



DEPARTEMENT DE BIOLOGIE
Mémoire de fin d'études

Présenté par

M^{elle} Brakni Nardjess

Pour l'obtention du diplôme de

Master en biologie

Spécialité : Microbiologie appliquée

Thème

**Impact des produits phytosanitaires sur quelques
microorganismes du sol cultivé par la pomme de
terre (*Solanum tuberosum* L. var *Sylvana*).**

Soutenue publiquement le 03 Juillet 2019

Devant le Jury :

Président : REBAI O.

MCA

Université de Mostaganem

Examineur : HENNIA A.

MCB

Université de Mostaganem

Encadreur : NEMMICHE S.

Prof

Université de Mostaganem

Thème réalisé au laboratoire de biochimie et de microbiologie de l'Université de Mostaganem

Année universitaire : 2018/2019

Dédicaces

Je dédie ce noble travail

A ma famille

A mes amis

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa
réalisation*

Remerciement

Je profite, par le biais de ce mémoire, d'exprimer mes sincères remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail.

Je voudrais, tout d'abord, remercier grandement mon encadreur, Monsieur Nemmiche Said, Professeur à l'université de Mostaganem, Pour son sa disponibilité et ses encouragements. Je suis honorée d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me fournir de l'aide et des conseils pour la réalisation au court de la réalisation de mon travail.

Je remercie également les membres de jury Madame Rebai Ouafaa, MCA à l'Université de Mostaganem et Madame Hennia, MCB à l'Université de Mostaganem pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie encore une fois Madame Hennia pour sa présence, son aide, son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Je remercie ainsi les techniciennes des laboratoires (Hafida, Amel et Rachida), de m'avoir fourni de l'aide, des conseils et toute possibilité pour réaliser mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mes chers enseignants d'avoir enrichi mes connaissances et de m'avoir guidé durant toute cette année Pr. Djibaoui Rachid, Pr .Bouznad Lahcen, et Dr .Tissourass.

Je remercie particulièrement Dr .Arabi de m'avoir fourni de l'aide et des conseils précieux pour la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements à tous mes camarades de la promotion ainsi que mes chères amies Wafaa et khadija.

Enfin je remercie chaleureusement ma famille et mes proches Zinou, Namira, Yasmine et Amir pour leur courage et leur soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Les produits phytosanitaires sont utilisés en agriculture pour la protection des cultures contre les organismes considérés comme nuisibles. Cependant ils peuvent avoir des effets secondaires néfastes pour l'environnement y compris le sol. Le travail entrepris a concerné cet aspect, précisément l'impact des produits phytosanitaires appliqués à deux doses différentes sur la croissance de la microflore du sol (bactéries et champignons). Les résultats obtenus ont montré que l'application de la première dose (dose agronomique) induit une baisse significative de la population bactérienne et fongique de l'ordre de 28% et 48%, respectivement. Ces résultats ont été confirmés par les valeurs enregistrées avec la technique du NPP (23%) et avec celle de la fumigation-extraction (47%). L'application de la dose 2 (2 x la dose agronomique) a accentué cette diminution microbienne jusqu'à 50% et 67%, respectivement. La technique de dénombrement sur milieu solide a, par contre, révélé des densités microbiennes (bactérienne et fongique) légèrement plus élevées que celles observées sur le témoin. Ces résultats affirment que les produits phytosanitaires agissent, en effet, sur la microflore du sol, car sa hausse et sa diminution reflète un dérèglement de son activité.

Mots clés : Produits phytosanitaires - biomasse microbienne - microflore du sol - bactéries - champignons.

Abstract

Phytosanitary products are used in agriculture to protect the crop from harmful organisms but can have undesirable side effects on the environment. The work undertaken focused on soil aspect, precisely the impact of plant protection products applied at two different doses on the growth of soil microflora (bacteria and fungi). The results obtained showed that the application of the first dose has a significant effect on the decrease of bacterial and fungal populations of the order of 28% and 48%, respectively. These results are confirmed by the values recorded with the NPP technique (23%) and the microbial biomass technique (47%). The application of dose 2 increased this microbial decrease to 50% and 67%, respectively. On the other hand, the solid medium enumeration technique revealed slightly higher microbial densities (bacterial and fungal) than that observed for the control. These results affirm that plant protection products act on soil microflora because its increase and decrease reflect a disruption of its activity.

Keywords: Plant protection products - microbial biomass - soil microflora - bacteria - fungi.

