; Bourguignon, 2002).

❖ L'azote

Le taux d'azote dans les 3 sols est relativement important ; il est situé entre 0.32 et 0.58, ceci serait du soit à des apports annuels pratiqués en surface, ou soit à la présence d'une fumure de fond apportée avant plantation.

❖ Le carbone et MO

D'après Soltner (1988), le taux de carbone organique est élevé dans le sol de Sétif (1.78%), par contre il est faible dans les sols de BBA et de Bouira avec des teneurs respectivement de 0.72 et 1.03 %. Contrairement aux sols de BBA et Bouira, qui présentent des taux de matière organique (MO%) relativement faibles (1.24 et 1.77%), le sol de Sétif présente des teneurs élevées en MO (3.04%). Ces niveaux élevés de la matière organique dans ce sol peuvent s'expliquer également par la présence d'une fumure organique apportée avant plantation.

❖ Rapport C/N

Le rapport C/N traduit l'intensité de l'activité biologique du sol. En effet, lorsque le C/N est \leq à 10, la vitesse de décomposition de la matière organique s'accroît et l'activité biologique est bonne, contrairement lorsque il est supérieure à 20 ($C/N > 20$), indique qu'il n'y a pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone. La minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral (Soltner, 1988).

Dans notre cas, le sol de BBA avec $C/N = 8.59$ présente une bonne minéralisation de la matière organique, ceci est due à une activité biologique importante. Les sols de Sétif et de Bouira permettent également une décomposition de la matière carbonée mais avec une activité biologique réduite.

❖ Le phosphore assimilable

Le phosphore est l'un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des végétaux. Il joue en particulier un rôle essentiel dans la mise en place du système racinaire, la photosynthèse et la reproduction du végétal (Elalaoui, 2007).

Gervy (1970) estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 300 ppm, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 150 ppm et 300 ppm, et pauvre quand elle est inférieure à 150 ppm.

Les résultats des échantillons de sols étudiés montrent que les teneurs en phosphore assimilable sont très faibles.

❖ La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique du sol (CEC) représente la taille du réservoir permettant de stocker de manière réversible certains éléments fertilisants (potassium, magnésium, calcium...). Elle est liée au complexe argilo humique et sa valeur est donc fonction des quantités d'argile et de MO qu'il contient, mais aussi de la nature de ces éléments et du pH du sol.

En se basant sur les valeurs du tableau VI, la capacité d'échange cationique est très élevée dans le sol de Sétif (455.33 meq/100g sol), suivi du sol de BBA (266.33 meq/100g sol) et enfin du sol de Bouira (53.90 meq/100g sol). Ces niveaux élevés de CEC des sols sont dûs à leur quantité relativement importante d'argiles qu'ils contiennent (respectivement 88.18 %, 51.82%, 28.53%).

Tableau VI : programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie

<i>Valeur de la CEC meq / 100g de sol</i>	<i>Interprétation</i>
CEC < 9	Petit CEC
$9 \leq \text{CEC} \leq 12$	CEC moyenne
$12 \leq \text{CEC} \leq 15$	CEC assez élevée
$15 \leq \text{CEC} \leq 25$	CEC élevée
CEC > 25	CEC très élevée

Pour le calcium et le magnésium échangeables, les sols présentent des niveaux relativement élevés. Ces teneurs sont jugées satisfaisantes pour le végétal.

❖ **Texture des sols**

L'analyse granulométrique décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules solides du sol (argiles limons et sables), et permet d'apprécier la perméabilité, la rétention en eau, l'aération et la capacité d'échange cationique (Baize, 1988).

La classe texturale des sols est déterminée selon le triangle de texture (USDA, 1954) et les résultats de l'analyse granulométrique des sols étudiés sont consignés dans le tableau VII

Tableau VII : Résultats des analyses granulométriques des sols.

Sols	% A	% Lf	% Lg	% Sf	% Sg	Texture
BBA	51.82	38.75	2.27	5.54	1.62	Argilo-limoneux
Bouira	28.53	39.11	13.76	12.65	5.95	Argilo-limoneux
Sétif	88.18	9.44	0.98	1.13	0.27	Argileux

Les résultats obtenus révèlent que les sols de BBA et de Bouira présentent une texture argilo-limoneuse avec une dominance d'argiles pour le sol de BBA (51.82%) et de limons fins pour le sol de Bouira (39.11%). Ces sols permettent à l'air et à l'eau de circuler plus ou moins facilement et ils conviennent à la culture du blé et du maïs. Cependant, ils sont sujets à la formation superficielle d'une croûte sèche et peuvent présenter un phénomène de battance à cause de la présence des limons (Massenet, 2013).

Le sol de Sétif présente une texture argileuse avec une dominance nette des argiles (88.18%). Ce type de sol est qualifié de terre collante et gonflante au contact de l'eau. Il est caractérisé par une grande capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs. Cependant, c'est un sol lourd et compact et il est alors difficilement drainé (Lerau, 2006).

II. Caractères physico-chimiques des boues

Les différents paramètres physico- chimiques des boues sont représentés dans le tableau VIII :

Tableau VIII : Résultats de l'analyse physico-chimiques des boues

<i>Paramètres *</i>	<i>Boues</i>
pH _{eau}	6.70
pH _{KCl}	6.90
CE (µs/cm à 25°C)	0.980
CaCO ₃ total (%)	7.32
CaCO ₃ actif (%)	ND
N%	2.20
C%	1.31
MO%	2.26
C/N	2.92
P (ppm)	3.62
A %	83.63
Lf %	12.05
Lg%	0.94
Sf%	0.67
Sg%	2.70
Texture	Argileuse
CEC (meq/100g de sol)	448
Ca ²⁺ (meq/100g de sol)	34.68
Mg ²⁺ (meq/100g de sol)	5.3

(*) : Valeur moyenne de trois répétitions ; **ND** : non déterminé

Les boues analysées présentent une texture argileuse, avec un taux élevé en argiles (83.63%) et une teneur très faible en sables. En se référant aux travaux de l'ENITA (2000), Ces boues peuvent retenir un maximum de cations échangeables du fait qu'elles contiennent une quantité importante d'argiles

Les résultats de l'analyse physico-chimique des boues issues de la station d'épuration, ont montré qu'elles sont légèrement acides à neutres, avec une proportion

inférieure au seuil critique (Drouineau, 1979, cité par Salaheddine, 2005). Elles présentent des teneurs élevées en matière organique et en azote. Leurs concentrations se situent au tour des normes (2 à 2.50%) citées par Lacée (1985), ce qui permet leur utilisation dans le domaine agricole ou forestier.

D'après Grimaud, (1996), les boues contiennent en moyenne 4 à 6 % d'azote (pourcentage de la matière sèche) ; ce taux d'azote est variable selon les types de boues. La fourchette extrême des teneurs observées s'étend de 1 à 9 % selon les caractéristiques des effluents traités, les procédés de stabilisation des boues et les éventuels traitements complémentaires de conditionnement utilisés. Les plus fortes teneurs sont observées avec les boues liquides.

Pour ce qui est de la capacité d'échange cationique (CEC), elle est très élevée à cause du pourcentage élevé des argiles (83.63 %), ce qui leur donne la propriété absorbante pour fixer les cations. Ces boues constituent donc une réserve en éléments indispensables pour la croissance des plantes.

Le rapport C/N permet d'apprécier qualitativement la capacité de minéralisation de l'azote organique contenu dans les boues. Il est utilisé pour classer les boues dans les différentes catégories de fertilisants organiques selon le Code des Bonnes Pratiques Agricoles (1993) conditionnant les périodes d'aptitude à l'épandage.

La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau (Rejsek, 2002). Dans notre cas, la CE des boues utilisées dans le cadre de cette étude est de 0.980 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Cette valeur est supérieure à celle des sols, mais elle est classée selon l'échelle de Durand non salée.

