

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche
Scientifique



Université Saad Dahleb-Blida 1
Faculté de science et de la vie (FSNV)

Département de Biotechnologie

Spécialité : Système de production Agro-écologique

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en Science
Agronomique

Mémoire Fin D'étude

Effet de la phytostimulation d'un herbicide sur la
biodisponibilité de P_2O_5 et NO_3^- dans la plaine de Blida

Présenté par :

MEDJAOURI Asma
TADJINE Dalila

Devant le jury :

Président : Mr. DEROUICHE. B	MCA	USB. Blida
Examineur : Mr. ABBED. M	MCA	USB. Blida
Promotrice : Mme Cheloufi. R	MCB	USB. Blida

Année universitaire : 2021 – 2022

Remerciements

Avant tout je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir accordé la force, la santé et les moyens afin de pouvoir accomplir ce modeste travail, et de m'avoir orienté au chemin du savoir et les portes de la science.

Nombreuses sont les personnes que je souhaite remercier pour m'avoir aidée et soutenue durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens en premier lieu exprimer ma plus profonde gratitude, mon plus grand respect à mon enseignante et ma promotrice Madame le **DR. CHELOUFI**, maîtrise de conférences à l'université de Blida. Je vous remercie d'avoir accepté la direction de ce travail, du temps que vous avez bien voulu me consacrer malgré vos charges académiques et professionnelles, pour vos conseils et orientations scientifiques.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères et mon grand respect aux membres du jury, qui m'ont honoré par l'examinasson de mon travail, qu'ils trouvent ici ma plus profonde gratitude.

Je remercie vivement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Merci à **MR. DEROUICHE**, qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury. Je tiens à remercier également **MR. ABBED**, qui a accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci est adressé aussi à **MR. SENOUSSE**, de m'avoir accueillie chaleureusement dans sa serre expérimentale.

Un énorme merci au **MR. ZOUAOUI**, pour m'avoir permis de réaliser ce travail en utilisant ses outils et matériels. Merci pour votre temps et vos conseils

Mon grand Merci le plus spéciale va à mes chers parents pour leurs sacrifices, leur patience, leur confiance en moi, aucune expression n'estime ma reconnaissance et ma fierté d'avoir des parents comme vous.

A mes sœurs **FADWA** et **HADJER**, ma source de bonheur et de joie, à mes adorables amies, pour leur présence, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et que j'ai oublié de citer.

Merci à vous tous !

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amour, leurs tendresse, leurs soutien et leurs prières tout aux longs encouragements et leurs soutien moral.

À mon binôme Dalila, tous mes amis (es) et collègues Sans exception. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

✓ À mes chères sœurs Fadwa et Hadjer pour leurs que ce projet soit possible, je vous dis merci.

MEDJAOURI Asma

Liste des figures

Figure 1: Schéma simplifié du cycle de l'azote	10
Figure 2: cycle de phosphore.....	15
Figure 3: Morphologie d'une plante de pois chiche.....	20
Figure 4: Effets du 2,4-D sur la mobilisation du phosphore assimilable dans le S1 de Halouia. .	29
Figure 5: Effets du 2,4-D sur la mobilisation du phosphore assimilable dans le S2 de Mefteh. ..	31
Figure 6: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du P ₂ O ₅ dans le S1 de Halouia.	32
Figure 7: effet de la phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du P ₂ O ₅ dans le S2 de Mefteh	34
Figure 8: Effets du 2,4-D sur l'évolution de nitrate dans le sol (S1) de Halouia.	35
Figure 9: Effets du 2,4-D sur l'évolution de nitrate dans le sol (S2) de Mefteh	37
Figure 10: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution du NO ₃ ⁻ dans le S1 de Halouia.	39
Figure 11: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution du NO ₃ ⁻ dans le S2 de Mefteh	40

Liste des tableaux

Tableau 1: critères d'appréciation de la fertilité du sol.....	6
Tableau 2: les caractéristiques morphologiques de pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>).....	19
Tableau 3: Caractéristiques physicochimiques des deux sols étudiés.....	27
Tableau 4: Dispositif expérimental	29
Tableau 5: Taux d'inhibitions de 2.4-D (S1 et S2)	32
Tableau 6: La stimulation de 2.4-D sur la libération du nitrate dans les sols	35
Tableau 7: Taux d'inhibitions du glyphosate (S1 et S2).....	38
Tableau 8: La stimulation de 2.4-D sur la libération du nitrate dans les sols	41

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique

CEC : Capacité d'échange cationique

CR : Capacité de rétention en eau CR

CT : Calcaire totale

Ca : calcium

K : Potassium

Na : Sodium

Mg : Magnésium

MO : Matière organique

N_T : Azote totale

C : carbone

RESUME

Effet de la phytostimulation d'un herbicide sur la biodisponibilité de P_2O_5 et NO_3^- dans la plaine de Blida.

Ce travail porte sur l'étude de l'effet de la phytostimulation de l'herbicide 2.4-D sur l'évolution de l'azote nitrique et du phosphore assimilable dans le sol de périmètre irrigable de Mitidja. Pour cela, nous avons employons une fabacée de *Cicer arietinum* a été plantée dans pots des sols de périmètre irrigable de Mitidja.

Les résultats obtenus confirment l'effet nocif du 2.4-D vis-à-vis les microflores contrôlant la minéralisation de l'azote organique et du phosphore organique dans les sols de Halouia et de Meftah d'un côté, et d'autre coté, la bio augmentation par une souche *Rhodococcus fascians* provoque significativement l'augmentation de libération de NO_3^- et de P_2O_5 et contribue éventuellement à une meilleure dégradation de l'herbicide 2.4-D.

Mots clés : 2.4-D, *Cicer arietinum*, phytostimulation, Azote nitrique, Phosphore assimilable, inhibition et stimulation.

ملخص

تأثير التحفيز النباتي لمبيدات الاعشاب على التوافر الحيوي للفوسفور والنيروجين في مستوى البلدية. يركز هذا العمل على دراسة تأثير التحفيز النباتي لمبيد الاعشاب 4.2-د على تطور النيتروجين والفوسفور القابل للاستيعاب في تربة محيط الري في متيجة. لهذا الغرض, استخدمنا فاسيا من سيسار اريوتنوم كانت مزروعة في اواني من التربة في محيط متيجة القابل للري.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها التأثير الضار ل 4.2-د على النباتات الدقيقة التي تتحكم في تمعدن النيتروجين العضوي والفوسفور العضوي في التربة الهاوية والمفتاح من ناحية , ومن ناحية اخرى , فان الزيادة الحيوية بواسطة سلالة رودوكويس فاسياناس تسبب بشكل كبير في اطلاق النيتروجين والفوسفور وربما تساهم في تدهور اكبر لمبيدات الاعشاب . 2.4-د .

الكلمات المفتاحية 4.2-د , سيسر اريوتنوم , التحفيز النباتي , النيتروجين , الفوسفور , القابل للاستيعاب , التحفيز , التثبيط.

ABSTRACT

Affect of phytostimulation of a herbicide on the bioavailability of P₂O₅ and NO₃⁻ in the Blida plane

This Works focuses on the study of the effect of phytostimulation of the herbicide 2.4-D on the évolution of nitric nitrogen and assimilable phosphorus in the soil of the irrigable perimeter of Mitidja. For This, we used a fabaceae of *Cicer arietinum* was planted in pots of soils of irrigable perimeter of Mitidja.

The results obtained confirm the harmful effect of 2.4-D on the microflora controlling the mineralization of organic nitrogen and organic phosphorus in the soils of halouia and meftah on the one hand, and on the other hand, the bioaugmentation by a *Rhodococcus fascians* strain significantly causes the increase in NO₃⁻ and P₂O₅ release and possibly contributes to a better degradation of the 2.4-D herbicide.

Keywords: 2.4-D, *Cicer arietinum*, phytostimulation, nitric nitrogen, assimilable phosphorus, inhibition and stimulation.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
I. Généralité sur les herbicides	3
I.1. Définition des herbicides.....	3
I.2. Mode d'action	3
I.3. La classification des herbicides.....	3
I.3.1. Herbicides à pénétration racinaire	3
I.3.2. Herbicides à pénétration foliaire.....	4
I.3.3. Les herbicides de contact.....	4
I.3.4. Les herbicides systémiques.....	4
I.4. Effets des herbicides sur l'environnement	4
I.4.1. Effets sur la ressource en eau.....	4
I.4.2. Effets sur les organismes aquatiques	4
I.4.3 Effets sur la qualité de l'air.....	4
I.4.4 Effets sur l'homme	5
I.5. Le devenir des herbicides dans le milieu	5
II. Généralité sur le sol	5
II.1. Définition	5
II.2. Composition du sol	6
II.3. Fertilité du sol	6
II.3.1. Détermination de la fertilité d'un sol.....	7
II.3.1.1. Le diagnostic visuel	7
II.3.1.2. L'analyse de la plante	7
II.3.1.3. Les tests biologiques.....	8
II.3.1.4. Le test du sol.....	8
II.5. Problèmes de dégradation du sol et faible fertilité du sol.....	8
III. Généralité sur l'Azote et le Phosphore	9
III.1. l'azote dans les sols	9
III.1.1. Définition	9
III.1.2. Le rôle de l'azote.....	9
III.1.3. Origine de l'Azote.....	9
III.1.4. Cycle de l'Azote.....	10

III.2. Le phosphore dans les sols	12
III.2.1. Généralité sur le phosphore.....	12
III.2.2. Importance du phosphore en production végétale	12
III.2.3. Sources de phosphore.....	13
III.2.4. Forme du phosphore dans le sol.....	13
III.2.4.1. Phosphore total	13
III.2.4.2. Le phosphore minéral.....	13
III.2.4.3. Le phosphore organique	13
III.2.4.4. Phosphore assimilable	14
III.2.5. Dynamique du phosphore dans le sol	14
III.2.6. Cycle du phosphore.....	14
IV. Généralité sur la <i>phytoremédiation</i> par <i>Cicer arietinum</i>	15
IV.1. Définition.....	15
IV.2. Principes et mécanisme de la Phytostimulation	16
IV.3. les différentes techniques de la phytoremédiation	16
IV.3.1. Phytoextraction	16
IV.3.2. Phytostabilisation.....	17
IV.3.3. Rhizofiltration.....	17
IV.3.4. Phytodégradation	17
IV.3.5. Phytovolatilization.....	17
IV.4. l'importance et utilisation de la phytoremédiation.....	17
IV.5. Avantage.....	18
IV.6. Les incovinants.....	19
IV.7. Etude exemple de Légumineuse <i>Cicer arietinum</i> (Pois chiche)	19
IV.7.1. Caractéristiques morphologiques.....	19
IV.7.2. Classification botanique du pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>) (Davies et al., 2007). 20	
IV.7.3. Production et commerce du pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>) en Algérie	20
IV.7.4. Les étapes de développement de nodulation	21
IV.7.4.1. Pré-infection.....	21
IV.7.4.2. Infection	21
IV.7.4.3. Fonctionnement ou maturité des nodules.....	21
IV.7.4.4. Dégénérescence.....	21
V. Matériels et méthodes.....	23
V.1. Matériels	23

V.1.1. Sol	23
V.1.1.1. Localisation des sites	23
V.1.1.2. Prélèvement	23
V.1.2. Climat de région	23
V.1.3. Herbicides	23
V. 1.4. Le végétal	23
V.2. Méthodes.....	24
V. 2. 1. Analyses physico-chimiques du sol	24
V.2.1.1. La granulométrie	24
V.2.1.2. La capacité de rétention en eau	24
V.2.1.3. Le pH.....	24
V.2.1.4. Le Calcaire total	24
V.2.1.5. Le carbone total	24
V.2.1.6. Matière organique.....	24
V.2.1.7. L'azote total.....	25
V.2.1.8. Dosage de l'azote minéral (l'azote ammoniacal, l'azote nitrique).....	25
V.2.1.9. La capacité d'échange cationique (CEC)	25
V.2.1.10. Le phosphore assimilable	26
V.2.1.11. Dosage de l'azote minéral (l'azote nitrique)	26
V.2.2. Le taux d'inhibition ou de stimulation des herbicides	26
V.2.3. Analyse de variance	26
V.2 .4. Résultats des analyses des Caractéristiques analytiques propriétés physico- chimiques des sols.....	26
V.3. Technique expérimentale	28
V.3.1. Les pots	28
VI. Résultat et discussion	29
VI.1. Effet d'herbicide 2 ,4-D sur l'évolution du phosphore assimilable dans les deux sols	29
VI.1.1. Effet d'herbicide 2 ,4-D sur l'évolution du phosphore assimilable dans le sol (1) de Halouia.....	29
VI.1.2. Effet d'herbicide 2 ,4-D sur l'évolution et la production du phosphore assimilable dans le sol (2) de Mefteh.....	31
VI.1.2. Effet d'inhibition du 2.4-D sur la libération de P ₂ O ₅ dans les sols.....	32

VI.1.3 Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans les sols des périmètres irrigables de Mitidja.....	32
VI.1.3.1. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans le sol de Halouia.....	32
VI.1.3.2. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans le sol de Mefteh.....	34
VI.1.4. Effet de stimulation de 2,4-D sur la libération du nitrate dans les sols	35
VI.2. Azote nitrique	35
VI.2.1. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO ₃ ⁻ dans les deux sols	35
VI.2.1.1. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO ₃ ⁻ dans le sol (S1) de Halouia	35
VI.2.1.2. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO ₃ ⁻ dans le sol (2) de Mefteh	37
VI.2.2. Effet d'inhibition du glyphosate sur la libération du nitrate dans les sols.....	38
VI.2.3.2. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique dans le sol (S2) de Mefteh	40
VI.2.4. Effet de stimulation de 2,4-D sur la libération du nitrate dans les sols	41
CONCLUSION	42
REFERENCES.....	43

INTRODUCTION

La pollution des sols est un problème mondial majeur qui tire ses origines de sources anthropiques. L'augmentation de la demande alimentaire nécessite l'utilisation de pesticides, qui sont jusqu'à présent le moyen de protection prépondérant contre les ravageurs des cultures. Au fil du temps, l'utilisation massive des pesticides a conduit à leur dissémination et persistance dans tous les milieux de l'environnement y compris le sol (**Carvalho, 2017**).