الملخص

تستخدم المبيدات الفلاحية لحماية المحاصيل من الآفات. و لكن، يمكن أن يكون لها آثار ضارة على البيئة. العمل الذي تم القيام به يتعلق بالتربة ، وبالتحديد، تأثير هاته المبيدات المطبقة على جرعتين مختلفتين على نمو ميكروبات الأرض (البكتيريا والفطريات). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها، أن تطبيق الجرعة الأولى له تأثير كبير على انخفاض أعداد البكتيريا والفطريات بنسبة 28 % و 48 % على التوالي. تم تأكيد هذه النتائج من خلال القيم المسجلة باستخدام تقنية NPP (23%) وبقيمة الكتلة الحيوية الميكروبية (47%). أدى تطبيق الجرعة 2 إلى زيادة هذا النقص الميكروبي بنسبة تصل إلى 50% و 67% على التوالي. من ناحية أخرى ، أظهرت تقنية التعداد في الوسط الصلب، أن الكثافة الميكروبية (البكتيرية والفطرية) أعلى قليلاً من تلك التي لوحظت في الشاهد. تؤكد هذه النتائج أن المبيدات الفلاحية تؤثر على ميكروبات التربة ، لأن الزيادة والنقصان في الكمية يعطلان نشاطها.

الكلمات المفتاحية: المبيدات الفلاحية ، الكتلة الحيوية الميكروبية، النباتات الدقيقة الأرضية، البكتيريا، الفطريات

Table des matières

Chapitre I 1. Généralités sur la pomme de terre	4
1.1. Historique de la pomme de terre	4
1.2. Description botanique de la pomme de terre	4
1.3. Classification de la pomme de terre	4
1.4. Cycle de développement de la pomme de terre	5
1.4.1. Cycle sexué	5
1.4.2. Cycle végétatif	5
1.5. Exigences écologiques de la pomme de terre	5
1.5.1. Exigences climatiques	5
1.5.1.1. La température	5
1.5.1.2. La lumière	6
1.5.1.3. L'alimentation en eau	6
1.5.2. Exigences édaphiques	6
1.6. Techniques culturales de la pomme de terre	6
1.6.1. Préparation du sol	6
1.6.2. Fertilisation	7
1.7. Variétés de la pomme de terre	7
1.7.1. Variétés de pomme de terre en Algérie	8
1.8. Opérations d'entretien	8
1.8.1. Buttage	8
1.8.2. Binage	8
1.9. Récolte et conservation de la pomme de terre	9
1.9.1. Récolte	9
1.9.2. Conservation	9
1.10. Importance économique de la pomme de terre dans le monde	9
1.11. Culture de la pomme de terre en Algérie	11
1.11.1. La culture de pomme de terre dans la région de Mostaganem	11
1.12. Les principaux bioagresseurs de la pomme de terre	12
Chapitre II 2. La microbiologie du sol	14
2.1. Le système sol	14
2.1.1. La phase solide	14
2.1.2. La phase liquide	15
2.1.3. La phase gazeuse	15
2.1.4. Les organismes vivants du sol	15
2.2. La texture du sol	16
2.3. La structure du sol	17
2.4. Principaux types de microorganismes présents dans le sol et leur influence sur le milieu édaphique	17
2.4.1. Microorganismes procaryotes	18
2.4.1.1. Les bactéries	18
2.4.2. Microorganismes eucaryotes	20
2.4.2.1. Les protozoaires	20
2.4.2.2. Les Champignons	20
2.4.2.3. Les algues	21
2.5. Influence du milieu édaphique sur la microflore d sol	22

2. 5.1. Influence de la température	22
2. 5.2. Influence de la pression hydrostatique	22
2. 5.3. Influence du pH	22
2. 5.4. Influence de la texture du sol	22
2. 5.5. Influence du potentiel d'oxydo-réduction	23
2. 5.5.1. L'atmosphère du sol	23
2. 5.6. Influence du carbone organique	23
2. 5.7. Influence de l'eau	23
2. 6. Interactions plantes-microflore du sol	24
2. 7. Interactions faune- microflore du sol	25
2. 7.1. Interaction des nématodes et de la microflore	25
2. 7.2. Interactions mésofaune-microflore du sol	25
2. 7.3. Interactions vers de terre (lombriciens) - microflore du sol	25
2. 7.4. Interactions fourmis-microflore du sol	26
2. 8. Interactions entre les constituants de la microflore du sol	26
2. 8.1. Interactions champignons-bactéries	26
2. 8.1. Les interactions bénéfiques	27
2. 8.1.1. Mutualisme	27
2. 8.1.2. Transport	28
2. 8.2. Les interactions délétères	28
2. 9. Interaction entre les bactéries du sol	28
2. 10. Interaction protozoaires- bactéries	30
2. 11. Interactions microalgues – bactéries	30
Chapitre III 3. La lutte chimique	31
3. 1. Historique de la lutte chimique	31
3. 2. Les produits phytosanitaires	32
3. 3. Classification des produits phytosanitaires	32
3. 3.1. Premier système de classification	33
3. 3.2. Deuxième système de classification	33
3. 3.4. Les pesticides inorganiques	33
3. 3.5. Les biopesticides	34
3.4. Législations régissant les pesticides	35
3.4.1. L'union Européenne	35
3.4.2. L'Algérie	35