III. Effet des boues sur les caractéristiques physico-chimiques des sols et sur les paramètres morpho-physiologiques de la plante.

1. Effets des boues sur les paramètres physico-chimiques du sol

Afin d'évaluer l'impact des boues résiduelles, produites au niveau de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Bejaia, sur quelques propriétés des sols étudiés, nous avons suivi la cinétique de minéralisation du carbone, de l'azote, du rapport C/N et du pH après 15 et 30 jours de l'épandage.

1.1. Le carbone

D'une façon générale, la cinétique de minéralisation du carbone montre que, quelque soit le type de sol étudié, diminue en fonction du temps (Figure 08). Ceci nous indique qu'il y a une bonne minéralisation de la matière organique. La disparition du carbone en fonction du temps se traduit essentiellement par l'activité biologique intense dans le sol. Cette activité serait due à la présence surtout de la faune et flore microbienne qui ont contribué à la destruction et à la minéralisation plus ou moins rapide de la matière organique.

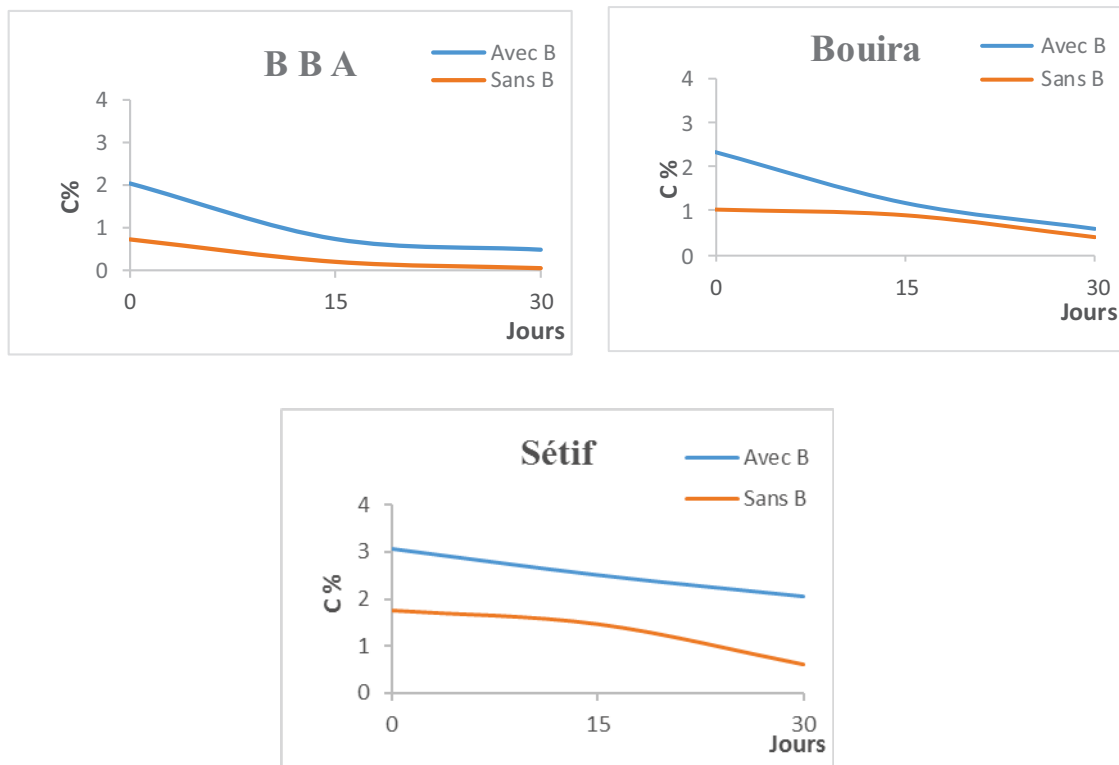


Figure 08 : Cinétique de minéralisation du carbone des sols témoins et du mélange sols + boues

1.2. L'azote

Comme pour le carbone, l'allure générale des courbes montre une diminution de la quantité d'azote dans tous les sols étudiés (Figure 09). De plus, l'épuisement rapide de la totalité de l'azote constaté au bout de 15 jours serait liée à une forte minéralisation de la matière organique, due à l'action de la faune et de la flore tellurique, puisque l'azote constitue l'un des éléments essentiels pour la croissance de tous les êtres vivants.

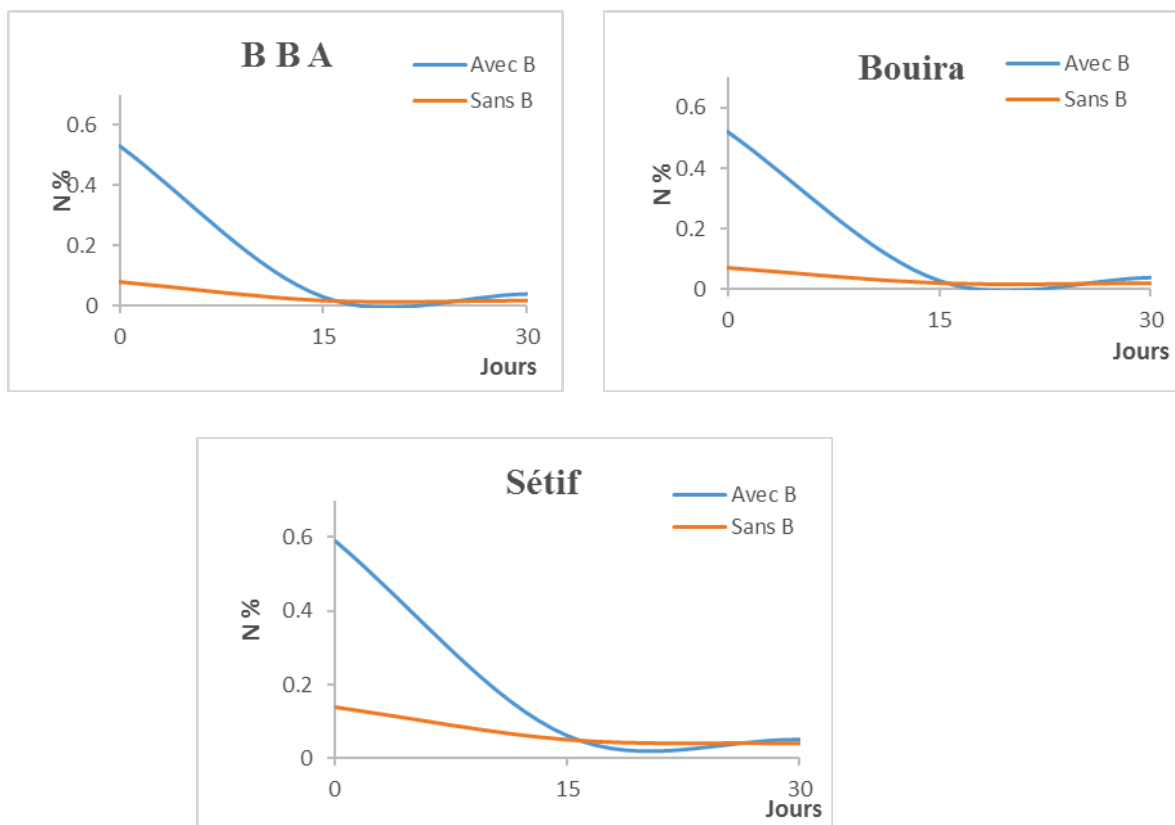


Figure 09 : Minéralisation de l'azote du sol témoin et du mélange sol + boue

En effet, les boues résiduaires contiennent l'azote sous plusieurs formes : les formes minérales, les formes organiques contenues dans les acides aminés (Sommers, 1977 cité par Babaarbi, 2013) et dont la dégradation progressive par les micro-organismes du sol permet de libérer l'azote surtout sous forme minérale disponible à toute forme de vie (Nakib, 1986 cité par Babaarbi, 2013).