Dans ce contexte, les travaux de (**Migango et al., 2009, Cheloufi et al., 2019**), ont fait ressortir un effet négatif des herbicides sur les microflores et le fonctionnement biologique des sols. Aussi, les travaux de (**Zouaoui et al., 2013**) et de **Cheloufi et al., (2017b)** révélèrent des effets négatifs des herbicides Topique et Zoom sur les processus de minéralisation de C et N organique dans les sols de la région de M'hidi (plaine d'Annaba).

Dans les but de provoquer la dégradation de ces de substances toxiques, différents procédés de type biologique qui nécessitent de l'emploi des méthodes de bio remédiation qui semble le plus appliqué durant les dernières décades et ce en raison de l'intensification agricole et des méfaits provoqués par ces intrants dans les sols. Parmi ces procédés, la rhizodégradation, de telles façons, la dégradation des substances herbicides se fait par les microflores de la rhizosphère des légumineuses.

Dans leurs recherches (**Plassard et al. 2015**), ont constaté que des plantes lesquelles conduisent à une dégradation des biocides par leur exsudat racinaire dans la rhizosphère et améliorent la biodisponibilité du phosphore. Dans leurs travaux (**Mukherjee I, 2009 ; Monard et al, 2010 ; Kersante A., 2003**), (**Cheloufi et al., (2016)** et **Cheloufi et al., (2017)** ont utilisé deux souches rhizobactériennes et plus particulièrement certaines du genre *Pseudomonas* et ont constaté que ces bactéries améliorent la dégradation de ces deux herbicides dans les sols. Ceci conformément aux travaux de (**Monard et al, 2008b**), ces groupes bactériens sont capables d'utiliser le Glyphosate comme seule source de phosphore et le métabolisent en AMPA qui est lui-même ensuite minéralisé en CO₂ et P, N, S..etc.

Parmi les herbicides, le 2.4-D représentent les produits les plus utilisés en Algérie et en Afrique, et ce du fait que ce dernier biocide constitue un ingrédient actif d'une gamme importante d'herbicides (organochloré). Leurs effets nocifs dans les sols ont donné lieu à de

nombreuses études et investigations (Zabaloy et al., 2008 ; Allegrini et al., 2015). Il en ressortait globalement que cet herbicide exercent des effets dépressifs sur les bactéries, champignons, actinomycètes (Cheloufi et al., 2019).

Dans le périmètre agricole de Mitidja, le 2.4-D est fréquemment utilisés par les agriculteurs car il est moins coûteux. Donc, il serait alors intéressant de caractériser leurs effets négatifs sur les sols de ce périmètre. C'est dans ce contexte que s'insère notre travail dont l'objectif principal est de la bio-remédiation des sols traités par le 2.4-D, une fabacée de type de *Cicer arietinum* plantée dans les pots peut-elle contribuer à une meilleure décomposition de cet herbicide par ses nodules ? Quel serait alors leur l'importance de son impact sur la libération des éléments majeurs (N et P) dans les deux sols (Halwia et Mefteh) ? Quelle serait alors l'importance de ces nodules dans la stimulation ?

Ce manuscrit traite quatre aspects suivants :

1. Effet de l'herbicide (2.4.D) sur l'évolution de l'azote nitrique (NO_3^-) et du phosphore assimilable (P_2O_5) dans les sols.
2. Les taux d'inhibition du 2.4-D vis-à-vis les rhizobactériennes .
3. Effet de la phytostimulation de 2.4.D par *Cicer arietinum* sur l'évolution de l'azote nitrique (NO_3^-) et de phosphore assimilable(P_2O_5) dans les deux sols.
4. Les taux de stimulation de pois chiche vis-à-vis la microflore de la rhizosphérique.

I. Généralité sur les herbicides

Avant l'utilisation généralisée des herbicides chimiques, on avait recours à des méthodes de lutte culturale, par exemple en modifiant le pH du sol, la salinité, ou les niveaux de fécondité, pour lutter contre les mauvaises herbes. La lutte mécanique (qui comprend le travail du sol) a également été utilisée dans ce but et l'est encore.

I.1. Définition des herbicides

Les herbicides (désherbants) sont des substances chargées de ralentir la croissance ou de détruire les plantes cibles. Ce sont des matières actives ou des produits formulés ayant la propriété de tuer les végétaux (Coulibaly, 2005 ; Edelahid, 2004). En agriculture, les herbicides sont appliqués sur plusieurs type de cultures, tel que les céréales (Bérard, 1994).

I.2. Mode d'action

Selon les modes d'action des herbicides sont fondés sur :

- la perturbation de la photosynthèse .
- l'inhibition de la synthèse des lipides .
- l'inhibition de la synthèse des acides aminés .
- la perturbation de la régulation de l'auxine .
- l'inhibition de la division cellulaire à la métaphase .
- l'inhibition de la synthèse des caroténoïdes (pigments protecteurs des chlorophylles).
- l'inhibition de la synthèse de l'enzyme PPO (protoporphyrinogène oxydase) conduisant à la synthèse des chlorophylles.
- la dérégulation des pH entre les différents compartiments cellulaires ou découplant.
- la perturbation de la croissance.

I.3. La classification des herbicides

Les herbicides se distinguent par rapport à leur voie de pénétration dans les végétaux et à leur déplacement dans la plante :

I.3.1. Herbicides à pénétration racinaire

Appliqués sur le sol, ils pénètrent par les organes souterrains des végétaux (racines, graines, plantules), ce sont les traitements herbicides de prélevée, effectués avant la levée de la plante considérée (culture ou mauvaise herbe).

Exemple : le métolachlor applicable en culture de cotonnier.

I.3.2. Herbicides à pénétration foliaire

Appliqués sur le feuillage, ils pénètrent par les organes aériens des végétaux (feuilles, pétioles, tiges), ce sont les traitements herbicides de post-levée, effectués après la levée de la plante considérée (culture ou mauvaise herbe).

Exemple : le paraquat en désherbage total ..

I.3.3. Les herbicides de contact

Qui agissent au point d'impact du produit sur la plante.

I.3.4. Les herbicides systémiques

Ils sont plus complexes ; assimilés par les feuilles ou les racines et transportés dans les différentes parties de la plante.

I.4. Effets des herbicides sur l'environnement

Dans le cas de la mise en marché de produits utilisables en agriculture, l'évaluation des risques permet de définir si un produit est néfaste ou non pour l'environnement et l'homme. Le principe de précaution, qui est un élément important dans la démarche de mise en marché des produits utilisables en agriculture, peut alors s'appliquer. Malgré, les atouts incontestables des herbicides, l'autre face est malheureusement nuisible néfaste pour l'homme, pour la faune et grosso modo, pour l'environnement.

I.4.1. Effets sur la ressource en eau

Selon **OMS, (2015)** les concentrations maximales admises des eaux destinées à la consommation humaine, par substance et pour l'ensemble des substances, sont respectivement de 0,1 à 0,3 μ g/l pour les eaux de boisson, et de 1 à 4 μ g/l pour les eaux brutes.

I.4.2. Effets sur les organismes aquatiques

Pour ce qui est des organismes aquatiques, le système d'évaluation de la qualité des eaux, reconnaît des concentrations au-dessus desquelles le maintien de la diversité et ainsi que celui de l'abondance spécifique est difficile. La toxicité de l'herbicide est avérée sur le milieu aquatique (effet inhibiteur sur les plantes aquatiques, mort d'invertébrés pour de faibles doses : 0,2 à 7 mg/litre d'eau pendant 2 jours d'exposition (**Kersante, 2003**)).

I.4.3 Effets sur la qualité de l'air

La présence de produits phytosanitaires dans l'atmosphère a été démontrée aussi bien en milieu rural, qu'en milieu urbain (**Trevisan et al., 1993**). Ces composés peuvent être soumis au

transport atmosphérique. La diffusion est possible sur de grandes distances comme en témoigne la détection de pesticides organochlorés dans les précipitations en antarctique (**Bidleman et al, 1993**).

I.4.4 Effets sur l'homme

La présence des herbicides dans le sol, l'air, l'eau, les êtres vivants et les aliments, implique une menace pour la faune aquatique et terrestre, et bien entendu pour l'homme pour lequel elle peut se manifester sous forme d'intoxication aiguës ou chroniques (**Rammade, 2007**). La répercussion connues de l'utilisation des herbicides sont nombreuses (Marc, 2004). Elles sont d'ordre cancérigènes (**Alavanja et al., 2004**), à caractère perturbateur du développement du fœtus chez la femme (**Marc, 2003**), de dérèglement des systèmes producteurs endocriniens, d'effets immunitaires et nerveux (**Marc, 2002**).

I.5. Le devenir des herbicides dans le milieu

Comme les autres pesticides, les herbicides se dégradent plus ou moins rapidement après leur application dans le milieu :

- Ils participent en partie au métabolisme dans la plante cible (**Barriuso et al., 2000**).
- D'après les études réalisées en milieu tempéré, une faible part est exportée par volatilisation dans l'air, par ruissellement par les pluies ou par lessivage dans les couches inférieures du sol (**Brusseau et Rao, 1990**).
- Une part est adsorbée par les argiles et les matières organiques du sol avant de subir une dégradation biochimique et microbiologique (**Banton et al., 1997**).

II. Généralité sur le sol

II.1. Définition

Le sol est un milieu naturel à propriétés essentiellement dynamiques, différencié en horizons à constituants minéraux et(ou) organiques généralement meubles, résultant de la transformation d'une roche mère sous-jacente, sous l'influence de divers processus chimiques, physico-chimique et biologiques. Ces horizons diffèrent de la roche mère par certains caractères morphologiques, physiques, chimiques et biologiques.

Le sol est le support des végétaux, le milieu dans lequel, grâce à leurs racines, les plantes se procurent l'eau et les éléments nutritifs dont elles ont besoin.

II.2. Composition du sol

Selon **Boulaine (2003)**, le sol est un système à phases ou à composantes multiples, il est un mélange à proportions égales de constituants minéraux, organiques, de l'eau et de l'air. Le sol est constitué théoriquement de presque de 45% de matière minérale, 5% de matière organique, 25% de l'air. La phase solide est constituée de minéraux et de matières organiques.

- Les constituants inorganiques ont des dimensions variables allant des colloïdes aux graviers de dimensions supérieures à 2mm (on peut avoir aussi des cailloux et des pierres). Ces constituants sont des fragments rocheux, des minéraux primaires et des minéraux secondaires.

- Les constituants organiques comprennent les résidus végétaux à décomposition et des animaux à des stades variés de composition mais aussi de l'humus.

II.3. Fertilité du sol

La fertilité d'un sol peut se définir comme étant son aptitude permanente à produire beaucoup sous un climat lorsqu'on lui applique les techniques agricoles qui lui conviennent les mieux . Le tableau I présente différents critères d'appréciation de la fertilité du sol.

Tableau 1: critères d'appréciation de la fertilité du sol (Duchaufour, P. (1977)).

Propriétés du sol	Critères d'appréciation de la fertilité du sol
Profondeur	Une grande profondeur offre un grand espace aux racines et une grande réserve de matières nutritives et d'eau du sol. Les racines profondes sont aussi préservées de dessiccation lors de sécheresse
Texture et structure	Les grains moyens et une bonne structure comme critère d'une bonne fertilité favorisent un bon développement du système racinaire, une bonne infiltration et conservation de l'eau et une bonne aération. La texture peut aussi donner une idée sur les réserves minérales du sol, une fine texture laissant présager une teneur élevée en éléments minéraux
Réaction du sol	Le pH (optimum) variable avec les cultures est souvent signe du niveau du calcaire dans le sol. Il donne aussi une idée sur l'assimilabilité des différents éléments nutritifs du sol et surtout des oligo-éléments

Composition minéralogique du substrat parental	Un substrat parental homogène donne un sol pauvre en éléments nutritifs et fournit une alimentation déséquilibrée. Par contre, un substrat hétérogène donne un sol riche en divers éléments nutritifs et fournit une alimentation plus ou moins équilibrée.
Teneur en éléments Nutritifs	Une teneur en réserve des éléments nutritifs et une teneur optimale de la fraction mobile favorisent une croissance optimale et soutenue des plantes.
Teneur et composition de l'humus	Les colloïdes humides améliorent la structure du sol, forment des complexes facilement mobilisables avec les substances minérales et activent la vie des microorganismes auxquels ils servent de support et d'aliment.
Capacité du complexe absorbant	Une haute capacité du complexe absorbant constitue un pouvoir tampon bénéfique pour les plantes dans le cas d'excès de la fumure; elle protège en même temps les Plusieures méthodes permettent de déterminer l'état de fertilité du sol d'une région. Citons : éléments nutritifs contre l'entraînement par les eaux d'infiltration.

II.3.1. Détermination de la fertilité d'un sol

II.3.1.1. Le diagnostic visuel

Se basant sur les symptômes que présente la plante suite à une carence ou l'absence d'un élément au niveau du sol. Cette méthode est rapide mais présente des inconvénients dont : les symptômes de carence doivent être assez développés pour pouvoir être identifiés, ce qui peut être trop tard pour la plante ; les symptômes de carence peuvent être compliqués ou supprimés par certains facteurs comme le mauvais temps, les insectes et les maladies.

II.3.1.2. L'analyse de la plante

Les concentrations élémentaires sont déterminées par des méthodes de laboratoire généralement compliquées. Le principal inconvénient de ces méthodes est qu'elles sont coûteuses. De plus, quand les résultats indiquent une carence, il est en général trop tard pour y remédier. L'analyse de la plante n'est utile que pour les plantes vivaces (de longue durée, pérennes) (Mulumuna, cité par Kamenyenzi, 2013).

II.3.1.3. Les tests biologiques

Ces tests de laboratoire sont basés sur le principe que les besoins généraux en éléments nutritifs, (minéraux) des micro-organismes sont semblables à ceux de certains végétaux. L'avantage de ces tests est que, contrairement aux expériences sur le terrain, ils peuvent être réalisés rapidement (en 3-4 jours). Mais comme il existe toujours des discussions sur la validité de la méthode l'interprétation n'a pas encore obtenu une large acceptation (UNIFA,2006).

II.3.1.4. Le test du sol

Le test du sol est une meilleure méthode que l'observation des symptômes de carence et l'analyse de la plante, car il permet de déterminer le besoin de la plante en éléments nutritifs avant la plantation. Il est plus simple et prend moins de temps que la méthode biologique. L'analyse du sol elle-même est plutôt compliquée et c'est un travail de laboratoire. L'une des phases les plus critiques de l'analyse du sol est la procédure d'échantillonnage.