3.5. Effet des pesticides sur l'environnement	36
3.5.1. Effets sur la santé	36
3.5.2. Ecotoxicité des pesticides	36
3.6. La lutte chimique contre les principaux bioagresseurs de la pomme de terre	37
3.6.1. Le mildiou	37
3.6.2. La fusariose	37
3.6.3. La teigne de la pomme de terre	37
3.6.4. Les pucerons	38
3. 7. Impact de la lutte chimique sur la microflore du sol	38
3. 8. La lutte chimique dans le monde	39
3. 8.1. La lutte chimique en Algérie	40
Matériel et méthodes	41
1. Objectif	41
3. Présentation du site d'étude	41
3.1.Climat	41
2. 2. Sols	43
2.3. L'irrigation	43
3. Matériel et produits utilisés	43
3. 1. Matériel végétal	43
3. 2. Produits utilisés	43
4. Méthodes	44
4. 1. Collecte et la conservation des échantillons de sol	44
4. 2. Analyses physico-chimiques	45
4. 2.1. Mesure de la conductivité électrique	45
4. 2.2. Mesure du pH	45
4. 3. Analyses microbiologiques	45
4. 3.1. Préparation des suspensions-dilutions	45
4. 3.2. Dénombrement de la microflore totale	45
4. 3. 2.1. Dénombrement de la microflore totale en milieu liquide	45
4. 3.2.2. Dénombrement des bactéries sur milieu solide	46
4. 3.3. Dénombrement des champignons	46

4. 3.4. Détermination de la biomasse microbienne	46
--------------------------------------------------	----

Résultats et discussions

1. Analyses physico-chimiques	48
1. 1. Mesure de la conductivité électrique	48
1. 2. Mesure du pH	48
2. Analyses microbiologiques	49
2. 1. Détermination de la microflore totale	49
2. 1.1. Dénombrement de la microflore totale sur milieu liquide	49
2. 1.2. Dénombrement des bactéries sur milieu solide	50
2.2. Dénombrement des champignons	50
3. La méthode de la fumigation-Extraction	51
Conclusion	52
Références bibliographiques	53
Annexes	

Liste des figures

Figure 1. Répartition de la production mondiale de pomme de terre par continent (FAOSTAT,2014)

Figure 2. Production de la pomme de terre au niveau national (DSA, 2015).

Figure 3. Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants (Darcheville, 2008).

Figure 4. Schéma représentant la diversité biologique et le fonctionnement du sol (Galet, 2014)

Figure 5. Triangle des textures d'un sol (Lombard, 2015)

Figure 6. Promotion de la croissance des plantes par les PGPR (Cherif,2014)

Figure 7. Vision coûts-bénéfices de l'interaction plantes-microorganismes(Lepinay, 2013).

Figure 8. Les différentes étapes de la formation d'un biofilm bactérien(Aye, 2015).

Figure 9. Fonctionnement du quorum sensing bactérien (Doberva, 2016)

Figure 10. Site d'expérimentation de Mazagran (Google Earth,,2019).

Figure 11. Le plan expérimental du département des sciences agronomiques-Mazagran (Haffari et Merzoug, 2017)

Figure 12. Dénombrements de la microflore totale du sol en milieu liquide (Extrait de Sol) par la technique NPP dans les échantillons de sol traité par les produits phytosanitaires. Les résultats sont exprimés en pourcentage de cellules/g sol sec.

Figure 13. Dénombrements des bactéries du sol sur milieu solide (Extrait de Sol). Les résultats sont exprimés en pourcentage de cellules /g sol sec (milieux gélosés).

Figure 14. Résultats du dénombrement des champignons sur milieu solide.

Figure 15. Analyse statistique des résultats de la fumigation-extraction

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principales variétés de pomme de terre cultivées en Algérie (DSA-Mostaganem, 2017).

Tableau 2 : Classement des pays producteurs de pomme de terre (FAOSTAT, 2014).

Tableau 3 : Production des pommes dans la wilaya de Mostaganem (Année : 2016-2017) (DSA Mostaganem, 2017)

Tableau 4 : Principales maladies de la pomme de terre (Rousselle, 2014).

Tableau 5 : Historique de l'évolution des trois plus grandes familles de produits phytosanitaires dès les années 1900 jusqu'aux années 2000 (Batsch, 2011)

Tableau 6 : Principaux groupes de pesticides classés selon leurs cibles (Baldi *et al.*, 2013)

Tableau 7 : Principaux pays consommateurs de pesticides dans les années 2000 (Pariona, 2017)

Tableau 8 : Caractéristiques des produits phytosanitaires utilisés

Tableau 9 : Tableau récapitulatifs des produits phytosanitaires et des doses utilisées pour l'échantillon 1 et 2.

Tableau 10 : Résultats de la mesure de la conductivité électrique.

Tableau 11. Résultats de la mesure du pH.

Liste des abréviations

ACI : Agro Consulting International

AODC : Acridine Orange Direct Count

APG : Angiosperm Phylogeny Group

Ce : Conductivité électrique

CPP : Comité de la Prévention et de la Précaution

DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane

DSA : Direction des Services Agricoles

EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments

EPS : Exopolysaccharides

ES : Extrait de Sol

ESA : Extrait de Sol Agar

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GA : Acide gibbérellique

IAA : l'acide indole acétique

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

MADRP : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

NPP : Nombre le plus probable

P : Probabilité

PGPR : Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes

QS : quorum sensing

Rpm : Rotation par minute

USDA : Département de l'Agriculture des États-Unis

Introduction générale

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est la deuxième culture principale dans le monde après les céréales, elle présente une bonne source de protéines et des hydrates de carbone. C'est un aliment principal dans plusieurs pays notamment l'Algérie, elle peut être également employée comme plante industrielle pour produire le dextrose (Boukaya, 2016).