1.3. Le rapport C/N

D'après Duchauffor (1984), le rapport C/N intervient dans la mesure où il oriente la décomposition de la matière organique, soit vers la minéralisation (C/N bas), plus le

rapport C/N est bas, plus la décomposition de la matière organique fraîche est rapide ; soit vers l'humification (C/N élevé) ; il s'agit ici bien étendu, de la minéralisation dite « primaire ».

Dans notre cas, on a pu observer une augmentation du rapport C/N surtout dans les sols de BBA et Sétif, puisque au bout de 15 jours, ces rapports sont supérieurs à 12, ceci exprime en général de mauvaises conditions de décomposition de la matière organique. En effet, les matières organiques des boues se minéralisent et libèrent de faibles quantités d'azote qui seront totalement consommées par la biomasse microbienne. Par contre au 30^{ème} jour, seul les sols de BBA et de Bouira ont de faibles C/N (\leq à 10) et expriment des conditions favorables de décomposition de la matière organique des boues qui se minéralise rapidement, libère de l'azote minéral et participe peu à l'humification. La formation de l'humus résulte de l'action des êtres vivants qui peuplent le sol (ENITA, 2000). Cet état de fait a été constaté à long terme par Gascó et *al.* (2004) suite à un apport de boues résiduaires. Par ailleurs, le C/N enregistré au 30^{ème} jour dans l'échantillon du sol de Sétif. Ceci serait dû à la richesse du sol en argiles (88.18%) qui constituent des conditions défavorables à la décomposition des matières organiques.

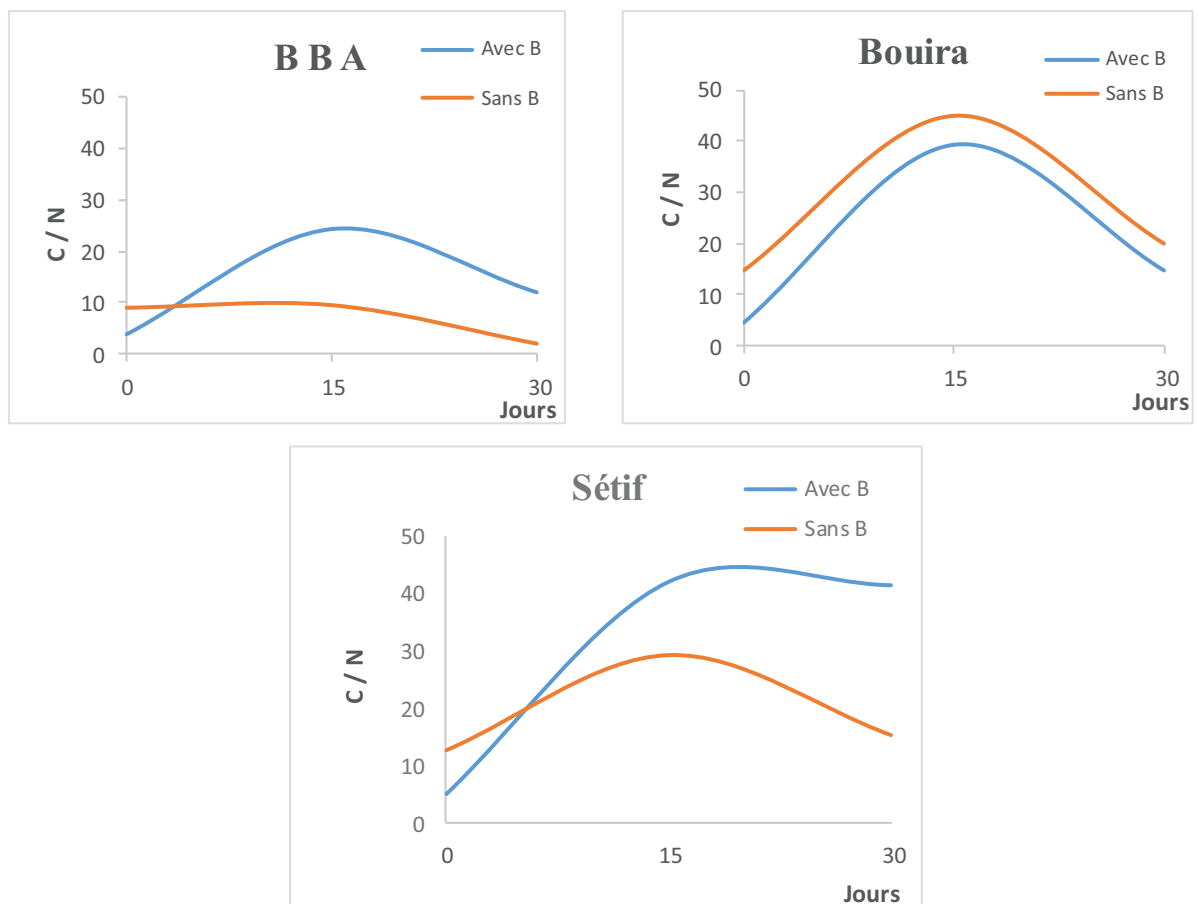


Figure 10 : Evolution du rapport C/N dans les sols témoins et les sols amendés avec les boues

1.4. Le pH

1.4. pH

Contrairement aux sols témoins, une légère diminution du potentiel hydrique a été constatée dans les sols ayant reçu des boues résiduaires ; elle est plus marquée dans le sol de Bouira. Cette diminution du pH des sols est due probablement à la dégradation de la matière organique qui s'accompagne le plus souvent de la libération des éléments qui acidifient le milieu. Les valeurs de pH enregistrées « 7.15 – 7.75 » dans le cas des sols amendés permettent une bonne assimilation des éléments. D'un point de vue pratique, les boues étudiées peuvent être utilisées comme engrais.