II.4. Les expériences sur le terrain :

La méthode la plus sûre et la plus satisfaisante pour déterminer la quantité optimale d'engrais ou de fumier à utiliser est basée sur plusieurs séries d'expériences sur le terrain (fermes expérimentales, champs de paysans). Quoique ces expériences donnent des résultats sûrs, ceux-ci ne s'obtiennent en générale qu'après plusieurs années d'essais. Leur principal inconvénient est qu'elles exigent du temps et de l'argent. Le paysan moyen ne peut généralement pas se permettre de tels frais (GROS, 1967).

II.5. Problèmes de dégradation du sol et faible fertilité du sol

Les formes reconnues de dégradation du sol sont l'érosion, la dégradation physique, chimique et biologique, la salinisation et la pollution (Soltener, 2000). La dégradation chimique inclut plus l'acidification que la diminution de la teneur en élément nutritifs.

Les dégradations sont étroitement liées la dégradation biologique influence à la fois les propriétés physiques du sol et les éléments nutritifs, tandis que l'érosion est une cause de dégradation biologique et de perte d'éléments nutritifs.

Toutes ces formes de dégradation entraînent une baisse de la fertilité du sol et de la productivité de la terre. Cependant c'est l'effet combiné de la diminution de la matière organique du sol, de la détérioration de ses propriétés physiques, de la réduction de la teneur

en éléments nutritifs et (dans certains cas) de l'acidification qui est généralement désignée sous le nom de déclin de la fertilité.

Le déclin de la fertilité du sol, parfois traduit par des faibles rendements des cultures, est l'un des problèmes le plus souvent observé dans un large éventail d'environnement.

Non seulement la dégradation du sol abaisse les rendements agricoles que l'on pourrait obtenir d'après la fertilité intrinsèque du sol, mais elle peut aussi réduire fortement la réponse aux engrais ou autres intrants. Ceci réduit la marge économique sur l'application d'engrais, ce qui tend à perpétuer la situation caractérisée par de faibles intrants et des faibles extrants (Calvet, 2003).

III. Généralité sur l'Azote et le Phosphore

III.1. l'azote dans les sols

III.1.1. Définition

L'azote est l'élément chimique de numéro atomique sept, de symbole N (du latin *nitrogenium*). C'est la tête de file du groupe des nitrogènes. Dans le langage courant, l'azote désigne le corps simple N₂ (diazote), constituant majoritaire de l'atmosphère terrestre, représentant presque les 4/5^e de l'air (78,06 %, en volume^a). L'azote est le 34^e élément constituant la croûte terrestre par ordre d'importance.

III.1.2. Le rôle de l'azote

- Élément nutritif majeur pour la croissance des cultures.
- Entre dans la composition des protéines, dans les enzymes, et dans celle des acides nucléiques, dont l'ADN.
- L'un de composante de la chlorophylle.
- Rôle vital dans la photosynthèse.

III.1.3. Origine de l'Azote

- Origine atmosphérique (80%)
- Origine végétale (litières, pluvio-lessivat et des exsudats racinaires).
- Origine animale (cadavre et déchets des animaux).
- Origine microbienne (cellules ou leurs métabolites).

III.1.4. Cycle de l'Azote

L'atmosphère est composée à 79% d'azote(N), élément essentiel du vivant qui intervient dans la composition des protéines, l'azote atmosphérique, pour être assimilable par les organismes vivants, doit être transformé en azote minérale (**figure 1**).

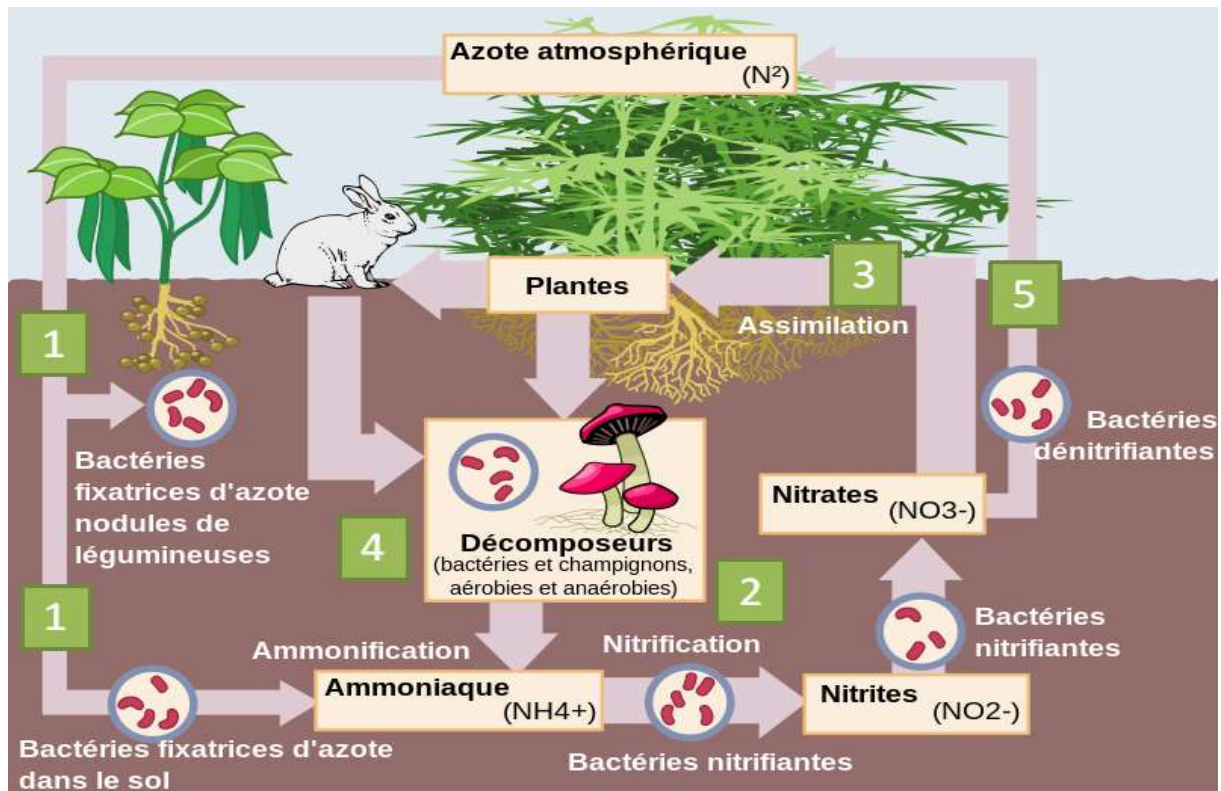


Figure 1: Schéma simplifié du cycle de l'azote (Roger et Garcia., 2002).

La figure ci-dessus nous décrit le cycle de l'azote ; Les animaux se nourrissent des plantes et après leur mort ils se décomposent. L'azote organique qui compose leur corps est minéralisé et de nouveau assimilé par les plantes. D'un autre côté, l'azote minéral est apporté par les eaux usées est assimilé par les plantes. Les grandes étapes du cycle de l'azote :

1) La fixation :

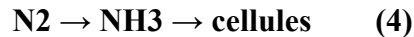
a) Fixation symbiotique

Elle correspond à l'aptitude que possèdent certains organismes à fixer l'azote atmosphérique. A ce nombre, nous pouvons citer les légumineuses qui contrairement aux autres plantes, sont capables d'assimiler l'azote de l'air (N_2) grâce à un système racinaire muni de nodules où se fixent des bactéries de type rhizobium. Le rhizobium fournit la nitrogénase qui effectue la fixation de l'azote par les nodules. Il fournit à la plante 90% de l'azote qu'elle fixe : c'est la fixation symbiotique (**Cedra, 1997**).

L'azote est alors réduit à l'état ammoniacal avant d'être assimilé par les micro-organismes. Selon (Martin, 1979).

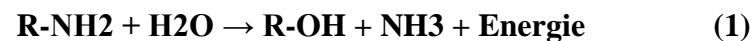
b) La fixation libre

Les bactéries (*Azobacter* ; *Clostridium sp* ; les algues bleues) fixent l'azote de l'air, le réduisent à l'état ammoniacal et l'assimilent pour former leurs cellules selon la réaction



2) L'ammonification (ou minéralisation)

C'est la transformation de l'azote organique en azote ammoniacale (Vilaginis, 2003)



(Azote organique) (Ammoniac)

Dans les sols ayant un pH compris entre 4,5 et 7,5, la production de l'ion ammonium (NH_4^+) est plus favorable. Dans les sols ayant un pH > 8,5 la production de l'ammoniac gazeux (NH_3) est le plus favorisé (Cornell University, 1978).

3) La nitrification

La nitrification est un processus d'oxydation biologique de l'azote, réalisé par les microorganismes, au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale (NH_4^+) à la forme nitrique (NO_3^-) (Cédra, 1997).

Cette nitrification est réalisée en deux étapes:

3.1. La nitritatin se fait par les bactéries de genre *Nitrosomonas* :



La nitrification se réalise par les bactéries du genre *Nitrobacter* :



3.2. Dénitrification :

Découverte à la fin du siècle dernier, la dénitrification est un processus respiratoire anaérobie, qui se produit dans les sols pauvres en O_2 (marais, sol tourbeux et sol mal drainées). En plus de cela, la dénitrification aboutit à une perte de l'azote présent initialement sous forme nitrique ou apportée par les engrais (ROGER et al, (2001).

4) L'immobilisation :

Elle correspond à l'assimilation de l'azote ammoniacal ou nitrique par les microorganismes hétérotrophes du sol dont la croissance et l'activité dépendent de disponibilité du carbone organique assimilable (**DORE et al,2006**).

5) L'assimilation :

L'assimilation est le passage du non vivant au vivant. De tous les processus biologiques, l'assimilation est la plus complexe. Elle est simultanée à l'assimilation du carbone et va aboutir à la synthèse des protéines.

6) La volatilisation

La volatilisation de l'ammoniac résulte d'une réaction physico-chimique (non biologique) basée sur l'équilibre chimique entre les formes NH_4 et NH_3 dans la solution du sol et sur le degré de résistance au dégagement d'ammoniac gazeux du sol vers l'atmosphère.

C'est un processus qui conduit au retour dans l'atmosphère de l'azote ammoniacal, sous forme d'ammoniac gazeux (NH_3).

III.2. Le phosphore dans les sols

III.2.1. Généralité sur le phosphore

Dans le sol, le phosphore se présente généralement sous deux états bien distincts : l'un représente la quantité globale donc c'est le phosphore total et l'autre quantité où la plante peut l'utiliser, c'est le phosphore dit assimilable.

Le (P) est un élément majeur essentiel qui assure une meilleure implantation de la culture, il favorise un développement racinaire plus précoce et une maturation plus homogène de la culture. (**Madjida et al., 2020**). Le phosphore doit être appliqué à des doses comprises entre 30 et 40 unités/ha (²**Alaoui, 2003**).

III.2.2. Importance du phosphore en production végétale

Avec l'augmentation de la demande de production agricole et le pic de la production mondiale au cours des prochaines décennies, une attention importante est donnée au phosphore (P) en tant que ressource non renouvelable (³**Cordell et al., 2009** ; ⁴**Gilbert, 2009**). Car le phosphore est considéré comme un élément nutritif indispensable aux végétaux et quasiment non substituable (**Raghothama 1999**). Il rentre dans la structure moléculaire du matériel génétique, métabolique, structural et de régulation, il entre dans la composition de nombreuses molécules

comme les acides nucléiques (ADN, ARN), les enzymes, les phosphoprotéines et les phospholipides.

III.2.3. Sources de phosphore

Les apports aux sols proviennent :

- Des engrais minéraux,
- De l'érosion hydrique ou éolienne des roches, et des remontées par les sources chaudes et le volcanisme,
- Du lessivage des sols cultivés et de la décomposition des matières organiques,
- Du recyclage via la faune marine (poissons, guano...) puisque les flux de phosphore aboutissent in fine dans les océans,
- Des effluents urbains et industriels,
- Les sédimentations.

III.2.4. Forme du phosphore dans le sol

Le phosphore est l'élément le plus anciennement connu. Il se présente dans le sol soit à l'état minéral ou organique, ces deux derniers constituent ensemble le phosphore total dont seulement une partie de lequel est assimilable par les plantes.

III.2.4.1. Phosphore total

Il correspond à la quantité totale que renferme le sol et qui existe sous la forme minérale ou organique. La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence directe de la richesse de la roche mère (**PEREDACAMPOS, 2008**). A l'état naturel, les sols contiennent d'un à trois tonnes de phosphore par hectare dans les premiers 20 centimètres (**BEAUDIN et al, 2008**).

III.2.4.2. Le phosphore minéral

Le phosphore minéral généralement plus abondant que le phosphore organique (**GACHON, 1969**). Il se trouve souvent liée avec le fer, le calcium et l'aluminium (**MASMOUDI, 1998**).

III.2.4.3. Le phosphore organique

Le phosphore organique peut provenir des déchets végétaux ou des micro-organismes du sol. Selon (**BROOKES et al, 1984** in **VANDENBOSSOCHÉ (1999)**). Il représente de 20 à 80% du phosphore du sol.

La disponibilité du phosphore organique dans le sol dépend de la minéralisation par les enzymes phosphatase (**PRIYA et SAHI, 2009**).

III.2.4.4. Phosphore assimilable

Appelé aussi « réserve assimilable » ou « fraction labile », c'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines (**BAIZE, 2000**).

Dans le sol, il y a uniquement quelques kilogrammes de phosphore présents en solution dans le sol sous forme d'orthophosphates directement assimilables par les plantes (**FROSSARD et al, 2004 in BEAUDIN, 2008**).

GERVY (1970) (**GERVY (1970)**), Estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 0.15 ‰ et 0.3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0.15‰.

III.2.5. Dynamique du phosphore dans le sol

On peut définir la dynamique du phosphore comme étant le passage des ions phosphatés d'un état à un autre sous l'effet des mécanismes physico-chimiques et biologiques. En sols sahariens, **MESMOUDI (1999)** suggère que la solubilité et la dynamique des ions phosphatés méritaient d'être étudiés plus complètement.

D'après **DROUET (2010)**, dans le sol un cycle actif du phosphore peut être distingué : ce cycle est très semblable à celui de l'azote et les micro-organismes jouent également un rôle important dans le processus de minéralisation et d'immobilisation.

III.2.6. Cycle du phosphore

La dynamique du phosphore dans les systèmes agricoles est représentée par un cycle simplifié du phosphore puisque l'influence des océans et des activités volcaniques n'y est pas considérée (**Parent et al., 2005**).