D'un point de vue des superficies et des productions, la culture de pomme de terre occupe la première place parmi les cultures maraichères, les plus cultivées en Algérie. Par exemple en 2010, pour 400.000 ha occupés par les cultures maraichères, plus de 150.000 ha sont réservés pour la culture de pomme de terre soit 26 % de la superficie maraichère totale (Khedam, 2018). S'agissant de la productivité, elle s'élève à 4.673.516 tonnes cultivées avec un rendement de 299,2 qx/ha en 2014, alors que juste après l'indépendance elle s'élevait à 250.000 tonnes cultivée sur 15.000 ha seulement (Khedam, 2018).

Les sols se caractérisent par des propriétés physico-chimiques très variables telles que le pH, la granulométrie, la concentration en eau et en nutriments. Pour cette raison, dans le sol de nombreux environnements différents se côtoient, offrant une gamme d'habitats très variée pour les micro-organismes. Le sol constitue ainsi un des plus grands réservoirs de diversité biologique (Dance, 2008). Parmi les micro-organismes du sol, les champignons et les bactéries sont très abondants. Il a été estimé qu'un gramme de sol pouvait contenir jusqu'à 200 m d'hyphes fongiques (Van Der Heijden *et al.* 2008) et 10^8 à 10^{11} de cellules bactériennes (Sikorski, 2015). Ces organismes constituent des acteurs clés des cycles du carbone et des nutriments dans les sols, tels que l'azote et le phosphore, qui sont des éléments essentiels à la production des molécules telles que les acides nucléiques ou les protéines (Marschner et Rengel, 2007). Ces micro-organismes favorisent ainsi la biodisponibilité de ces éléments dans les sols via la dégradation de la matière organique (Miquel-Guennoc, 2017).

Les bactéries du sol vont également influencer fortement le cycle global de l'azote via la fixation biologique de l'azote atmosphérique qui est exclusivement réalisée par les procaryotes. Parmi les bactéries impliquées dans ce processus, on retrouve des bactéries symbiotiques des plantes appartenant entre autres aux genres *Rhizobium* et *Frankia*, mais également des bactéries non symbiotiques, membres des *Bacillus*, *Clostridium*, *Azobacter* et *Klebsiella* (Hopkins et Dungait, 2010). Un autre type d'activité microbienne influençant la disponibilité des nutriments dans les sols est la dissolution des minéraux via l'altération des

roches attribuée activement par les bactéries et les champignons (Urozet *al.* 2011 ; Balogh-Brunstadet *al.* 2008). Cette dissolution des minéraux, réalisée par exemple via la production d'acides organiques et d'agents chélateurs comme les sidérophores, elle permet l'enrichissement du sol en éléments minéraux essentiels à la fertilisation. Les bactéries et les champignons du sol vont également participer à sa structuration par le phénomène d'agrégation via la production d'exopolysaccharides. Enfin, les micro-organismes du sol influencent directement la production végétale, positivement ou négativement. Ceux ayant une influence négative comprennent les pathogènes et les parasites des plantes (Miquel-Guennoc, 2017). Parmi les micro-organismes influençant positivement la productivité végétale, on trouve les bactéries et les champignons symbiotiques des plantes. Concernant les bactéries, une des symbioses les plus répandues est celle réalisée par les bactéries du genre *Rhizobium*, qui forment des organes symbiotiques appelés nodules avec les racines des légumineuses, aux seins desquelles les échanges nutritifs entre les partenaires vont avoir lieu. Ces bactéries fournissent à la plante de l'azote, grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, et en retour la plante fournit aux bactéries de la matière carbonée (Miquel-Guennoc, 2017).

Parmi les microorganismes du sol on trouve ainsi la microfaune, celle-ci est constituée d'individus dont la taille est généralement inférieure à 0,2 mm. Cette catégorie renferme des animaux qui ne peuvent vivre que dans un milieu aqueux, et qui sont de taille microscopique ou de forme très effilée, ce qui leur permet de pénétrer dans les capillaires du sol. Les différentes espèces de la microfaune présentent le plus souvent des formes de résistance à la sécheresse (vie ralentie, déshydratation, enkystement). Les Protozoaires et les Nématodes constituent l'essentiel de cette microfaune (Kadi, 2015).

L'intensification de l'agriculture a engendré une utilisation croissante des fertilisants et des produits phytosanitaires due au progrès dans le domaine de la chimie organique de synthèse. Ces produits, qu'ils soient de synthèse ou naturels, sont destinés à limiter la prolifération des parasites tels que les mauvaises herbes, les insectes, les champignons, les rongeurs, et les acariens dans le but d'améliorer les rendements agricoles (Agoussar, 2017).