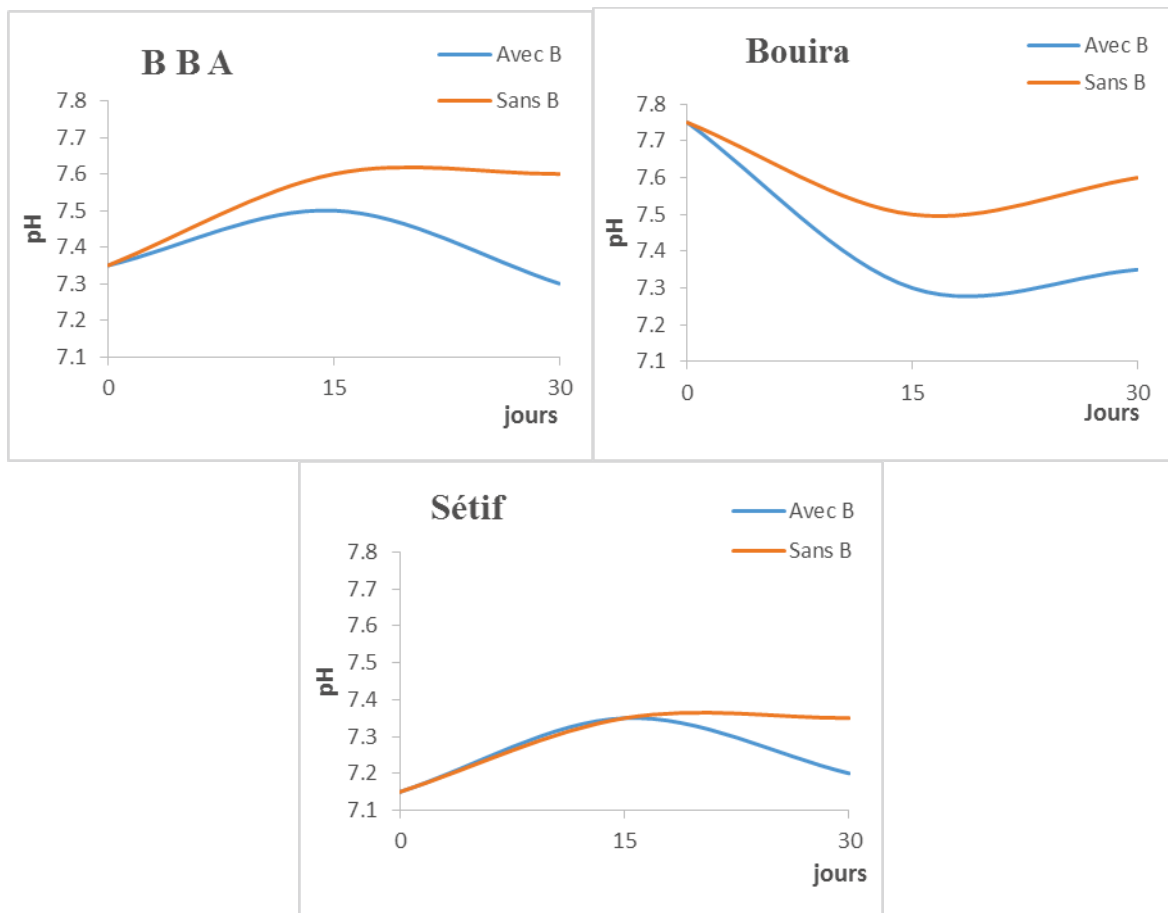


Figure 11 : Evolution du pH_{eau}

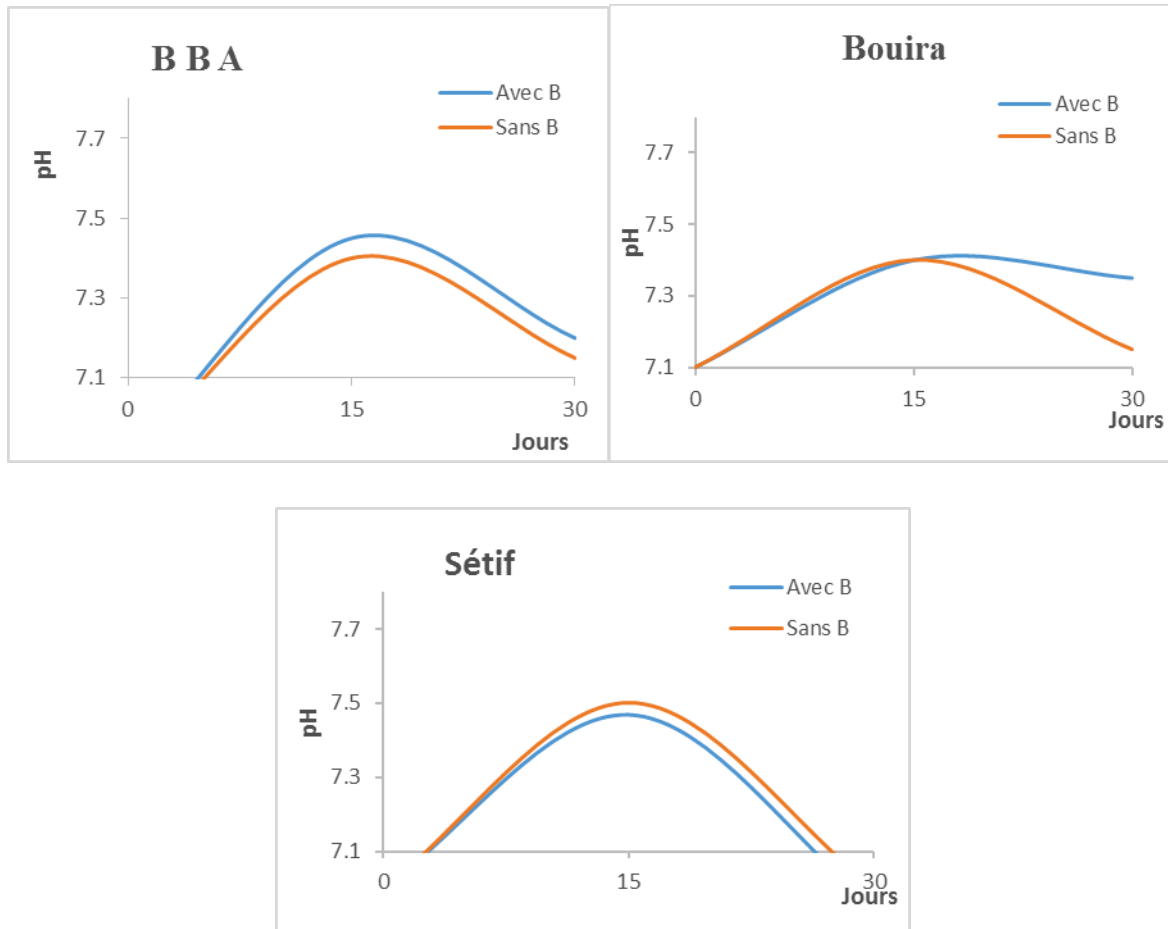


Figure 12 : Evolution du pH_{KCl}

2. Effets des boues sur les paramètres morpho-physiologiques de la plante

Dans le but de connaître l'effet de l'épandage des boues sur certains caractères morpho-physiologiques de la légumineuse cultivée sur des sols ayant reçu un apport de boues, nous avons procédé également à l'évaluation de certains paramètres (hauteur de la plante, matière sèche, teneurs en proline et en pigments chlorophylliens). Ces mesures ont été effectuées à la fin de l'expérimentation (30 jours).

2.1. La hauteur des plantes

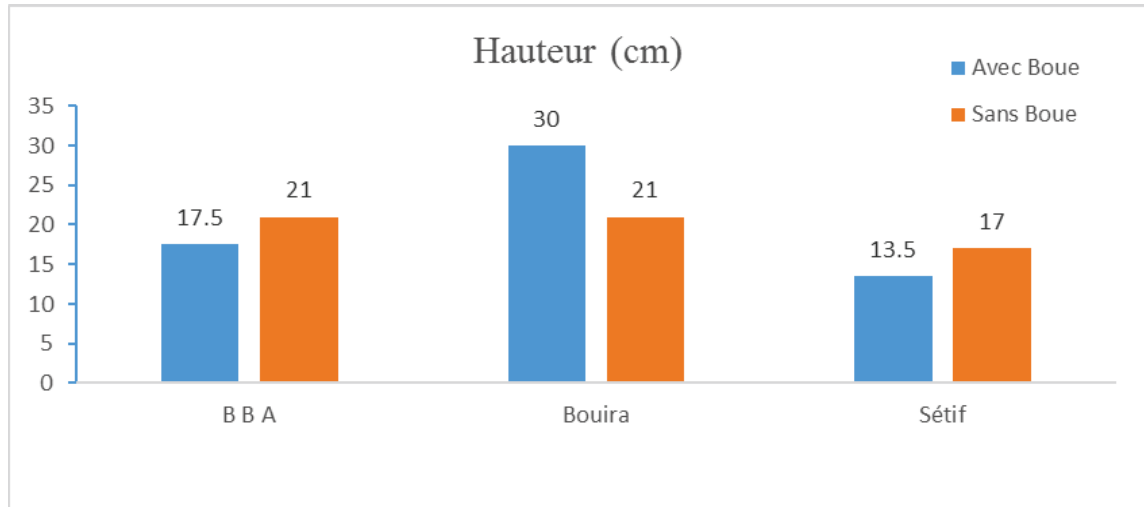


Figure 13 : Effet des boues sur la hauteur des plantes

L'apport de boues favorise une augmentation significative de la taille des parties aériennes du pois dans le sol de Bouira (Figure 13). Cette amélioration de la hauteur des tiges de la plante serait due à la présence de quantités suffisantes de sables, ce qui a permis une bonne aération du sol qui favoriserait ainsi la libération des quantités appréciables en éléments fertilisants, notamment l'azote et le phosphore qui sont assimilés rapidement par la plante.