Le phosphore organique n'est pas disponible aux racines des plantes, il doit d'abord être hydrolysé par des enzymes de la famille des phosphatases et d'en libérer du phosphore inorganique qui peut, ensuite, être assimilé par les plantes (**Richardson et al., 2001**).

Les plantes ne peuvent prélever du phosphore que sous forme d'ion ortho-phosphate, soit directement par les racines ou par les hyphes mycorhiziens qui acheminent le phosphore inorganique vers les racines (**Beaudin, 2006**).

L'identification des formes de phosphore organique est un exercice très délicat compte tenu de la complexité du sol (Frossard et al., 2004). En outre, les plantes doivent entrer en compétition avec la microflore du sol pour le phosphore dont la disponibilité est par ailleurs très limitée (Aarab et al., 2009).

Pour toutes ces raisons, le phosphore bien plus que l'azote est souvent l'élément limitant dans les écosystèmes naturels et que la moitié du phosphore organique des sols est encore non identifiée (Frossard et autres, 2004). L'apport de fertilisants phosphatés organiques ou inorganiques est nécessaire afin que les besoins en phosphore des cultures soient comblés (Beaudin et al, 2008a).

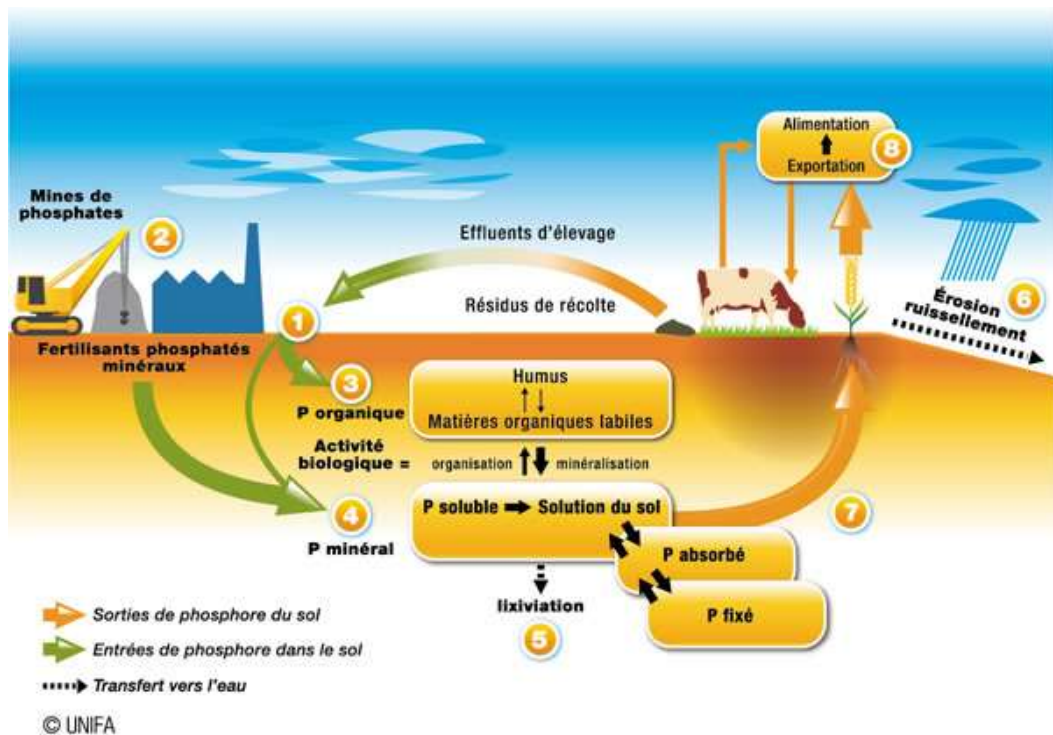


Figure 2: cycle de phosphore (Dommergues et al., 1970)

IV. Généralité sur la *phytoremédiation* par *Cicer arietinum*

IV.1. Définition

La phytoremédiation est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques. Bien que les plantes soient utilisées depuis longtemps pour dépolluer les sols, d'importantes découvertes scientifiques réalisées au cours de ces dix dernières années ont contribué à améliorer le processus et à étendre son champ d'application. Elle peut être utilisée aussi bien contre les polluants organiques que les polluants

inorganiques présents dans les milieux solides (sols), liquides (eaux de surface et souterraines) et gazeux.

D'autres façons c'est l'Ensemble de techniques de traitement des sols pollués utilisant les plantes et leur interactions avec les micro-organismes du sol pour bloquer, extraire, accumuler, transformer ou détruire les contaminants environnementaux. On distingue : phytostabilisations, phytovolatilisation, phytoextraction et phytodégradation. ²(Baize, 2016).

IV.2. Principes et mécanisme de la Phytostimulation

La phytoremédiation repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et les micro-organismes. Le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et des micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganiques le composant. Lorsque certains de ces composés sont en excès par rapport à l'état initial du sol, ce dernier est qualifié de contaminé (cela s'applique aussi à l'eau et à l'air qui à la différence sont des fluides). Les composés en excès peuvent alors être utilisés comme source d'énergie par les plantes et les micro-organismes. Dans le système plante - sol - micro-organismes, la biodégradation bactérienne est souvent en amont de l'absorption racinaire. Plantes et micro-organismes ont coévolué pour disposer d'une stratégie à bénéfices mutuels pour gérer la phytotoxicité où les micro-organismes profitent des exsudats racinaires, alors même que la plante bénéficie des capacités de dégradation des micro-organismes rhizosphériques pour réduire le stress dû à la phytotoxicité. Finalement, la plante est l'agent essentiel de l'exportation d'un contaminant hors du milieu environnant

IV.3. les différentes techniques de la phytoremédiation

IV.3.1. Phytoextraction

La phytoextraction est une technique de remédiation reposant sur la capacité des plantes à prélever des contaminants depuis le sol (ou l'eau) par les racines et les transférer et accumuler dans les parties aériennes Cette technique est particulièrement adaptée aux sols présentant une pollution diffuse, où les polluants sont présents en proportion modérée et en surface. La phytoextraction est influencée par les caractéristiques physiologiques et génétiques des plantes (Phieler et al.,2013).

On peut noter l'utilisation de plantes hyper accumulatrices présentant des capacités d'accumulation et un facteur de bioconcentration important (Chalot et al.,2012 ; Bert et al.,2017, Mahar et al. 2016).

IV.3.2. Phytostabilisation

La phytostabilisation vise à végétaliser un sol pollué dans le but d'immobiliser les ETM dans le sol. Cette technique permet la diminution du transfert des polluants vers les nappes phréatiques et vers l'atmosphère. (Mahar et al., 2016).

IV.3.3. Rhizofiltration

« La rhizodégradation désigne la dégradation des contaminants, pour la plupart organiques, sous l'action des racines et des micro-organismes associés. » (Sterckeman, et al., 2011). L'efficacité de cette méthode dépendra donc de l'importance de la vie microbienne présente au sein de l'appareil racinaire.

IV.3.4. Phytodégradation

Cette méthode concerne la pollution organique et non pas celle des éléments traces. Les plantes utilisées dans cette technique n'ont pas la capacité de stocker les polluants dans leurs organismes. Cependant, elles sont capables de dégrader les polluants organiques à l'intérieur des cellules de leurs appareils aériens et racinaires. Avec la Phytodégradation, les plantes utilisées absorbent les molécules nocives et sont capables de les dégrader en molécules moins toxiques (Dabouineau, et al., 2005).

IV.3.5. Phytovolatilization

La Phytovolatilization utilise les plantes pour transférer les ETM du sol vers l'atmosphère. En effet, certains éléments (As, Hg et Se) peuvent être présents sous forme gazeuse dans l'environnement. Dans ce procédé, les ETM sont absorbés par les racines, transférés dans les parties aériennes où ils sont transformés sous leur forme volatile avant d'être émis dans l'atmosphère (Kabata-Pendias 2011).

IV.4. l'importance et utilisation de la phytoremédiation

Elle ne nécessite aucun personnel spécialisé pour son fonctionnement, seules les pratiques agronomes conventionnelles doivent être employées.

- Elle peut traiter de nombreux polluants simultanément, qu'ils soient organiques ou inorganiques.

- Lorsque les plantes ont traité les polluants et qu'aucune manipulation subséquente n'est nécessaire, de la biomasse est incorporée à l'environnement.

- Les conditions physico-chimiques du sol sont maintenues ou améliorées grâce à la couverture végétale créée.

- D'autres procédés qui affectent la dégradation des sols, comme celui de l'érosion et de la désertification, peuvent également être réduits ou prévenus avec l'utilisation de la phytoremédiation.

- Elle diminue la lixiviation des contaminants vers d'autres zones, dont les cours d'eau ou la nappe phréatique.

- Il y a fixation d'azote atmosphérique (principalement par les légumineuses). - Elle peut être appliquée sur de grandes surfaces à traiter.

- Elle permet le recyclage des ressources comme l'eau et la biomasse.

- Enfin, la phytoremédiation est une technique qui est déjà hautement acceptée par la société.

IV.5. Avantage

- Une bonne intégration paysagère ; et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol (**Dechamp et Meerts, 2003**).
- Permet de réduire le déplacement des polluants dans l'air, l'eau, ou le sol, puisqu'ils sont maintenus près ou dans les plantes (sauf dans le cas de la Phytovolatilisation) (**Mortet, 2019**).
- La phytoremédiation requiert moins d'équipement et de travail que les autres Méthodes puisque ce sont les plantes qui font l'essentiel du de travail (**PilonSmits ,2005**).
- Plus extensives et plus respectueuses des caractéristiques des sols.
- la phytoremédiation est une technique dite passive du fait qu'elle ne demande pas d'apport énergétique si ce n'est celui du soleil. Elle permet aussi le traitement d'une grande diversité de polluants (métaux, pétrole brut, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, solvants, explosifs, lixiviats de remblai, produits phytosanitaires, etc.)(**Origo et al ,2012**).

IV.6. Les incovinants

- Malgré les nombreux avantages qu'elle confère, la phytoremédiation a toutefois quelques contraintes qui peuvent freiner son utilisation et son efficacité (Cuunningham et al.,1996; EPA, 2000; Devinny et al., 2005; Vishnoi & Srivastava, 2008; Procópio et al.,2009; Maestri &Marmioli, 2011).
- Pour appliquer les techniques de phytoremédiation, il est nécessaire, à travers des analyses préalables, de s'informer le mieux possible sur les propriétés physico-chimiques, du terrain, types de sol (caractéristique minéralogique, granulométrique, microbiologique...) (Mekerri et Tazeboudjt, 2017).
- Lentes à donner des résultats (Mortet, 2019).19
- Le procédé dépend de la météorologie, des attaques des insectes, des microorganismes et des substances phytopathogènes (Mortet, 2019).

IV.7. Etude exemple de Légumineuse *Cicer arietinum* (Pois chiche)

IV.7.1. Caractéristiques morphologiques

Le pois chiche (*Cicer arietinum L.*) est une plante herbacée annuelle et auto fécondé (Muehlbauer, F. J. and Rajesh, P. N. 2008.), autogame, diploïde ($2n=16$ chromosomes,présentant moins de 1% d'hybridation naturelle (Singh et Reddy, 1991) , atteignant 100 cm de haut dont les caractéristiques morphologiques sont :

Tableau 2: les caractéristiques morphologiques de pois chiche (*Cicer arietinum*)

organe	Caractéristiques
Racines :	les racines pivotantes atteignant 1,5 à 2,0 m de profondeur et racines secondaires pour la plupart étalées à 15-30cm de profondur dans le sol.
Tiges	Dressés, simple ou ramifiée dès la base
Feuilles	alternes, présentent un nombre de folioles impaires. Chacune d'elles compte de 7 à 17 folioles ovales et dentées (Ayadi, 1986).
Fleurs	Bisexuées, papilionacées, pédicelle de 3 à 12 mm de long. Parfois il ya 2 ou 3 fleurs sur le même nœud. Elles sont de couleur rose, blanche ou bleue.
Fruit	Ce sont des gousses renflées ayant 1 à 2 graines, rarement 4 graines. Les graines globuleuses à anguleuses ovoïdes, à rainure médiane et à bec bien distinct supérieur au hile, de crème à brune, verte ou noire, surface lisse ou ridée (Bejiga et Van der Maesen ,2007).

IV.7.2. Classification botanique du pois chiche (*Cicer arietinum*) (Davies et al., 2007)

Règne :	<i>Plantae</i>
Sous-règne :	<i>Tracheobionta</i>
Embranchement :	<i>Spermatophyta</i>
Sous-embranchement :	<i>Magnoliophyta</i>
Classe :	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe :	<i>Rosidae</i>
Ordre :	<i>Fabales</i>
Famille :	<i>Fabaceae</i>
Sous-famille :	<i>Papilionacees</i>
Genre :	<i>Ccer</i>
Espèce :	<i>Cicer arietinum</i>
Nom vernaculaire :	<i>Pois chiche</i> (Français)



Figure 3: Morphologie d'une plante de pois chiche (*Cicer arietinum* L.)

IV.7.3. Production et commerce du pois chiche (*Cicer arietinum*) en Algérie

En Algérie, les espèces cultivées de légumineuses alimentaires ont bénéficié de peu d'intérêt dans le monde des ressources phylogénétiques. Concernant le pois chiche. Les cultivars populations ou variétés locaux ne sont pas bien connus actuellement bien qu'ils aient fait l'objet de plusieurs études de caractérisation dans les années 60.

Le pois chiche en Algérie est la seconde légumineuse alimentaire produite après les fèves (MADR, 2015). Sa culture a connu, durant la décennie 1980-1990, une certaine évolution progressive sur le plan des superficies, de la consommation et une évolution régressive en terme de productivité (Anonyme, 1994). Les causes de la faiblesse des rendements sont souvent d'ordres agro-techniques liés aux conditions de semis (période, modes de semis, qualité de la semence) et à l'infestation par les adventices. Tlemcen, A.Temouchent, Guelma, Mostaganem et Chlef sont les 5 wilayas les plus productives du pois chiche

IV.7.4. Les étapes de développement de nodulation

L'établissement de la symbiose est un phénomène complexe, qui se développe à travers une série d'événements et de transformations complexes et ordonnés.

IV.7.4.1. Pré-infection

Dans un premier temps, les Rhizobiums sont attirés vers les poils racinaires par une large gamme de substances, principalement par les Phénylpropanoïdes exsudés par la racine (**Kape et al., 1991**). des facteurs induisent des changements morphologiques, physiologiques et moléculaires chez la plante hôte. Les poils racinaires peuvent adopter différentes formes en fonction de leur stade de développement, en crosse de berger, courber, renflé, entrelacé, déformé, branché ou joints (**Wood et Newcomb,1989**).