Les produits phytosanitaires figurent parmi les polluants dangereux de l'environnement en raison de leurs stabilités, leurs mobilités, et les effets à long terme sur les organismes vivants. Le devenir des pesticides concerne tout le milieu naturel dans son

ensemble (sol, eau et air) mais le sol reste un compartiment clé car une grande proportion des pesticides appliqués lors du traitement des cultures arrive au sol. L'Institut National de Protection des Végétaux estime que plus de 480 pesticides sont utilisés en Algérie, dans le domaine de l'agriculture. Les autorités algériennes emploient l'expression d'usage « produits phytosanitaires à usage agricole».

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude. L'objectif est d'estimer l'impact des produits phytosanitaire sur la microflore du sol cultivé par la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L. var *Sylvana*). Notre travail expérimental consiste à :

1. Déterminer les paramètres physico-chimiques des sols étudiés (pH et conductivités électriques) ;
2. Et estimation de la microflore du sol (bactéries et champignons) par trois techniques microbiologiques différentes (NPP, comptage de colonies et fumigation-extraction).

Synthèse
bibliographique

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

1. 1. Historique de la pomme de terre

La pomme de terre est probablement originaire de l'Amérique latine. Elle a été introduite en Europe en 1567 et s'est répandue rapidement dans le monde entier (Ames and Spooner, 2008).

1. 2. Description botanique de la pomme de terre

La pomme de terre est une culture à cycle annuelle, elle est caractérisée par la présence de stolons, inducteurs de tubercules. Les tiges aériennes sont généralement au nombre de deux à dix, parfois davantage avec un port plus ou moins dressé et une section irrégulière. Les feuilles sont composées et permettent par leur aspect et leurs colorations, de caractériser les variétés. Les fleurs dont la couleur et le nombre caractérisent les variétés sont généralement autogames. Elles peuvent être de couleur blanche, bleue, violette ou rose suivant les variétés. Les fruits ou baies contiennent des graines sans intérêt en culture, mais essentielles en sélection amélioratrice (Elzebroek, 2008).

Le système souterrain comprend les racines, les tiges souterraines (stolons) et les tubercules. Les racines nombreuses et fines sont fasciculées et peuvent pénétrer facilement le sol s'il est suffisamment meuble. Les stolons sont plus ou moins courts et leurs extrémités se renflent pour former les tubercules : ce sont les organes de conservation qui permettent de classer la pomme de terre parmi les plantes vivaces. C'est dans cet organe que la plante accumule toutes ses réserves nutritives (Nassar, 2009).

Le genre *Solanum* L., qui contient environ 1500 espèces (Bohs, 2007) comprend trois cultures vivrières principales : la pomme de terre (*S. tuberosum* L.), la tomate (*S. lycopersicum* L.) et les aubergines (*S. melongena* L.), ainsi que d'autres aliments mineurs, médicaments et plantes ornementales (Ames and Spooner, 2008).

1. 3. Classification de la pomme de terre

La pomme de terre fut classée par APG III (2009) comme suit :

Règne : Plantae

Embranchement : Spermatophytes

Sous-embranchement : Angiospermes

Classe : Dicotyledones

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

Sous-classe : Asterideae

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Sous-famille : Solanoideae

Genre : *Solanum*

Espèce : *Solanum tuberosum* L.

1. 4. Cycle de développement de la pomme de terre

1. 4. 1. Cycle sexué

Le fruit est une baie sphérique ou ovoïde qui mesure 1 à 3 centimètres de diamètre, il contient généralement plusieurs dizaines de graines (Bernhards, 1998), et peut aller jusqu'à 200 graines (Rousselle *et al.*, 1996). La pomme de terre est très peu reproduite par graines dans la pratique agricole, cependant la graine est l'outil de création variétale (Soltner, 2005). La germination est épigée et les cotylédons sont portés au-dessus du sol par le développement de l'hypocotyle. En conditions favorables, quand la jeune plante a seulement quelques centimètres de hauteur, les stolons commencent à se développer d'abord au niveau des cotylédons puis aux aisselles situées au-dessus, et s'enfoncent dans le sol pour donner des tubercules (Bernhards, 1998).

1. 4. 2. Cycle végétatif

La pomme de terre se reproduit naturellement par multiplication végétative. Le tubercule n'est pas seulement un organe de réserve, c'est aussi un organe qui sert à la multiplication végétative, cette dernière se déroule en trois étapes : la dormance, la germination et la tubérisation (Rousselle *et al.*, 1996).

1. 5. Exigences écologiques de la pomme de terre

1. 5. 1. Exigences climatiques

1. 5. 1. 1. La température

Il existe des températures seuils pour la pomme de terre. Son zéro de végétation se situe entre (+5°C et +7°C) et sa température optimale de tubérisation aux environs de 18°C. A + 29°C. Les tubercules risquent de geler quand les températures se situent aux alentours de -2°C (Laumonnier, 1963).

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

1. 5. 1. 2. La lumière

La pomme de terre est une plante héliophile. Ses besoins en lumière sont importants surtout pendant la phase de croissance. Ce facteur est déterminant pour la photosynthèse et la richesse en féculé des tubercules (Moule, 1982).