Par ailleurs, les sols de Sétif et de BBA n'ont pas amélioré la croissance des plantes de pois, ceci est dû probablement à la texture argileuse des sols. En effet, les sols argileux ont des propriétés physiques très mauvaises (milieu imperméable et mal aéré, empêchant une pénétration harmonieuse des racines en raison de la compacité dans le cas d'un sol sec ou de la forte plasticité dans le cas d'un sol humide).

2.2. La Matière sèche des plantes

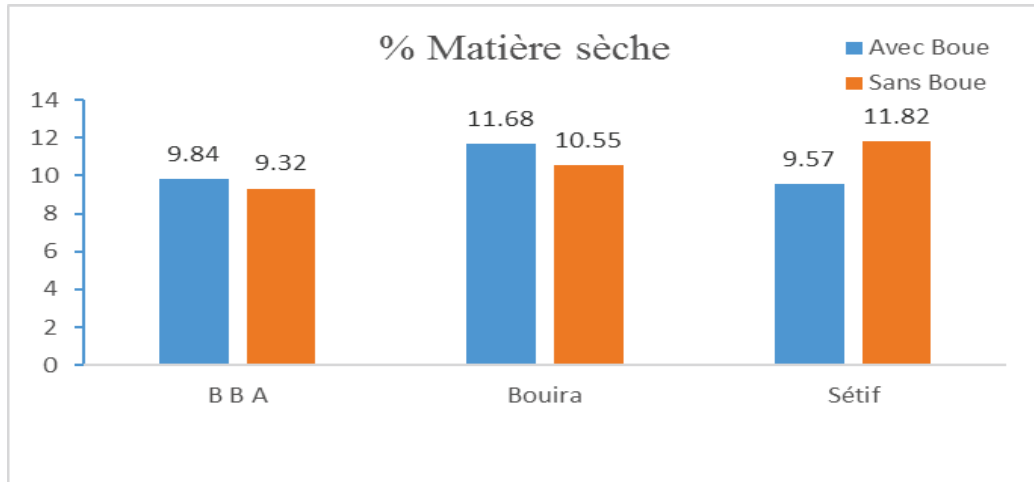


Figure 14 : Effet des boues sur la matière sèche des plantes

Comme pour la longueur, l'addition de boues a amélioré sensiblement les poids de la matière sèche des parties aériennes du pois, notamment dans le sol de Bouira (Figure 14). Cette amélioration serait liée directement à la texture favorable du sol de Bouira, contrairement aux sols de BBA et Sétif.

2.3. La proline

D'après la figure 15, nous constatons que les sols amendés par les boues ont augmenté les teneurs des feuilles en proline, excepté le sol de Bouira. Cette augmentation est plus marquée dans le sol de BBA et moins prononcée dans le sol de Sétif. En effet, la proline est un acide aminé souvent considéré comme un biomarqueur de stress (Dinakar et *al.*, 2008 ; Szabados et Savouré, 2009).

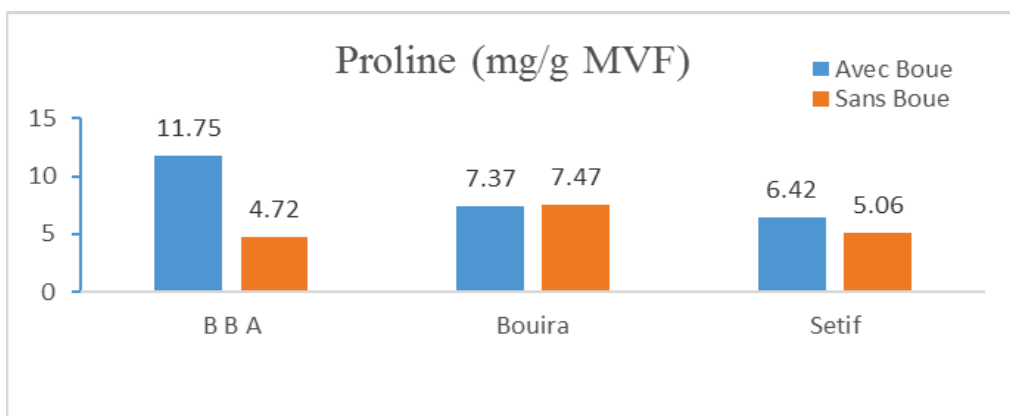


Figure 15 : Effet des boues sur les teneurs en proline dans les plantes

L'augmentation de la teneur en proline dans les plantes cultivées sur les sols de BBA et de Sétif serait liée directement à la richesse des boues en sels qui ont provoqué un dysfonctionnement biochimique des cultures comparable à un stress salin, mais sans perturber la croissance des plantes.

2.4. La chlorophylle totale

La chlorophylle est indispensable pour l'activité photosynthétique de la plante qui consiste à produire de l'énergie chimique (ATP) à partir de l'énergie lumineuse du soleil.

Le sol de BBA présente un taux de chlorophylle important, c'est-à-dire que la photosynthèse évolue parfaitement dans les plantes cultivées sur sol avec boue (figure 16).

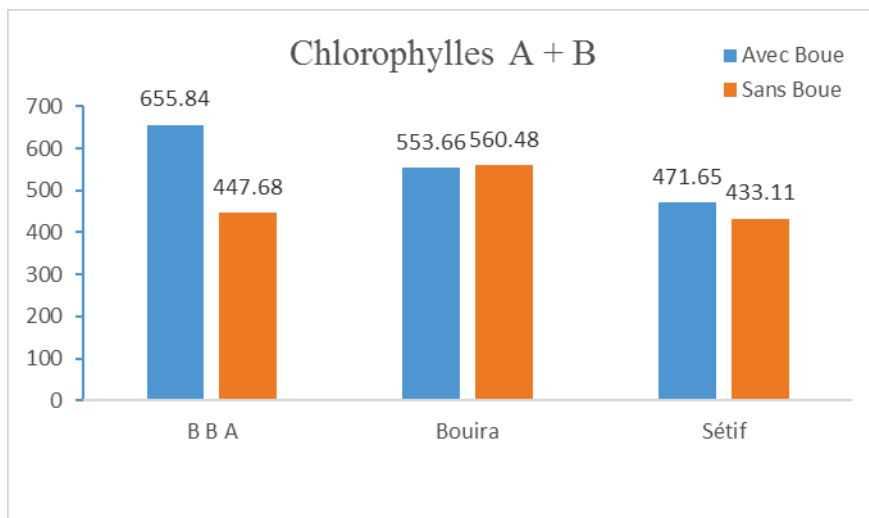


Figure 16 : Effet des boues sur les teneurs en Chlorophylles A et B dans les plantes

Les valeurs obtenues montrent que le développement des cultures sur sol amendés avec les boues se déroule dans les conditions optimales et que la fonction photosynthétique n'a enregistré aucun dysfonctionnement métabolique du ou stress.

Les résultats illustrés sur les figures de la proline et de la chlorophylle montrent une certaine proportionnalité entre les teneurs en proline et les teneurs en pigments chlorophylliens accumulées. La plante qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte augmentation de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa. Ces résultats suggèrent l'existence d'une relation vraisemblable entre les voies de biosynthèse des pigments chlorophylliens et de la proline. Cette évolution pourrait se

traduire par une compétition entre ces deux composés sur leur précurseur commun qui est le glutamate (Bengston et *al.*, 1978 ; Reddy et Veeranjanyulu, 1991).