IV.7.4.2. Infection

Au cours de l'infection, la pénétration de la bactérie est facilitée par la courbure du poil racinaire qui crée une zone confinés dans laquelle la bactérie est entourée par la paroi végétale. Un cordon d'infection (qui est une structure tubulaire qui croit à l'intérieur de la cellule et dans laquelle la bactérie prolifère) est initié à partir de ce point par hydrolyse de la paroi (**Mateos et al., 2001**), invagination de la membrane végétale et production de matériel pariétal par la plante (**Gage et Margolin,2000 ; Gage, 2004**).

IV.7.4.3. Fonctionnement ou maturité des nodules

Les nodosités se forment par multiplication des cellules infectées. Les Rhizobium prennent la forme bactéroïde, entourés par une membrane pér bactéroidienne, après leur libération du cordon d'infection. La membrane pér bactéroidienne a pour rôle la stabilité du système hôte/symbiose ; si elle est endommagées, les bactéries vont se libérer dans le cytoplasme et seront alors considérées comme des corps étrangers et donc détruits par la cellule hôte (**RICHTER, 1993**).

IV.7.4.4. Dégénérescence

L'étape finale dans le processus d'infection se déroule lors de la lyse des bactéroïdes et de la libération des bactéries dans le sol (**RICHTER, 1993**).

Les nodosités ainsi formés peuvent adopter plusieurs formes :

- Les nodosités à croissance indéterminée où l'activité méristimatique se maintient (cas du ois et luzerne). De nouvelles cellules apicales sont continuellement infectées. Cela résulte en une forme cylindrique de la nodosité.

•Nodosités à croissance déterminée où l'activité méristimatique cesse tot (cas du soja).Les cellules infectées engendrent d'autres cellules infectées et la nodosité en grandissant par expansion acquiert une forme sphérique. Ce type de nodosité existe seulement chez les légumineuses.

•Un troisième type intermédiaire a été identifié chez le genre *Lupinus* et *Sebania rostrata*. (Les divisions cellulaires se font soit dans le cortex externe soit dans le cortex interne, conduisant à la formation de nodosités soit déterminées soit indéterminées) (Hirsh, 1992, Hirsch et al., 2001).

V. Matériels et méthodes

V.1. Matériels

V.1.1. Sol

V.1.1.1. Localisation des sites

Les sols utilisés sont des vertisols des périmètres irrigable de Mitidja dont l'exploitation donne à lieu des produits phytosanitaires. Nous avons choisi, deux (2) sols, l'un de Halouia (S1) et l'autre de Mefteh (S2).

V.1.1.2. Prélèvement

Au niveau de chaque station expérimentale, nous avons prélevé (**Janvier 2022**) une quantité de 10 kg, La profondeur a été sur l'horizon 0 - 30 cm à l'aide d'une tarière, séché à température ambiante, broyé et tamisés à 2 mm. Une quantité de 18 kg destiné pour la réalisation de notre expérimentation et le reste c'est-à-dire 2 kg destiné pour analyser des caractéristiques physicochimiques des deux sols.

V.1.2. Climat de région

Est de type méditerranée sub- humide très frais en hiver, chaud en été. La pluviométrie environ 500 mm, la température minimale est de 10 °c et la température maximale est de 28 °C.

V.1.3. Herbicides

L'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (noté aussi 2,4-D) est un désherbant de famille chimique organochloré de formule brute $C_8H_6Cl_2O_3$. Cristaux incolores ou poudre blanche sans odeur, sélectif contre les mauvaises herbes mais inactif sur le gazon et les céréales. C'est un des contaminants de l'eau, des sols, de l'air et des pluies, qu'on retrouve aussi dans l'air intérieur.

Dose : Nous avons retenu la dose agronomique de 2,1 µg/1kg de sol.

V. 1.4. Le végétal

Il a été utilisé une variété de pois chiche (*Cicer arietinum*). Le choix de ces plantes en raison de ses cycles courts et n'est pas de besoin en froid, en tant que l'expérimentation se fait en printemps et de sa richesse de nodule plein de microorganismes, de son adaptation aux différents types de sols et de son installation qui est très rapides.

V.2. Méthodes

V. 2. 1. Analyses physico-chimiques du sol

V.2.1.1. La granulométrie

La texture du sol a été déterminée selon la méthode employant la pipette Robinson. En effet, après attaque, dans une éprouvette, de 20 g de sol tamisé à 2 mm par l'eau oxygénée H₂O₂ à 110 v et dispersion des particules par l'hexametaphosphore de Na, il est ensuite procédé au prélèvement après agitation à la pipette de Robinson de 10 ml de la suspension après environ 8 heures de décantation. Le pourcentage d'argile est calculé après séchage à l'étuve à 105 °C et pesée de la charge solide contenue dans les 10 ml prélevés à la pipette Robinson. Pour la détermination des différentes classes texturales, le diagramme utilisé est le triangle de textures (GEPPA Baize D., 1995).

V.2.1.2. La capacité de rétention en eau

La méthode consiste à saturer le sol avec de l'eau et laisser ressuyer pendant 48 h. On effectue une pesée à l'état humide puis l'échantillon est mis à l'étuve à 105°C pour une dessiccation. La différence de poids correspond à l'eau de la capacité de rétention.

V.2.1.3. Le pH

La mesure du pH est réalisée à l'aide d'un pH mètre selon un rapport sol /eau de 1 /2,5.

V.2.1.4. Le Calcaire total

La teneur en calcaire total est obtenue grâce au calcimètre de Bernard. Cette méthode consiste à décomposer les carbonates du sol par l'acide de HCl (6N) et à mesurer le volume de gaz carbonique dégagé selon la réaction :



V.2.1.5. Le carbone total

La méthode utilisée consiste à oxyder le carbone organique contenu dans un échantillon par du bichromate de potassium à 8% en milieu sulfurique à chaud. La quantité de K₂Cr₂O₇ réduite est proportionnelle à la teneur en carbone organique, l'excès de bichromate est titré par du sel de MOHR 0,2 N. I.1.1.6 La

V.2.1.6. Matière organique

La matière organique est obtenue selon la formule suivante : MO % = C % *1.72 .

V.2.1.7. L'azote total

Le dosage de l'azote total s'est fait par la méthode de Kjeldhal, celle-ci consiste à oxyder l'échantillon de sol par l'acide sulfurique concentré porté à ébullition, ce dernier se comportera alors comme agent oxydant. Les substances organiques sont décomposées : le carbone se dégage sous forme de gaz carbonique, l'hydrogène donne de l'eau et l'azote est transformé en azote ammoniacal. Ce dernier est fixé immédiatement par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium.

Pour accroître l'action oxydante du H_2SO_4 , on élève sa température d'ébullition en ajoutant du sulfate de cuivre et du sulfate de potassium ; ces derniers jouent le rôle de catalyseurs. Lorsque la matière organique a été totalement oxydée la solution contenant le sulfate d'ammonium est récupérée. Il sera ensuite procédé au dosage de l'azote ammoniacal par distillation, après l'avoir déplacé de sa combinaison par une solution de soude en excès. L'ammoniac est ensuite recueilli dans un vase à doser et le dosage s'effectue à l'aide d'acide sulfurique et en présence d'un indicateur de pH.

V.2.1.8. Dosage de l'azote minéral (l'azote ammoniacal, l'azote nitrique)

Le dosage de l'azote minéral s'effectue selon la méthode de **Drouineau et Gouny in Bonneau et Souchier, (1979)**. Cette technique de dosage consiste à extraire l'ammonium et les nitrates par une solution saline de ($CaCl_2$, 1N). Après extraction des sels ammoniacaux et des nitrates sur la même prise d'essai, il sera procédé à la distillation, par l'ajout d'une solution de soude NaOH. Dans un premier temps de l'ammonium sera piégé dans de l'acide borique 1% puis dosé par titration à l'aide de l'acide sulfurique à N/10 et en présence d'un indicateur de pH. Le même procédé sera utilisé pour le dosage de l'azote nitrique mais après sa transformation à l'état gazeux (azote ammoniacal) par l'adjonction de l'alliage de Dewarda.

V.2.1.9. La capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC a été déterminée par la méthode de **Metson**. Cela consiste à saturer le sol à l'aide d'acétate d'ammonium 1N à pH 7. Celui-ci déplace les bases et l'acidité échangeable du complexe adsorbant (Les bases échangeables Ca, Mg sont dosées par spectrophotométrie, K et Na sont dosées par photomètre à flamme, dans la 1ere solution d'acétate d'ammonium récoltée). Concernant la détermination de la capacité d'échanges cationiques, l'ammonium fixé sera déplacé à son tour par une solution de KCl (M) puis distillé et dosé par une solution de H_2O_4 .

V.2.1.10. Le phosphore assimilable

Le dosage du phosphore assimilable s'effectue selon la méthode d'**Olsen (Olsen, 1954)**. L'extraction des formes de phosphore solubles se fait grâce à la formation d'acide carbonique par dissolution de bicarbonate de sodium ; les orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour donner de l'acide phosphomolybdique qui est réduit par l'acide ascorbique en bleu de molybdène dont l'absorbance est proportionnelle à la concentration en phosphore à 660 nm, par spectrophotomètre **Genesys**.

V.2.1.11. Dosage de l'azote minéral (l'azote nitrique)

Le dosage de l'azote minéral s'effectue selon la méthode de **Drouineau et Gouny in Bonneau et Souchier, (1979)**. Cette technique de dosage consiste à extraire l'ammonium et les nitrates par une solution saline de (CaCl_2 , 1N). Après extraction des sels ammoniacaux et des nitrates sur la même prise d'essai, il sera procédé à la distillation, par l'ajout d'une solution de soude NaOH. Dans un premier temps de l'ammonium sera piégé dans de l'acide borique 1% puis dosé par titration à l'aide de l'acide sulfurique à N/10 et en présence d'un indicateur de pH. Le même procédé sera utilisé pour le dosage de l'azote nitrique mais après sa transformation à l'état gazeux (azote ammoniacal) par l'adjonction de l'alliage de Dewarda.

V.2.2. Le taux d'inhibition ou de stimulation des herbicides

% d'inhibition ou de stimulation = $(\% \text{ de dégradation du témoin} - \% \text{ de dégradation du traitement } x) \text{ SUR } \% \text{ de dégradation du témoin}$.

V.2.3. Analyse de variance

V.2.3.1. Le traitement statistique des analyses de variance à un facteur et deux facteurs (herbicide – pois chiche) a été effectué avec le logiciel Minitab, 13 D.

V.2.3.2. Les graphes ont été réalisés par logiciel **Excel 2010**.

V.2.4. Résultats des analyses des Caractéristiques analytiques propriétés physico-chimiques des sols

Les propriétés physico-chimiques d'échantillons des sols déterminées au niveau de laboratoire agronomique de Fertial (**tableau 3**).

Tableau 3: Caractéristiques physicochimiques des deux sols étudiés

Caractéristiques physico-chimiques	Unité de mesure	Sol 1 d'oued el alolaigue		Sol 2 de bougara
Granulométrie		Sable	34	34
		Limon	34	33
		Argile	32	33
Classe texturale	Triangle de texture GEPPA	Argile limoneuse		Argiles
PH		7.70		7.65
Conductivité électrique	Us/cm	99		104
Capacité de rétention en eau CR	%	33.5		34.7
Calcaire totale	%	T		T
K	Ppm	140.4		145.35
Na	Ppm	0.32		0.35
Mg	Ppm	168		182
CA	Ppm	19.3		21.9
CEC	Meq g/kg	86		84
P(olsen)	Ppm	6.12		5.45
N _T	%	0.16		0.18
C	%	2.35		2.19
C/N		14.6875		12.166

Interprétation

L'étude de résultat des analyses des sols consignés sur le tableau (**tab.3**), révèle que le S1 possède une texture argile limoneuse, pH (7.70) légèrement alcalin, une **CE** élevé, un taux de calcaire trop faible, **CR** est de 33.5 % c'est-à-dire moyenne. la **CEC** élevé. le carbone organique est de 2.35 % ce qui donne un taux de MO est de 4.04 % (moyenne), N est de 0.16 % ce qui donne un rapport de **C/N** égale 14.68, ceci indique un sol défavorable pour l'agriculture parce qu'il est très lourd.

Ce qui concerne le S2, le tableau montre que le S2 possède une texture argileuse, pH légèrement alcalin (**tableu.3**). Une **CE** élevé, un taux de calcaire nul, CR est de 34.7 % c'est-à-dire un peu

élevé, la **CEC** élevé. Le carbone organique est de 2.19 % ce qui donne un taux de **MO** est de 3.76 % (moyenne), N est de 0.18 % ce qui donne un rapport de **C/N** égale 12.16, ceci indique un sol moyennement favorable pour l'agriculture.

V.3. Technique expérimentale

Objectif de l'expérimentation.

Notre travail consiste à voir :

- L'effet de l'herbicide sur la biodisponibilité de nitrate et de phosphore assimilable.
- L'action de la phytostimulation (Pois chiche) de 2.4-D sur la libération de NO_3^- et P_2O_5 .

V.3.1. Les pots

Notre expérimentation mis sous serre de laboratoire de la culture maraichère et des légumineuses s'est déroulée dans les pots de plastique, de 27 cm de haut et 20 cm de diamètre. Nous avons placé de 2kg de mélange sol - herbicide, séché et tamisé à 2 mm, et dans chaque pot nous avons enfui 12 graines des plants choisis selon le dispositif.

V.3.2. Description du dispositif

Nous avons adopté 4 traitements pour chaque sol

- Sol témoin
- Sol + herbicide
- Sol + Pois chiche
- Sol + herbicide + Pois chiche

Durant la période de croissance et développement des végétaux, les sols, ont été maintenus à une humidité proche de 2/3 de la capacité de rétention.

Le dispositif comporte 4 traitements et 3 répétitions multiplier fois deux sols, soit au total 24 pots, les traitements expérimentés sont mentionnés dans le tableau (**tableau. 4**).

Des prélèvements ont effectuée selon les pas de temps 1 , 7 , 14 , 21 , 28 , 42 , 60 , 72 et 82 jours .

Tableau 4: Dispositif expérimental

S1T	S1H	S1P	S1HP	S2T	S2H	S2P	S2HP
R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R

Les lignes représentent les traitements et les colonnes représentent les répétitions.