1. 5. 1. 3. L'alimentation en eau

Les besoins en eau de la pomme de terre varient au cours du cycle végétatif. Ils sont surtout importants au moment de l'initiation des tubercules. Un stress hydrique se manifestant à ce stade peut entraîner une réduction du nombre de stolons formés par tige (Rousselle *et al.*, 1996). Ses besoins en eau en début de végétation sont faibles alors qu'ils sont très importants au moment de la croissance foliaire et de la tubérisation (Soltner, 1990).

1. 5. 2. Exigences édaphiques

La pomme de terre peut donner de bons rendements dans les terres silico-argileuses humifères, meubles, aérées et fraîches. Elle s'accommode à des terres acides dont le pH est assez bas voire de 5,5 à 6. Cette culture tolère des sols très variés, mais la présence de calcaire actif est responsable du développement des gales et d'une qualité gustative inférieure (Bamouh, 1999 ; Soltner, 1999).

1. 6. Techniques culturales de la pomme de terre

1. 6. 1. Préparation du sol

La préparation du sol consiste à assurer un bon contact entre le plant (ou tubercule) et le sol. La levée ainsi que le développement du système racinaire vont généralement tarder si le sol est mal préparé. Le sol doit être préparé sur une profondeur d'au moins 25-30 cm. Une telle couche meuble favorise l'aération du sol, assure un bon développement racinaire et facilite le buttage. La réalisation d'un bon lit de semences peut se faire de la façon suivante :

- Labour moyen 25 à 30 cm avec charrue ;
- Epannage de la fumure organique et des engrais phospho-potassiques que l'on enfouie à l'aide d'un cover-crop croisé ;

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

- Confection des lignes ou billonnage : Ces travaux sont beaucoup plus faciles à réaliser dans un sol léger que dans un sol lourd. Dans un sol lourd, les travaux du sol doivent se limiter à la couche supérieure suffisamment ressuyée (Bamouh, 1999).

1. 6. 2. Fertilisation

La fertilisation vise à l'obtention du rendement optimum de la culture en tenant compte des impératifs de qualités des tubercules relatifs à chaque type de production. La pomme de terre se classe parmi les plantes très exigeantes en azote, phosphore, potassium, magnésium et Calcium. Il est nécessaire de raisonner les quantités d'engrais à appliquer pour ces éléments majeurs (Rousselle *et al.*, 1996).

L'azote est le facteur déterminant du rendement de la culture. Il favorise dans un premier temps le développement du feuillage, puis la formation et le grossissement des tubercules. L'acide phosphorique est un facteur de précocité et favorise le développement racinaire. La culture est sensible à une carence en magnésium qui se manifeste par un jaunissement entre les nervures des feuilles (Rousselle *et al.*, 1996).

Le phosphore intervient dans les phénomènes de floraison, fructification et maturation d'où son action comme facteur de précocité et de rendement. Le phosphore est difficilement absorbé par la plante. Pour cela il doit être appliqué avant plantation et sous la forme la plus assimilable. Le potassium est l'élément majeur pour la tubérisation. Il favorise le développement de la plante et augmente légèrement la résistance au froid. La carence en K cause des nécroses. La forme sulfate est plus préférable que la forme chlorure (Bamouh, 1999).

1. 7. Variétés de pomme de terre

Bien que les pommes de terre cultivées dans le monde entier appartiennent à la même espèce botanique, *Solanum tuberosum*, il existe des milliers de variétés, qui sont très différentes de par leur taille, leur forme, leur couleur, leur usage culinaire et leur goût (FAO, 2008).

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

1. 7. 1. Variétés de pomme de terre en Algérie

En Algérie, il existe plus de 130 variétés de pomme de terre homologuées, mais une vingtaine seulement sont cultivées dont les plus importantes sont : Bartina, Kondor, Désirée et Spunta, cette dernière variété représente 40% des volumes importés, les autres variétés occupent la deuxième place avec 35% du marché (Rekad, 2018). Les variétés importées de pomme de terre en Algérie sont reportées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Les principales variétés de pomme de terre cultivées en Algérie (DSA-Mostaganem, 2017).

Variétés rouges	Variétés blanches
Bartina	Safran
Amorosa	Spunta
Cardinal	Diamant
Kondor	Sahel
Désirée	Lola
Cléopatra	Appolo
Resolie	Ajax
Thalassa	Yesmina

1. 8. Opérations d'entretien

1. 8. 1. Buttage

Il facilite la récolte mécanisée tout en favorisant le grossissement régulier des tubercules à l'abri de la lumière dans une terre meuble (Rousselle *et al.*, 1996). Un Buttage correcte exige une section de butte de l'ordre de 60 à 650 cm², soit une base de 50 cm et une hauteur de 20 cm environ par rapport à l'entre butte. Le volume de terre nécessaire correspond à une profondeur de travail du sol de 8 à 9 cm (Rousselle *et al.*, 1996).