2.5. Le contenu azoté des plantes

Les résultats de la figure 17 montrent une augmentation du contenu azoté des parties aériennes de la plante, ceci indique que la plante n'est pas affectée par les faibles variations des propriétés du sol, mais au contraire elle semble réagir mieux à l'apport des boues qui sont riches en éléments fertilisants, notamment l'azote.

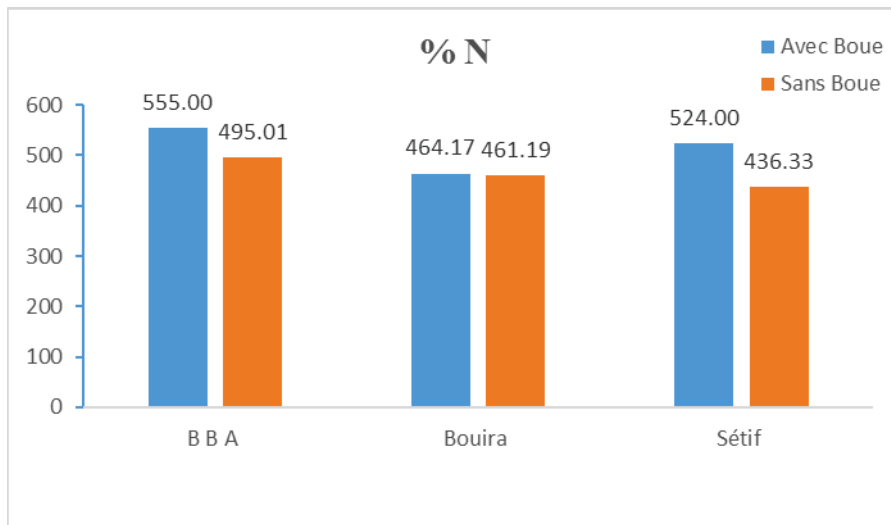


Figure 17 : Effets des boues sur le contenu azoté des plantes

L'efficacité de l'azote des boues mixtes dépend des propriétés du sol (texture, structure, pH) qui influence leur minéralisation (Douglas et Magdoff, 1991). Ceux -ci dépendent aussi des espèces cultivées, l'efficacité fertilisante des boues mixtes étant plus élevée pour les cultures ayant une longue période de croissance et faible pour celles de courte saison (N'dayegamiye et *al.*, 2001).

Conclusion

Le présent travail est une contribution à l'étude de l'impact des boues résiduairees produites dans la station d'épuration des eaux usées de la ville de Bejaia sur, d'une part, quelques propriétés des sols des régions semi-arides de l'Est d'Algérie et, d'autre part, sur le développement et la nutrition minérale d'une culture de légumineuse (*Pisum sativum* L.).

Les résultats obtenus aussi bien sur les aspects pédologiques des sols et sur l'effet des boues sur le développement des plantes de pois, ont permis de dégager un certain nombre de conclusions :

Selon le triangle textural (USDA, 1954), la texture des sols varie d'argileuse dans le sol de Sétif à argilo-limoneuse dans les sols de BBA et de Bouira. Ces sols sont respectivement neutres à légèrement alcalins. Les sols de BBA et de Sétif, avec des teneurs élevées en CaCO_3 total (16 - 47%), sont qualifiés de calcaires. Seul le sol de Sétif est caractérisé par une richesse relative en matière organique et en azote. Par contre, ils sont tous pauvres en phosphore et sont caractérisés par une CEC élevée.

Les résultats des analyses des boues résiduairees ont montré qu'elles présentent une texture argileuse, avec une CEC élevée. Elles sont riches en matière organique et contiennent des teneurs élevées en nutriments à valeur fertilisante, notamment l'azote et le phosphore qui sont important dans l'agriculture.

Par ailleurs, les mesures effectuées sur les sols et reparties à deux intervalles de 15 jours ont montré, quelque soit le traitement, que les taux de carbone et de l'azote diminuent en fonction du temps. Par son apport en matières nutritives, les boues résiduairees ont permis une légère acidification des sols due à une forte augmentation de la biomasse. En effet, l'augmentation de l'activité biologique de la faune et de la flore tellurique s'accompagne le plus souvent par la libération des protons et d'éléments nutritifs, ce qui permet l'amélioration du potentiel nutritif du sol, par conséquent un bon développement végétatif de la plante.

Enfin, l'essai conduit en pots et les mesures biométriques et analytiques effectuées après 30 jours de culture, nous ont permis de mettre en évidence un effet net de l'apport des boues sur le développement végétatif de la plante *Pisum sativum* L. Les effets positifs observés sont l'augmentation de la hauteur, de la matière sèche et des teneurs en chlorophylle des parties aériennes de la plante. Toutefois, des teneurs élevées en proline ont été enregistrées dans les feuilles des plantes de pois cultivées dans sols de BBA et Sétif ayant reçus les boues. Cette augmentation de la proline constitue un signe révélateur d'un stress ou d'un

dysfonctionnement du métabolisme du végétal, ceci est du probablement à la charge des boues en sels ou en ETM.

Malgré l'amélioration de quelques paramètres morphologiques et biochimiques de la plante, notre étude reste cependant incomplète. En effet, la période de l'essai n'est pas suffisante pour apprécier l'influence des boues sur les paramètres de rendement de la culture et sur certaines propriétés physiques des sols.

Ce travail mérite donc d'être approfondi par :

- une étude sur une longue période, en utilisant des boues à des doses variables et d'effectuer des analyses espacées dans le temps.
- une augmentation du nombre de répétitions en pots afin de pouvoir s'appuyer sur l'analyse statistique
- des analyses qui porteront sur la qualité microbiologique pour prévenir les risques dus à la présence des pathogènes.
- une connaissance des substances polluantes et des métaux lourds rejetés par les installations de traitement des eaux usées, ainsi que l'identification de molécules potentiellement problématiques pour l'épandage des boues.

Références
Bibliographiques

ADEME (1996). La valeur azotée des boues résiduaire urbaine (réalisé en collaboration avec l'Institut National Agronomique- Paris-Grignon/ADEPRINA). 336p.

ADEME, (2001). Les valeurs agronomiques des boues d'épuration.

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. Institut National Polytechnique de Toulouse – France, 312p.

Annabi M, Le Bissonais Y, Francou C, Le Villio-Poitrenaud M et Houot S. (2005). Utilisation de composts pour améliorer la stabilité structurale des sols limoneux. *Echo-MO* n° 56 – novembre décembre 2005, 8 p.

ARNON DI. (1949). Cooper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxylase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* **24**, 1-25.

Asdrubal Madeleine. (2006). Fertilisation et amendements : Dossier d'autoformation. Editions *Educagri*, 2^{ème} Edition. France. 131p.

Aubert G. (1978). Méthode d'analyses des sols. Centre nationale de documentation pédologique, CP/Dp. Marseille. 191 P.

Babaarbi S. (2013). L'effet des boues résiduaire sur quelques paramètres phénologiques d'orge (*Hordeum vulgare L.*). thèse d'ingénieur d'état en agronomie saharienne. Université Kasdi Merbah – Ouargla, 33p.

Baize D. (1988). Guide des analyses courantes en pédologie, I.N.R.A, France Jouve, Paris 172p.

Bates LS, Waldren RP et Teare ID. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil.* **39**, 205-207.

Bengston C, Klockare B, Klockar R, Larsson S et Sundquist C. (1978). The after effect of water stress on chlorophyll formation during greening and the level of abscisic acid and proline in dark grown wheat seedlings. *Plant Physiol.* **43**, 205-212.

Bennamoun L. et Leonard A. (2011). Etude expérimentale et modélisation du séchage de boues générées par l'épuration des eaux usées. *Revue des Energies Renouvelables*. **14**(1) : 1 – 12.