A chaque point cinétique, nous avons prélevé une quantité de 12 g du sol pour le dosage de NO_3^- s'effectue selon la méthode de Drouineau et Gouny (**Bonneau et Souchier, 1979**) et le dosage du phosphore assimilable de P_2O_5 s'effectue selon la méthode d'Olsen (**Olsen, 1954**).

VI. Résultat et discussion

VI.1. Effet d'herbicide 2,4-D sur l'évolution du phosphore assimilable dans les deux sols

VI.1.1. Effet d'herbicide 2,4-D sur l'évolution du phosphore assimilable dans le sol (1) de Halouia

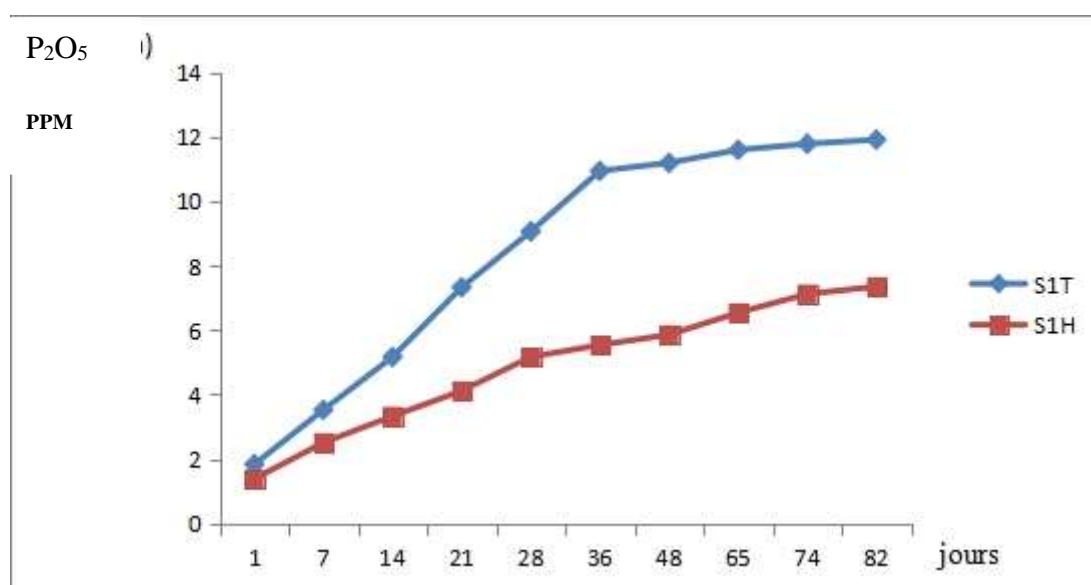


Figure 4: Effets du 2,4-D sur la mobilisation du phosphore assimilable dans le S1 de Halouia.

S1T : Sol1 témoin

S1H : Sol1 herbicide

Les analyses de nos résultats révèlent un impact négatif sur la mobilisation du phosphore. Nous notons sur une période 82 jours, la production respectivement 7.35 ppm et 35.91 ppm dans S1H et S1T.

De ce fait, un effet néfaste de cet herbicide réduit les activités des microorganismes responsables de cet élément majeure (P), c'est-à-dire réduisant ces activités enzymatiques et la densité des germes telluriques comme signalé (Sofo **et al.**, 2012). Alors que (Sannino et Gianfreda., 2001) prouve que il y a une perturbation de la métabolisme microbienne.

La mobilisation microbienne du phosphore sous l'effet de 2.4-D pendant la période expérimentale se caractérise par trois phases :

1) **Une première phase (0- 14 jours)** : c'est une phase où la mobilisation microbienne du phosphore est relativement faible en présence d'herbicide (3.32 ppm). Cependant nous notons dans le système témoin une meilleure activité microbienne se traduisant 5.16 ppm par une solubilisation plus grande du phosphore. Il y aurait eu un effet nocif des herbicides sur les groupes microbiens du sol.

2) **Une 2^{ème} phase (14 – 36 jours)** : caractérisée par une plus grande activité mobilisatrice du phosphore dans les deux différents systèmes expérimentaux (S1 et S1H). Aussi, dans le système témoin, la quantité de phosphore mobilisée atteint 10.94 ppm alors que, sous l'effet d'herbicide, elle est de 5.53 ppm. L'effet dépressif des herbicides y est manifeste sur les microflore du sol.

3) **Une 3^{ème} phase (36 – 82 jours)** : dans cette phase, l'activité microbienne se poursuit avec cependant un rythme plus faible dans les deux traitements ; l'effet négatif des herbicides se traduit par une plus faible solubilisation dans le sol.

Il est noté de ce fait une différence hautement significative (Annexe) au plan de l'intensité (quantité et vitesse) du processus de mobilisation du phosphore dans les systèmes sols et les systèmes sols herbicides ; autrement dit, ces herbicides exercent un effet d'inhibition très intense sur cette activité microbienne dans les sols.

VI.1.2. Effet d'herbicide 2,4-D sur l'évolution et la production du phosphore assimilable dans le sol (2) de Mefteh

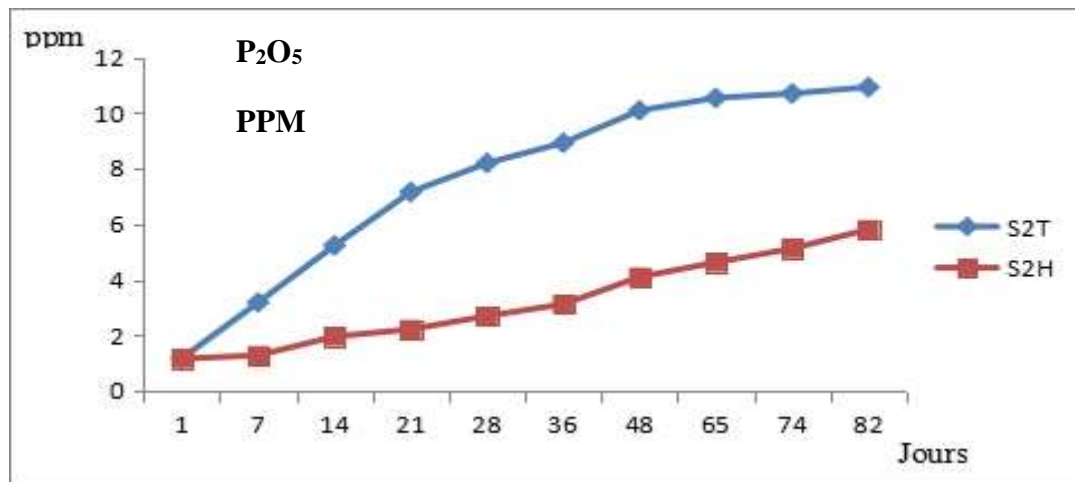


Figure 5: Effets du 2,4-D sur la mobilisation du phosphore assimilable dans le S2 de Mefteh.

S2T : sol 2 témoin

S2H : sol 2 herbicides

Nous notons que le 2,4-D induit, sur une période de 82 jours, la production de 5.81 ppm de de phosphore assimilable. Cependant, la quantité de cet élément atteint 10.92 ppm dans le système témoin sans herbicide (**figure 5**). Il y a, de ce fait, un effet négatif de ces produits ayant réduit l'activité des microorganismes mobilisant cet élément majeur, soit en réduisant la densité et la typologie des germes telluriques (**Rengel et Wheal, 1997, Sofo et al., 2012**), soit encore en inactivant les cellules microbiennes et en perturbant leur métabolisme (**Sannino et Gianfreda, 2001**).

Au plan de la cinétique de mobilisation du phosphore, on distingue différentes phases :

- 1) La première phase 0 –21 jours : elle se manifeste par une faible mobilisation, il permet de libérer de 7.5 ppm dans S2 et de 1.27 ppm dans S2H ; on y observe un effet quelque toxique des herbicides sur les groupes microbiens du sol.
- 2) Une deuxième phase 21 – 48 js : dans cette phase, la solubilité du phosphore redémarre et l'augmentation de quantité de P2O5, elle permet la libération de 10.08 ppm et de 4.09 ppm de phosphore assimilable dans S2 et S2H respectivement.
- 3) Une troisième phase (48 -82 jours) : elle a été constante durant cette période on y observe une activité décroît relativement. C'est vraisemblablement l'effet de toxicité d'herbicide qui a induit une chute de la quantité de phosphore dans le système sol herbicides.

Il est noté de ce fait une différence hautement significative (tab.) au plan de l'intensité (quantité et vitesse) du processus de dynamique de phosphore dans les systèmes sols et les systèmes sols herbicides ; autrement dit, ces herbicides exercent un effet d'inhibition très intense sur cette activité microbienne dans les sols.

VI.1.2. Effet d'inhibition du 2.4-D sur la libération de P₂O₅ dans les sols

Dans les conditions adoptées, nous notons, sur une période de 82 j, un taux d'inhibition du 2.4-D est de 39 % dans le sol 1, tandis que dans le sol S2, ce taux atteint de 47 %. Il ressort de ce fait que l'herbicide 2.4-D a un effet dépressif relativement plus accentué dans le sol S2 que S1 à l'égard des rhizobactériennes (tab 5.). Elle est due que le sol S2 possède de la quantité de CEC moins important que dans le sol S1.

Tableau 5: Taux d'inhibitions de 2.4-D (S1 et S2)

Traitements	% d'inhibition
S1H	39 %
S2H	47 %

VI.1.3 Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans les sols des périmètres irrigables de Mitidja

VI.1.3.1. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans le sol de Halouia

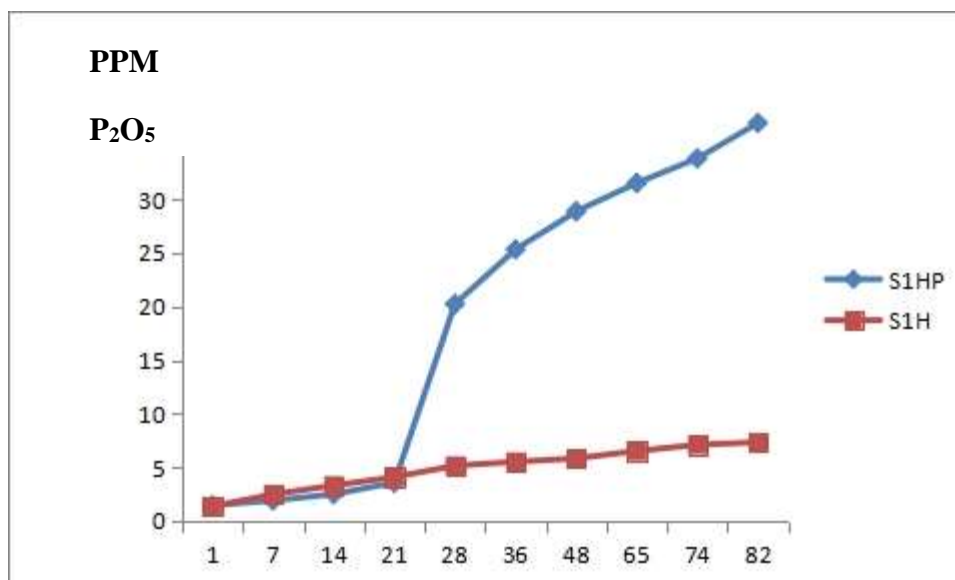


Figure 6: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du P₂O₅ dans le S1 de Halouia.

S1HP : sol 1herbicide pois chiche

S1H : sol 1 herbicide

L'effet de la phytostimulation se traduit par un taux de 37.13 ppm dans le système «sol – 2,4-D-plantes». Cette quantité est de 7.35 ppm dans le «témoin non planté», (**fig6.**). Il ressort de ces résultats qu'une amélioration notable de l'intensité microbienne a été observée dans les systèmes sol – herbicides -plantes. Cela est due à une de synthèse de métabolites acides et de phosphatases microbienne qui mobilisent davantage le phosphore dans les sol traité selon des processus acidolytiques, complexolytiques et enzymatiques (**Kosaric et al ., 2001**).

Ces résultats peuvent s'expliquer par les interactions plante – microorganismes - herbicide. Les nodules des racines sécrètent dans la rhizosphère une grande variété de composés organiques tels que des acides aminés, des sucres, des composés phénoliques, des polysaccharides et des protéines ; ce sont les exsudats racinaires qui participe à la dégradation des pesticides (**Gregory., 2006**). De leur côté, **Nico Boon, et al (2000)** ; **Piutti et al., (2003)** ont rapporté que la biostimulation des herbicides par des racines plantes dans les sols, provoque une plus grande mobilisation du phosphore.

Ces résultats corroborent ceux de **Han H.S et al., (2006)** et **Das et Debnath (2006)**, qui ont observé une plus grande mobilisation de ce macroélément dans la rhizosphère des plants de riz par quatre microorganismes, et cela même après des applications du butachlore, de l'oxadiazon et de l'oxyfluorène.

Concernant l'effet de la phytodégradation sur la mobilisation du phosphore (annexe), l'analyse de variance a un facteur (herbicides - plante) révèle l'existence de significative très hautement différence au plan de l'activité rhizosphèrerique entre les systèmes (sol - herbicides - légumineuse).