1. 8. 2. Binage

La culture de la pomme de terre exige une terre propre pour une bonne production. Le binage consiste à prélever les mauvaises herbes poussant entre les lignes avec la charrue et la sape entre les plants. Le 1^{er} binage se fait 2 à 3 semaines après la levée, puis il est répété chaque fois qu'on irrigue. Il faut veiller à ne pas toucher le système racinaire et les tubercules nouvellement formés (Bamouh, 1999).

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

1. 9. Récolte et conservation de la pomme de terre

La récolte et la conservation font partie des opérations les plus délicates de la culture de la pomme de terre.

1. 9. 1. Récolte

La durée du cycle végétatif de la pomme de terre est variable. L'arrachage des tubercules intervenant en fin de cycle est une opération délicate qui influence la qualité de présentation et l'aptitude à la conservation des tubercules. Les arracheuses mécaniques actuelles permettent l'arrachage de tous les tubercules en limitant le risque de meurtrissures et en éliminant la terre, les mottes, les cailloux et les fanes desséchées (Delaplace, 2007).

1. 9. 2. Conservation

Seuls les tubercules sains devraient être stockés. Les tubercules ne doivent pas être abimés et doivent avoir été nettoyés de toute trace de terre ou autres résidus. Les entrepôts doivent être nettoyés et éventuellement désinfectés. La réfrigération réduit la propagation de la contamination. Le cycle biologique de la teigne est interrompu lorsque la température descend au-dessous de 10°C. Les températures les plus favorables pour le développement de la teigne se situent au-dessus de 25°C (Sauer, 1972).

1. 10. Importance économique de la pomme de terre dans le monde

La pomme de terre joue un rôle essentiel dans les projets de réduction de la pauvreté et la sécurité alimentaire du monde en développement (FAOSTAT, 2007). A l'échelle mondiale, la pomme de terre est la principale denrée alimentaire non céréalière ainsi que la cinquième denrée agricole produite après la canne à sucre, le maïs, le riz et le blé (Figure 1). Elle est cultivée dans plus de 150 pays dont la Chine est devenue le premier pays producteur (88.9 millions de tonne) (FAOSTAT, 2015). L'Asie et l'Europe concentrent 80% de la production mondiale (FAOSTAT, 2014).

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

Asie Amérique Afrique Océanie Europe

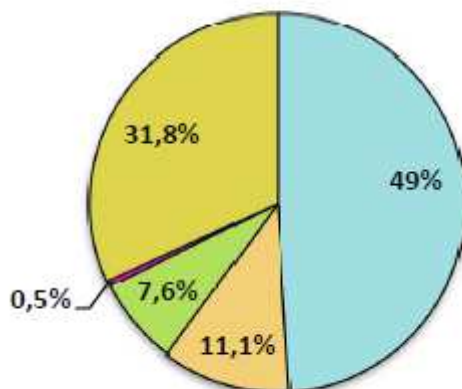


Figure 1. Répartition de la production mondiale de pomme de terre par continent (FAOSTAT, 2014).

En 2013, la production mondiale de pommes de terre a été estimée à 368.1 millions de tonnes, pour une surface cultivée de 19.4 millions d’hectares, soit un rendement moyen de 18.9 tonnes par hectare. Cette production est arrivée à 385 millions de tonnes en 2014, pour une surface de 18.8 millions d’hectares (Faostat, 2014). Les grands pays producteurs sont cités par ordre d’importance dans le tableau 2. Les données sont exprimées en tonnes métriques (FAOSTAT, 2014).

Tableau 2. Classement des pays producteurs de pomme de terre (FAOSTAT, 2014).

Classement ▲	Pays ▼	Données ▼	Date de l’information ▼
1	Chine	96136320	2014
2	Inde	46395000	2014
3	Russie	31501354	2014
4	Ukraine	23693350	2014
5	Etats-Unis	20056500	2014
6	Allemagne	11607300	2014
7	Bangladesh	9435150	2014
8	France	8054500	2014
9	Pologne	7689180	2014
10	Pays-Bas	7100258	2014

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

1. 11. Culture de la pomme de terre en Algérie

La production de cette culture a enregistré une évolution considérable durant la dernière décennie. Elle est passée de 1.506.859 tonnes en 2007 à 4.886.538 tonnes sur une superficie de 161.156 hectares en 2013 (FAOSTAT, 2016). Le rendement moyen en Algérie, toutes tranches de culture confondues, se situe autour de 28 tonnes par hectares, avec des records pouvant atteindre 60 tonnes par hectare. Les principales zones de production de pomme de terre en Algérie sont : El-Oued, Ain-Defla, Mascara et la wilaya de Mostaganem (DSA, 2015).

L'évolution continue des superficies destinées à la culture de pomme de terre implique une augmentation des besoins en semence, ce qui nécessite l'importation d'environ 100.000 tonnes de semences de pomme de terre chaque année pour assurer la couverture de ces besoins (MADRP, 2006). Cette quantité est livrée principalement par les pays Européens surtout, les Pays-Bas, la France, le Danemark et l'Ecosse (Figure 2).