Bosma R, Kamara A, Sanogo B. (1994). Parc amélioré. Fiche synthétique d'information. Document ESPRN / Sikasso N° 94 /08. Avril 1994, 25 p.

Bourguignon Claude. (2002). Le sol, la terre et les champs. Editions Sang de la Terre.

Bousselhaj K. (1996). Etude du potential fertilisant (N et P) de deux boues de stations D'épuration par lagunage anaérobie et par boues activées.

Boutebila A S. (1973). Rapport de la délégation algérienne (MARA). Séminaire FAO/PNUD sur la bonification et la mise en valeur des sols sableux au Proche Orient et en Afrique du nord: 24-26.

Brossard M, Mench M, Clairon M. (1989). Effet d'un apport de boue urbaine sur l'évolution à court terme des formes du phosphore d'un sol ferrallitique. CR CFCS Guadeloupe.

Catherine M. (2001). Le maraichage en agriculture biologique : quelques principes de base. *AlterAgri*. **50**. 13-16.

Cheloufi Hamid, Idder Abdelhak, Idder Tahar, Mahma Sid-Ali (2012). Action des boues résiduelles de la station d'épuration des eaux usées de touggourt (algerie) sur un sol sableux cultivé. *Algerian journal of arid environment*. **2**(1) : 77-81.

Cousin et al.(2012). L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols. *Innovations Agronomiques* **21** (2012), 13-29

CSRE, 2003. Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne, 53 P.

Dauchaufour Philippe. (1977). Pédogenèse et classification. Masson, Paris. **1**, 477 p

Dauchaufour Philippe. (1983). Pédogenèse et classification. . 2ème édition . Masson, Paris 491 p.

Dauchaufour Philippe. (1984). Abrégé de pédologie. Tome I. Edition Masson. Paris. 220p.

De Bertoldi, M., Vallini G., Pera A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Manag. Res.* **1**, 157-176.

- Delville L P. (1996).** Gérer la fertilité des terres dans les pays du sahel. 397 P.
- Dembélé I. (1994).** Production et utilisation de la fumure organique. Fiche synthétique d'information. Document ESPGRN N° 94/19,15 Pages.
- Dinakar N, Nagajyothi PC, Suresh S, Udaykiran Y et Damodharam T. (2008).** Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings. *Journal of Environmental Sciences*. **20**, 199-206.
- Douglas B F et Magdoff F R. (1991).** An evaluation of nitrogen mineralization indices for organic residues. *J. Environ. Qual.* **20**: 368–372.
- Durand J H. (1983).** Les sols irrigables, Etude pédologique. Ed. Département de géographie de l'université de Paris. Sorbonne, 389p.
- Elalaoui A.** Fertilisation Minérale des Cultures Les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium, Phosphore), Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTA. *Transfert de technologie en agriculture*. **155**, 2007.
- ENITA (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Travaux Agricoles) de Bordeaux (2000).** Agronomie aux nouvelles orientations. Edition Synthèse agricole. 339p.
- Ferdaous Mani C, Hannachi S, Rezgui et Bouslama. (2007).** Comportement agronomique d'une collection de pois *Pisum sativum* L. *Tropicultura*. **25(4)**, 248-252.
- Gascó G, Martínez-Iñigo MJ et Lobo MC (2004).** Soil Organic Matter Transformation After A Sewage Sludge Application. *Electron. J. Environ. Agric. Food Chem.* **3** (4), 716-722.
- Gervy R. (1970).** Les phosphates et l'agriculture. Edition Dunod, Paris. 298p.
- Grimaud L. (1996).** La valorisation des boues de station d'épuration en agriculture. Mémoire. D.U. "Eau et Environnement", D.E.P., université Picardie, Amiens, 44 p.
- Henri Ricard. (1965).** Engrais et productivité de la terre. Edition Flammarion France. 11-29.
- Huber Gérald et Schaub Christiane. (2011).** La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. *Agricultures & territoires*, chambre d'agriculture. Bas Rhin. 42p

Jarde E, Mansuy L, Faure P. (2003). Characterization of the macromolecular organic content of sewage sludges by thermally assisted hydrolysis and methylation-gas chromatography-mass spectrometer (THM-GC/MS). *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 68-69, 331-350.

Juste C, Pouget R. (1980). Rôle de certaines caractéristiques du sol sur la sensibilité des plantes à la chlorose. *Sci Sol.* **18**, 37-44.

Khelil A. (1999). Nutrition et fertilization des arbres fruitiers et de vigne. ING. Office Des Publications Universitaires, Ben Aknoun, Alger. 10- 14.

Lacee C. (1985). Analyse des boues -AFEE- tome I, 135 p tome II, 127p.

Ladjel F et Abbou S. (2014). Perspectives de valorisation agricole et énergétique des boues issues des STEP en Algérie, ONA. Ministère des ressources en eau. Salon international des équipements, des technologies et des services de l'eau. Oran, 24 et 25 mars, 2014.

Lopez-Bellido L, Fuentes M. (1986). Lupin crop as an alternative source of protein. *Adv Agron.* **40**, 239- 295.

Madriers et Mohen. (2012). Valorisation des boues séchées en agriculture : étude de marché de la valorisation des boues séchées en agriculture sur les départements du 06 et DU 83. Rapport projet ingénierie. Université Nice Sophia Antipolis. 23p

Massenet Jean-Yves. (2013). Cour de pédologie : propriétés physiques du sol. p6.

Mench M, Clairon M, Sobesky O, Nagou D. (1989). Dynamique en temps court de l'azote minéral en sol ferrallitique nu après apport d'une boue urbaine. *Agronomie.* **9**, 785-793.

Meridja Ouafa. (2008). Etude de l'influence des matières organiques (paille, engrais vert) et d'un engrais (Urée) sur la dynamique de l'azote (minéralisation, pool organique) dans un sol brun calcaire de la région de Batna - Incidence sur le comportement d'une graminée fourragère 'Lolium Multiflorum' (biomasse minéralomasse). *Thèse de Magister En Sciences Agronomiques.* Université de Batna. 136p.

Metcalf et Eddy. (2004). Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Fourth Edition, revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, and H. David Stensel. McGraw Hill.

Navas A, Bermudez F, et Machin J, (1998). Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*, **87**. 123-135.

N'Dayegamiye A et Tran T. S. (2001). Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and N nutrition. *Can. J. Soil Sci.* 81: 371-382.

Oueslati MA, Ksontini M, Haddad M, Charbonnel Y. (1995). Compostage des branches d'*Acacia cyanophylla* et des boues fraîches des stations d'épuration d'eaux usées. *Revue Forestière Française.* XLVII 5, 523-529.

Pontailier S. (1971). Engrais et fumure. Que sais-je, point de connaissance actuelle, N° 703, 4^{ème} édition. p127.

Reddy PS, et Veeranjaneyulu K. (1991). Proline metabolism in senescing leaves of horsgram (*Macrotyloma uniflorum* Lam.). *J. Plant. Physiol.* 137, 381-383.

Rejsek F. (2002). Analyse de l'eau : Aspects et règlementaire et technique .Edition Centre Regional de Documentaire technique Pédologique d'Aquitaine .France. 358 p.

Robert M, Gambier P, Christan J. (1994). Conditions de l'utilisation des boues en agriculture. *Cah d'agriculture* 3(5). 279-342.

Sallaheddine Roula. (2005). caractérisation physico-chimiques et valorisation des boues résiduares urbaines pour la confection de substrats de culture en pépinière hors-sol. Thèse de Magister en science agronomique, université de Batna, 115p.

Sastre L, Vicente M A, & Lobo MC. (1996). Influence of the application of sewage sludges on soil microbial activity. *Bioresource Technology.* 57, 19-23.

Scheiner. (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 science agronomique, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 218p.