VI.1.3.2. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable dans le sol de Mefteh

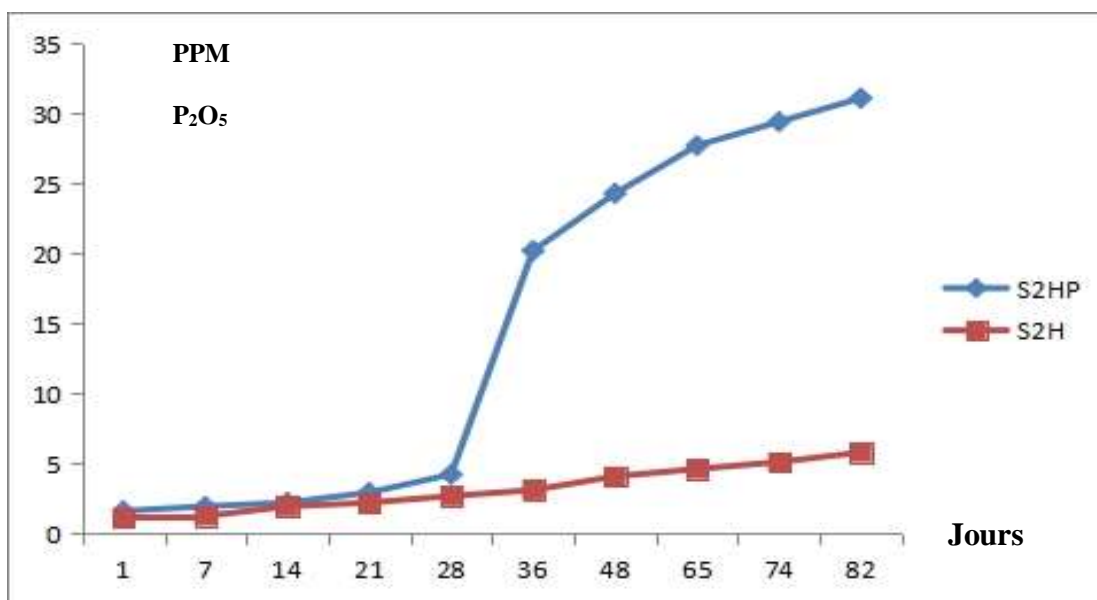


Figure 7: effet de la phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du P2O5 dans le S2 de Mefteh

L'examen des résultats (**figure.7**), obtenu sur une période de 82 jours, révèle que la phytostimulation de 2,4-D dans le sol S2 par le pois chiche provoque une augmentation de la libération du phosphore assimilable. En effet, nous avons noté les quantités de 31.09 pm dans l'échantillon S2HP, comparativement au témoin S2H est de 5.81 ppm. Il en résulte une meilleure mobilisation microbienne du phosphore et éventuellement une dégradation des molécules des herbicides par les exsudats racinaires de cette légumineuse.

Cette meilleure mobilisation du phosphore, est due que ces plantes semblent avoir une plus grande capacité pour libérer des carboxylates que les autres espèces au niveau de ses racines protéoïdes (**Lambers et al., 2013**). Ces carboxylates conduisent à la dégradation et la transformation des xénobiotiques d'organosynthèse ou minéral. Effectivement, les microorganismes de la rhizosphère peuvent également produire des carboxylates, comme l'acide malique, l'acide oxalique ou l'acide citrique détectés en culture pure (**Khan et al., 2007**), avec des quantités et des types de carboxylates produits variant avec la souche microbienne.

Concernant l'effet de la phytostimulation de 2,4-D sur la biodisponibilité du phosphore assimilable (annexe), l'analyse de variance a un facteur (herbicides - légumineuse) révèle l'existence de différence très hautement significative au plan de l'activité microbienne mobilisant le phosphore entre les systèmes (sol - herbicides – Pois chiche).

VI.1.4. Effet de stimulation de 2,4-D sur la libération du nitrate dans les sols

Nous notons que l'effet du phytodégradation est positif et il se traduit par des taux de stimulation, en effet, nous notons de 94.94 % dans le sol S1 et de 94.63 % dans le sol S2 (tableau 6).

L'effet bénéfique est alors vraisemblable dans le sol 1 que dans le S2 et vraisemblablement ce sont les valeurs des constituants des bases échangeable et complexe argilo-humique de sol 2 presque égale que dans le sol S1.

Tableau 6: La stimulation de 2,4-D sur la libération du nitrate dans les sols

Traitements	% d'inhibition
S1H	94.94 %
S2H	94.63 %

VI.2. Azote nitrique

VI.2.1. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO₃⁻ dans les deux sols

VI.2.1.1. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO₃⁻ dans le sol (S1) de Halouia

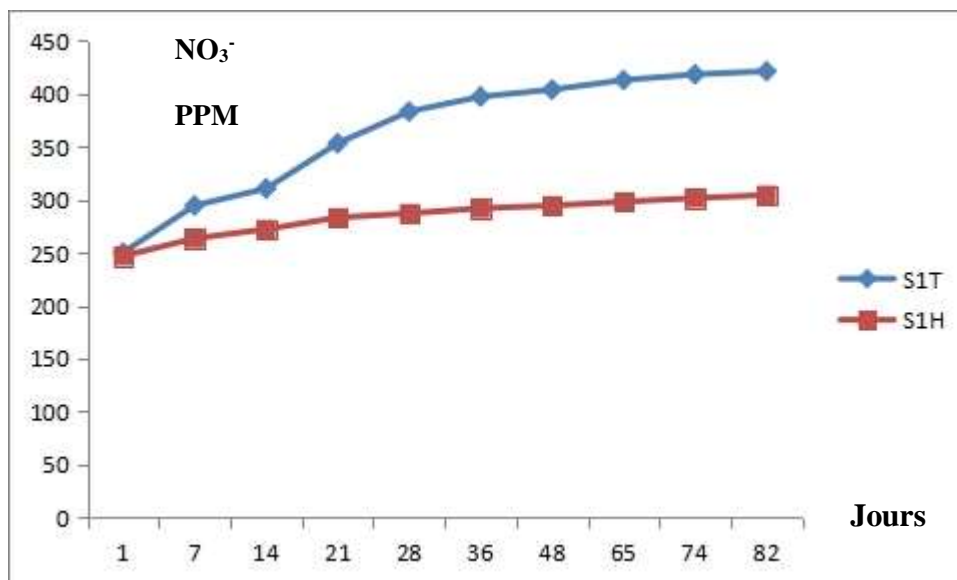


Figure 8: Effets du 2,4-D sur l'évolution de nitrate dans le sol (S1) de Halouia.

Dans les conditions expérimentales adoptées, il est noté (fig.), un dégagement de 421 pp de NO₃⁻ dans le système «sol 1, 2,4-D », alors que les quantités libérées dans le sol témoin (SI) est de 304.33 ppm sur une période de 82 jours. Ce ci met en relief, un effet très défavorable de cet herbicide sur l'activité biologique surtout les groupes fonctionnelle responsable de l'azote dans le sol de Halouia.

De tels résultats ont été observés auparavant dans différents travaux (**Ouattara et al., 2010**). Aussi, **Cheloufi et al., (2013)**, notèrent un effet défavorable du Topic et du zoom sur la minéralisation de l'azote organique dans les sols de la région de Ben M'hidi. Aussi ; **Cheloufi., (2019)**, observèrent dans leurs études d'incubation en laboratoire une inhibition des bactéries protéolytiques et nitrificatrices par le glyphosate et 2.4-D, les taux de réduction de deux herbicides sont 29 % pour les protéolytiques et de 20 % pour les nitrificatrices.

Dans notre cas, cet effet négatif serait dû soit à une élimination de certaines souches microbiennes par l'effet toxique des herbicides ou bien soit à une inactivation des cellules microbiennes par ces mêmes produits (**Mazzatura et al., 2001**) ou encore à un trouble du métabolisme microbien par ces mêmes substances (**Bouhaouss et al., 2000**).

La cinétique de minéralisation de l'azote (**figure 8.**) étudiée sur une période de 82 jours sous l'effet de 2.4-D se caractérise par 3 phases :

- 0 -14 jours : Durant les deux premières semaines de croissance de pois chiche et pour l'herbicide appliqué, nous constatons une faible augmentation de NO₃⁻
- Cependant, la vitesse de l'activité nitrificateurs augmente fortement après la 14^{ème} jour et s'étale jusqu'au 36^{ème} jour.
- Par la suite, la nitrification reprend à partir du 36^{ème} jours selon un faible rythme et ce, jusqu'au 82^{ème} jour d'incubation. Nos résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Haney et al. (2000), dans leurs études sur l'influence du glyphosate sur la nitrification.

Concernant l'importance relative de l'effet de 2.4-D sur la minéralisation de l'azote organique de S1, l'étude statistique basée sur l'analyse de variance à un facteur (herbicide) ou un facteurs (herbicide) révèle l'existence de différences très hautement significatives au plan de la minéralisation entre les systèmes témoins et les systèmes sols herbicides (annexe).

VI.2.1.2. Effet de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique NO₃⁻ dans le sol (2) de Mefteh

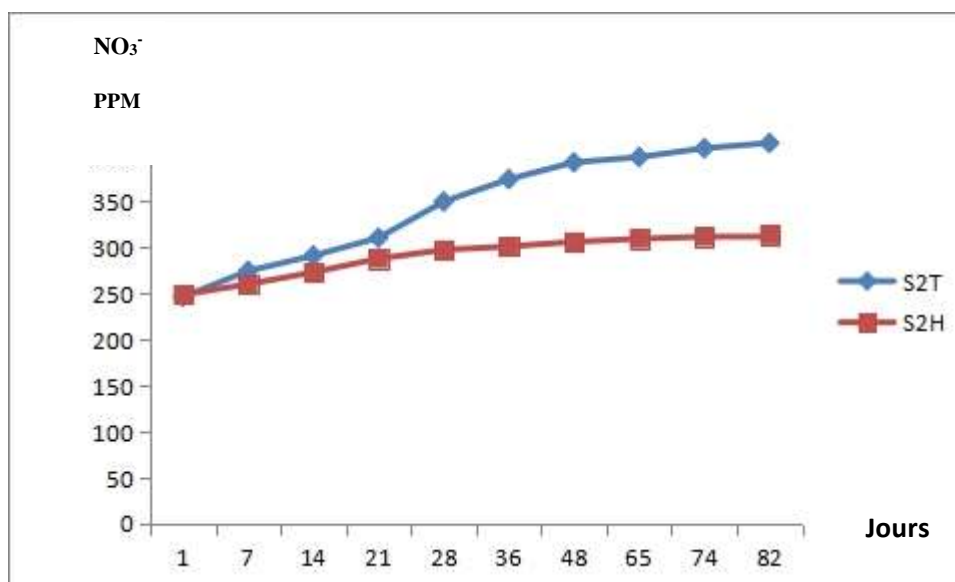


Figure 9: Effets du 2,4-D sur l'évolution de nitrate dans le sol (S2) de Mefteh

S2T : Sol2 témoin

S2H : Sol2 herbicide

Nous observons un effet dépressif prononcé de l'herbicide qui se traduit par une réduction des quantités d'azote nitrique au cours de la période de croissance de la plante (**figure 9**). Nous enregistrons les quantités de 413.66 ppm dans sol témoin, dans le système sol 2-2.4-D nous notons une quantité de 313.66.

Ces résultats sont en accord avec ceux de **Allievi et al., (1996)** qui ont utilisé le bentazone (10 mg / kg) comme biocide. **Cheloufi et al., (2019)**, constate, d'un côté que les glyphosates provoquent une diminution de la densité des micropopulations des groupes fonctionnels de la minéralisation de l'azote dans le sol sableux et d'autre côté, certaines souches bactériennes sont fortement inhibées par l'herbicide 2.4-D comme *Bacillus mycoides*, *Citrobacter freundii* et *Acinetobacter calcoaceticus*.

Concernant la cinétique de la nitrification, Nous constatons que :

- les teneurs en azote ammoniacal augmentent faiblement au cours de la troisième semaine, ceci peut correspondre à une phase d'adaptation des microflore.
- Cependant, la vitesse de l'activité nitrificateurs augmente fortement après la 21^{ème} jours et s'étale jusqu' au 48^{ème} jour. A partir de la 7^{ème} semaine et ce jusqu'au 82^{ème} jours, nous notons une tendance à la diminution de la teneur en nitrate.

éventuellement à une réorganisation microbienne comme l'a rapporté Ratcliffe et al. (2006) dans leurs travaux.

- Par la suite, l'ammonification reprend à partir de 42^{ème} jours selon un faible rythme et ce, jusqu'au 60^{ème} jour d'incubation. Nos résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Haney et al. (2000), dans leurs études sur l'influence du glyphosate sur l'ammonification.

Concernant l'importance relative de l'effet des herbicides sur la minéralisation de l'azote organique de S2, l'étude statistique basée sur l'analyse de variance à un facteur (herbicide) ou un facteurs (herbicide) révèle l'existence de différences très significatives au plan de la minéralisation entre les systèmes témoins et les systèmes sols herbicides (annexe).

VI.2.2. Effet d'inhibition du glyphosate sur la libération du nitrate dans les sols

Dans les conditions adoptées, nous notons, sur une période de 82 j, un taux d'inhibition du 2,4-D est de 26 % dans le sol 1, tandis que dans le sol S2, ce taux atteint de 24 %. Il ressort de ce fait que cet herbicide a un effet dépressif relativement plus accentué dans le sol S1 que S2 à l'égard des germes nitrificateurs (**tableau 7.**). Elle est due que le sol S2 possède de la quantité de K plus élevé que dans le sol S1.

Tableau 7: Taux d'inhibitions du glyphosate (S1 et S2)

Traitements	% d'inhibition
S1H	26 %
S2H	24 %

VI.2.3. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique dans les sols des périmètres irrigables de Mitidja

VI.2.3.1. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique dans le sol (S1) de Halouia

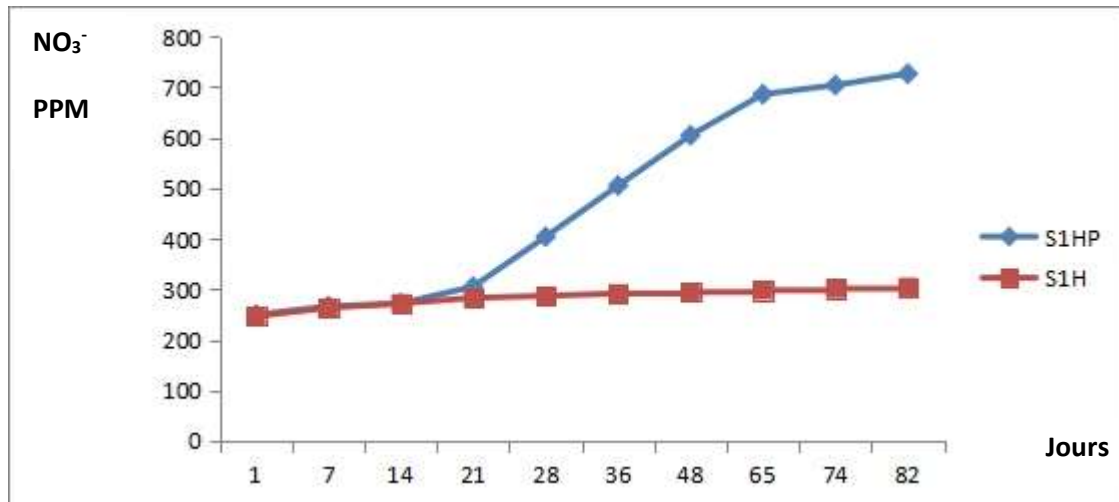


Figure 10: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution du NO₃⁻ dans le S1 de Halouia.

L'examen des résultats (**figure10**), obtenus sur une période de 82 jours de croissance de *Cicer arietinum*, révèle que la phytodégradation de 2.4-D des systèmes sol - herbicides par une fabacées (pois chiche) provoque une augmentation de la libération du nitrate. En effet, nous avons noté les quantités de 726.66 ppm dans l'échantillon S1HP comparativement au témoin S1H, nous notons de 304.33 ppm.

Cette meilleure amélioration de l'azote nitrique, est due, dont les racines de cette plante renferme les nodules riche en bactéries et des champignons mycorhiziennes, ces microorganismes responsable de minéralisation de l'azote organique.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les interactions plante - microorganismes - herbicide. Les nodules des racines sécrètent dans la rhizosphère une grande variété de composés organiques tels que des acides aminés, des sucres, des composés phénoliques, des polysaccharides et des protéines ; ce sont les exsudats racinaires (**Gregory, 2006**).

Concernant l'effet de la phytodégradation sur la nitrification, l'analyse de variance a un facteur (herbicides - plante) révèle l'existence de différence hautement significative au plan de l'activité des groupes fonctionnels de la minéralisation de l'azote entre les systèmes (sol - herbicides - légumineuse).

VI.2.3.2. Effet de Phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution de l'azote nitrique dans le sol (S2) de Mefteh

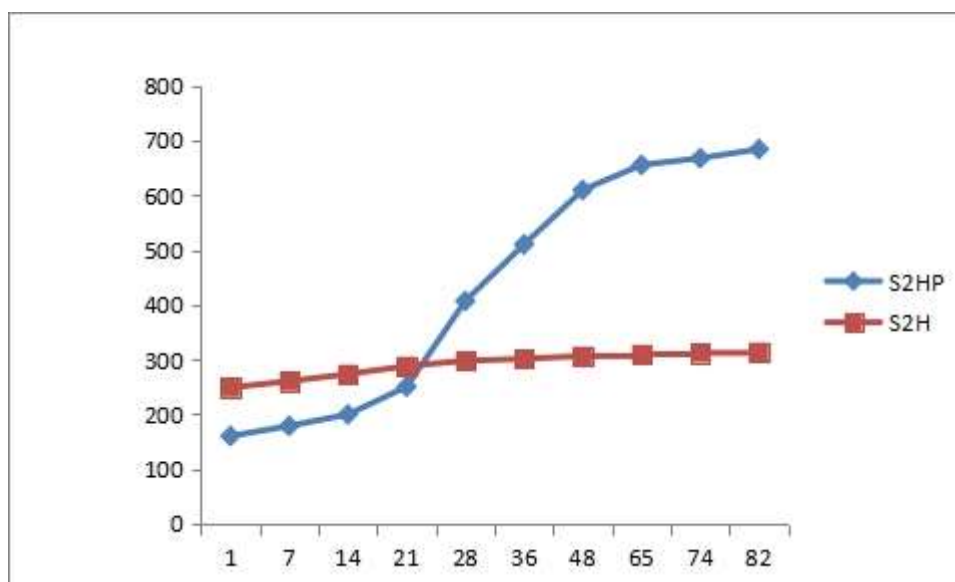


Figure 11: Effet de la phytostimulation de 2,4-D sur l'évolution du NO_3^- dans le S2 de Mefteh

S2HP : Sol2 herbicide pois chiche

S2H : Sol herbicide

Sur une période de 82 jours de croissance d'un *Cicer arietinum* (figure 11.), nous remarquons, un effet positif sur la nitrification dans le sol (S2), sous l'action de 2.4-D et planter par une légumineuse. Cette stimulation de la libération des nitrates se traduit par une accumulation de 683.66 ppm dans le système « S2HP » ; alors que les quantités de 313.66 ppm est noté dans pour les systèmes non planté « S2H ».

Cette augmentation de l'azote nitrique est due essentiellement à l'apport de microorganismes mycorhizienne fournit par les nodules de pois chiche, lesquels ont favorise une meilleure activité microbiennes en particulier les germes ammonificateurs et nitrificateurs. Ceci concorde avec les travaux de Gimsing et al., (2004) et Zabaloy et al. (2008) par les quels il est noté une forte corrélation entre les bactéries et champignons de la rhizosphère et la dégradation de l'herbicide glyphosate pour trois types légumineuses et eux type de graminées dans des différents sols. Aussi, ils ont remarqué une élévation de la densité des microflores hétérotrophes dans les sols cultivés par des fabacées.

Concernant l'effet de la phytodégradation sur la nitrification (annexe), l'analyse de variance entre les systèmes (sol - herbicides - légumineuse). révèle l'existence de significative hautement différence au plan de l'activité rhizosphèrerique.

VI.2.4. Effet de stimulation de 2.4-D sur la libération du nitrate dans les sols

Nous notons que l'effet du phytodégradation est positif et il se traduit par des taux de stimulation, en effet, nous notons 54% dans le sol 2 et 45% dans le sol 1. L'effet bénéfique est alors plus prononcé dans le sol 2 et vrai semblablement ce sont les valeurs des constituants des bases échangeable et complexe argilo-humique du sol 2 plus élevé que dans le sol S1 qui auraient neutralisé l'effet du glyphosate.

Aussi, les interactions bénéfiques entre le glyphosate et la plante sont prononcées dans les sols qui se traduisent par une plus grande libération de l'azote nitrique

Tableau 8: La stimulation de 2.4-D sur la libération du nitrate dans les sols

Traitements	% d'inhibition
S1H	45 %
S2H	54 %

CONCLUSION

L'effet nocif des herbicides dans les sols est devenu une menace sérieuse pour l'environnement. Pour cela, à mieux décrire l'effet des pollutions de sol par l'herbicide d'une coté, et d'autre coté les essais de bioremédiation et leur effet sur la production des éléments majeurs.

A cet effet, nous avons choisis une technique de phytostimulation basé à planter le sol par une fabacée, en vue d'étudier la décomposition de 2.4-D par des nodules de cette plante et leur effet sur la libération de l'azote et du le phosphore (N et P).

Il ressort de cette étude les points suivants ;

➤ une influence hautement significative négative de l'herbicide 2.4.D sur la production de l'azote nitrique NO_3^- dans le sol. Ainsi, Il est noté de ce fait, une différence au plan de l'intensité (quantité et vitesse) du processus de nitrification dans les systèmes sols et les systèmes sols-herbicides.

➤ la phytostimulation de 2.4-D par les nodules de *cicer arietinum* accroît la densité bactérienne et permet aux microorganismes de dégrader le 2.4-D, donc, elle influence positivement l'évolution de NO_3^- dans le sol de Halouia et de Mefteh.

➤ un effet significatif négatif de 2.4-D sur l'évolution et la production de P_2O_5 .

➤ La phytostimulation de *cicer arietinum* provoque une augmentation de la libération du phosphore assimilable. Il en résulte une meilleure mobilisation microbienne du phosphore et éventuellement une dégradation d'herbicides par les rhizobactériennes dans le sol de Halouia et Mefteh.

➤ L'effet négatif de 2.4-D traduit par des taux d'inhibition vis-à-vis les microorganismes

➤ L'effet positive de l'herbicide traduit par des taux de stimulation

Les résultats obtenus dans notre étude sont probants et méritent d'être plus approfondies.

REFERENCES

Alaoui S.B. (2003). Conduite technique de l'orge. Production de fourrage à partir de céréales cultivées seules ou mélangées avec les légumineuses. Techniques de production des principales cultures fourragères en Bour et en irrigué. Session de formation au profit des techniciens et ingénieurs de l'ORMVA des Doukkala. Décembre 2003.

Allegrini, M, Elena., del V. Gomez, Zabaloy M. C., 2017. Repeated glyphosate exposure induces shifts in nitrifying communities and metabolism of phenylpropanoids. *Soil Biology and Biochemistry* 105, 206-215.

Avis AFSSA n° 2008-SA-0034 du 26/03/09

Bérard A., (1994). Pesticides, quels sont les risques ? *Aqua revue*, 53,12-15.

Bio-enligne.com.

Bradyrhizobium japonicum in Response to Hydroxycinnamic Acids and Isoflavonoids
Appl Environ

Cheloufi R, H. Alayat et H. Messaadia. 2017c. Effet d'un apport de deux types de fumiers de bétail sur la biodégradation de deux herbicides (Glyphosate et 2,4-D) dans les sols agricoles de périmètre irrigable de Bounamoussa, extrême Nord Est Algérien. *Afrique SCIENCE*. 13(5) ; 161 – 173. <http://www.afriquescience.info>. 96.

Cheloufi R., H. Messaadia, H. Alayat. 2017 a. Biodegradation of Herbicides by *Pseudomonas aeruginosa* in two Soils Types of the Bou Namoussa irrigable perimeter (Algerian Extreme Northeast): Effects on mineral nutrition (P2O5 and NO3-). *JMES*, Volume 8, Issue 7, Page 2513-2521. 99.

Cheloufi R, Messaadia H et Alayat H 2017b. Effet du glyphosate et 2.4-d sur la production du CO2, NO3 - et NH4 + dans les sols du périmètre irrigable de Bouna Moussa. *Revue des BioRessources*. 7 (1) ; 92- 106. 97.

Cheloufi R., H. Messaadia and H. Alayat. 2016. The Bio-Augmentation of Glyphosate and 2,4- D By *Pseudomonas Aeruginosa* In Two Soil Types of The Bou Namoussa' Irrigable Perimeter (Algerian Extreme Northeast) : Effects on Bioavailability of Assimilable Phosphorus (P2O5) And Nitrates (NO3-). *Advances in Environmental Biology*, 10 (4); 140 – 148. 98.

Cheloufi., R, 2012, Influence de deux herbicides sur la minéralisation du sols (W El tarf). Thèse de magister, université El tarf). 100. Cheloufi., R, Zouaoui., H et Messaadia., H, 2013. Impact of Herbicides upon dynamic of the nitrogen in Soils Albanian *j. agric. sci.* p: 375-381.

Cordell D, Drangert Bonjour, Blanc S (2009). L'histoire du phosphore : sécurité alimentaire **Coulibaly, H., (2005).** Le SCV (Semis direct sous Couverture Végétale), un élément stratégique de gestion durable des terres agricoles : une expérience française comme base de réflexion pour le Mali. Mémoire (DEPA. France). Chapitre 2 (p13-20).

Document obtenu sur le site Cirad du réseau <http://agroecologie.cirad.fr> Document obtenu sur le site Cirad du réseau <http://agroecologie.cirad.fr>

Duchaufour, P. (1977). Pédologie; t. I, Pédogenèse et classification, Paris, Masson, XVI et 477 p., 92 fig., 16 pi. phot, 17 x 24,5 cm, cartonné toile, 160 FF

Edelahi D, M.C. (2004). Contribution à l'étude de dégradation un situ des pesticides par procédés d'oxydation avancés faisant intervenir le fer. Application aux herbicides phénylurées. Thèse (docteur de l'Université de Marne la Vallée). Chapitre 1 (p22- 25).

Garage D.J. (2004). Infection and invasión of root by symbiotic. Nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbio Mol Biol Rev* .68.280.300

GERVY R, 1970 : les phosphates et l'agriculture. DUNOD, Paris. 2098p.

Gilbert N ç2009). Environnement, élément nutritif envoie de disparition. *Nature* 461 :716-718

Gobat JM. Aragno M. et Mathey W. (2003) – Le Sol Vivant (2ème édition). Lausanne, 569 pp.

Hirsch A.M.(1992).Developmental biology of legume nodulation.*New phytol* 122,211-237

□ **Hirsch A.M.,Lum M.R., and Downie J.A(2001).**what makes the Rhizobia-legume symbiosis sols

[https://www.ligue-cancer.net/article/26533_les-pesticides-facteurs-de-risque-de-certainscancers.](https://www.ligue-cancer.net/article/26533_les-pesticides-facteurs-de-risque-de-certainscancers)

KAPE R., »PARNISKE M.,WERNER D., 1991. Chemotaxis ans nod Gene Avtivity of

Madjida,Chekhma,Zahra, H. F.,β Yasmina,A.I.B.(2020).Monoculture et culture en association (Céréales-légumineuses) :Fertilisation minérale et biologique (Doctoral)

Marc.J, (2004), Effets toxiques d'herbicides à baise de glyphosate sur la régulation du cycle cellulaire et le développement précoce en utilisant l'embryon d'oursin. Thèse (docteur de l'université de Rennes1). Chapitre Monard C, Binet F, Vandenkoornhuysse P. 2008a. Short-term response of soil bacteria to carbon enrichment in different soil microsites. *Appl Environ Microbiol.*;74:5589–5592. 295.

Microbiol,57 :316-319

Monard C, Martin-Laurent F, Devers-Lamrani M, Lima O, Vandenkoornhuysse P, Binet F. 2010. atz Gene expressions during atrazine degradation in the soil drilosphere. *Mol Ecol.*;19:749–759. 296.

Monard C, Martin-Laurent F, Vecchiato C, Francez A-J, Vandenkoornhuysse P, Binet F. 2008b. Combined effect of bioaugmentation and bioturbation on atrazine degradation in soil. *Soil Biol Biochem.*;40:2253–2259.(p 13-19).

Olson B and E. W. Mand Lindwall. 1991. Soil microbial activity inder chemical fallow conditions effets of 2,4 D and Glyphosate. Soil biology and biochemistry, 23 ; 1071 – 1075.

PEREDA CAMPOS M.V., 2008- Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* (Maire) P. D. Orton. Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I (France).

Raghothama KG ç1999) Acquisition de phosphate. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol 50 : pp 665-693

Rhizobia.Curr Opin Microbiol. 3 :613-617

Woods S.M.,NEWCOMB W., 1989. Nodule morphogenesis :the early infection of Alfafa (*Medicago sativa*) root hairs by *Rhizobium meliloti*. Can J Bot.67 :3108

Zabaloy MC, Gomez E, Garland JL, Gomez MA (2012) Assessment of microbial community function and structure in soil micro- cosms exposed to glyphosate. Appl Soil Ecol 61:333–33-3122.

Zouaoui., A, Cheloufi., R, Messaadia., H, 2013. Impact of herbicides upon the dynamic of the organic carbon in soils. Albanian j. agric. Sci. p: 223-228.

Olson B and E. W. Mand Lindwall. 1991. Soil microbial activity inder chemical fallow conditions effets of 2,4 D and Glyphosate. Soil biology and biochemistry, 23 ; 1071 – 1075.

Gobat JM. Aragno M. et Mathey W. (2003) – Le Sol Vivant (2ème édition). Lausanne, 569 pp.