Singh KP, Mohan D, Sinha S, Dalwani R. (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere.* 55 , 227–255.

Soltner D. (1986). Les bases de la production végétale. Tome I, Le sol [Texte imprimé] : phytotechnie générale : le sol, le climat, la plante. Angers : Sciences et techniques agricoles. 14^{ème} Edition 464 p.

Soltner D. (1988). Phytotechnie ; les bases de la production végétale. Le sol-le climat-la plante. Edition Dunod. 33-43, 51-72.

Soltner D. (1988). Les grandes productions végétales. Les collections sciences et techniques agricoles, 16^{ème} Editions. 464P.

Soltner. (2005). Les bases de la production végétale - Tome I : Le sol et son amélioration. Les collections sciences et techniques agricoles, 22^{ème} Editions. 472P.

Szabados L, Savoure A. (2009). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*. **15**, 89-97.

USDA. (2008). A Plants profil of *Pisum sativum* L. (garden pea) United States Department of Agriculture (*USDA*), *Natural Ressources Conservation Service (NRCS)*. *Plants Database*.

Vilain M, (1989) – La production végétale. Vol 2 : La maîtrise technique de la production. Ed. JB. Baillière.

Werther J, Ogada T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. **25**, 55–116.

Format électronique

AMORCE. (2012). Boues de station d'épuration : technique, valorisation et élimination. Série Technique DT 51. Novembre 36p (http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/2f/af/2fafa8c-4bed-45e0-b40e-75b418fd3147/dt51_boues_de_step_traitement_valorisation_et_limination.pdf). (Consulté 02/05/2015)

Beauchamp J. (2003). Propriétés des sols, Université de Picardie Jules Verne (<http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/sol.htm>). (Consulté 02/05/2015)

Annexes

Annexe I

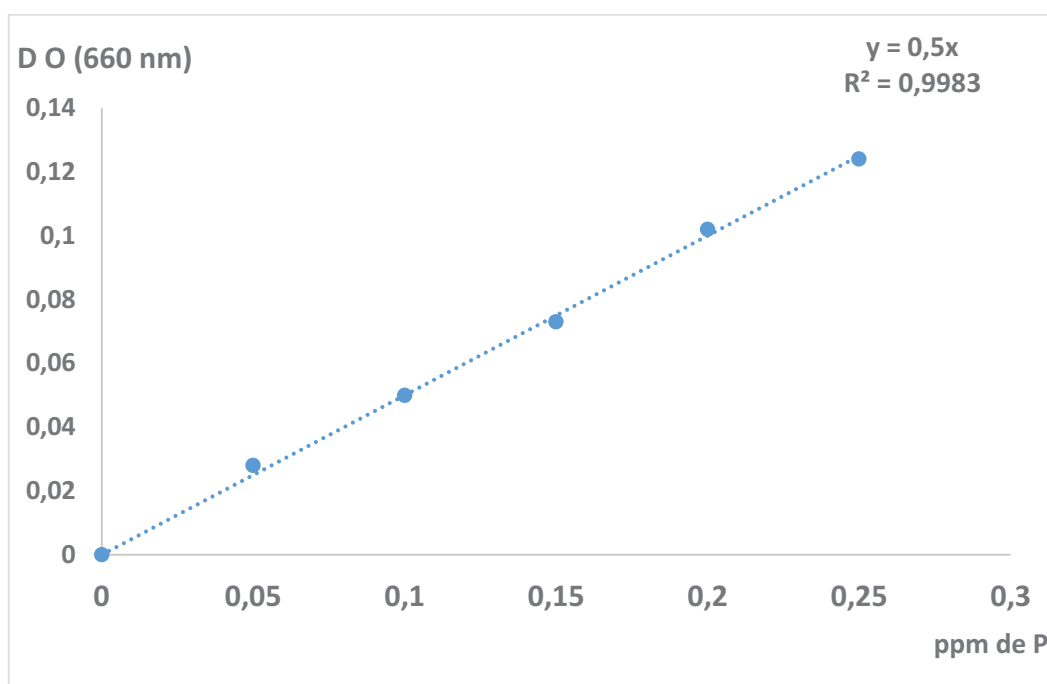


Figure : Courbe étalon phosphore

Annexe II

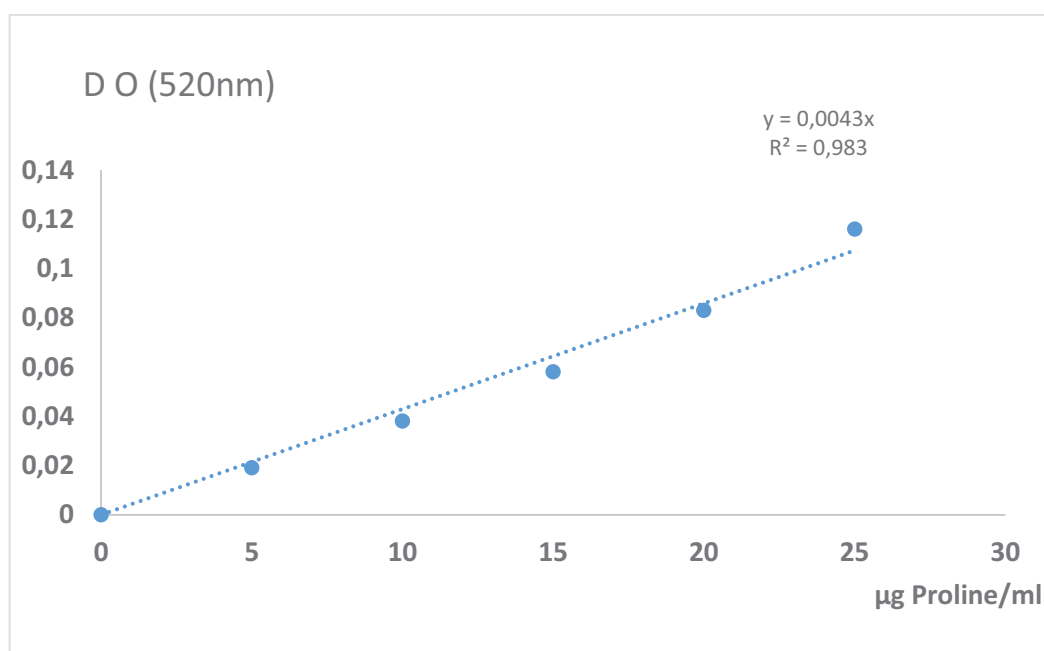


Figure : Courbe étalon de proline

Résumé

Les boues issues de la station d'épuration de la ville de Bejaia ont fait l'objet d'une étude de valorisation agricole et de leur impact sur certaines propriétés des sols des régions semi-arides de l'Est d'Algérie. Les résultats obtenus indiquent que les boues sont de texture argileuse, riches en matière organique et en éléments fertilisants (N, P). Leur apport dans les sols étudiés ont permis d'améliorer, d'une part, la capacité de minéralisation des sols et, d'autre part, le développement végétatif du *Pisum sativum* L., à travers une augmentation de la hauteur, de la matière sèche et des teneurs en chlorophylle.

Mots clés : boues résiduaire, sols, analyse physico-chimique, valorisation agricole, *Pisum sativum* L.

Abstract

Muds resulting from the sewage treatment plant of the town of Bejaia were the object of an agricultural study of valorization and their impact on certain properties of the grounds of the semi-arid areas of the East of Algeria. The got results indicate that muds are of argillaceous texture, rich in organic matter and fertilizing elements (N, P). Their contribution in the studied grounds made it possible to improve, on the one hand, the capacity of mineralisation of the grounds and, on the other hand, the vegetative development of *Pisum sativum* L., through an increase height, dry matter and contents chlorophyl.

Keywords: waste muds, soils, analyzes physicochemical, agricultural valorization, *Pisum sativum* L.