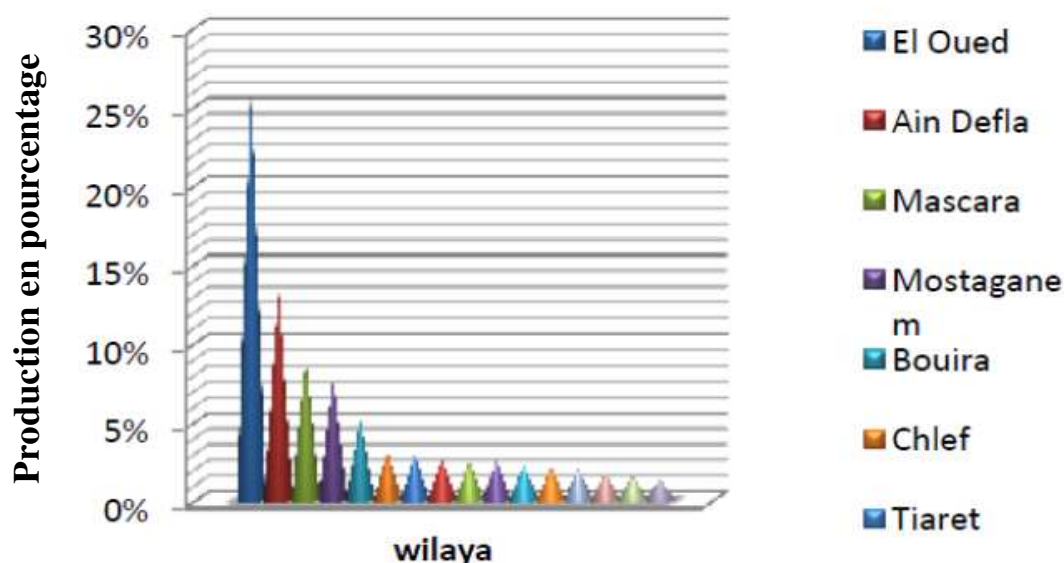


Figure 2. Production de la pomme de terre au niveau national (DSA, 2015).

1. 11. 1. La culture de pomme de terre dans la région de Mostaganem

La wilaya de Mostaganem est connue par sa production abondante de pomme de terre, selon les données statistiques des services agricoles de la wilaya, elle couvre plus de 8% des besoins du marché national ; c'est la troisième zone productrice au niveau national (DSA, 2014).

Chapitre 1. Généralités sur la pomme de terre

La pomme de terre est cultivée selon trois types ; la primeur, la saison et l'arrière-saison. Les rendements le plus élevés sont ceux de la saison. Pour l'année 2017, une production de plus d'un million de quintaux de pomme de terre d'arrière-saison, a été prévue dans la wilaya de Mostaganem, sur une superficie de 3775 hectares, selon la direction des services agricoles (Tableau 3).

Tableau 3. Production des pommes dans la wilaya de Mostaganem (Année : 2016-2017) (DSA Mostaganem, 2017)

	Arrière-saison	Primeur	Saison	Total
Superficie (ha)	3757	550	9.964	14.271
Production (qtx)	904.700	115.000	3.447.444	4.467.144

1. 12. Les principaux bioagresseurs de la pomme de terre

Les principales maladies de la pomme de terre sont reportées par le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Principales maladies de la pomme de terre (Rousselle, 2014).

Les maladies	L'agent pathogène	Les symptômes
Mildiou de la pomme de terre	<i>Phytophthora infestans</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Brunissement et recroquevillement des feuilles apicales • Dessèchement progressif des folioles
Virus X de la Pomme de Terre	Virus X (transmission par contact)	Mosaïques planes avec des décolorations entre les nervures
Virus S	Virus S (transmission par aphides)	<ul style="list-style-type: none"> • Altération de la croissance accompagnée d'une forte rugosité • Mosaïque nette • Fines taches nécrotiques à la face supérieure du limbe
TRV (Tobacco Rattle Virus)	Virus du rattle du tabac : TRV (Transmission par nématodes)	<ul style="list-style-type: none"> • Marbrures de la tige • Infection primaire du tubercule
Gale commune de la pomme de terre	<i>Streptomyces</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • Formation de tissu cicatriciel au niveau des cellules du périoderme
Rhizoctone brun de la pomme de terre	<i>Rhizoctonia solani</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des pousses grêles • Enroulement du feuillage
La jambe noire et pourritures molles	<i>Erwinia</i> sp.	<p>Nécroses plus ou moins sèches à la base de la tige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jaunissement, enroulement et flétrissement des feuilles
Nématodes à kystes	Le nématode doré de la pomme de terre : (<i>Globodera rostochiensis</i>) Le nématode blanc : <i>Globodera pallida</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Une mauvaise croissance du végétal. • Nanisme
Flétrissement des feuilles et nécrose des tissus	Le puceron vert du pêcher (<i>Myzus persicae</i>)	Transmission des virus
Maladie de l'enroulement de la Pomme de Terre	Virus de l'enroulement de la pomme de terre (PLRV)	<ul style="list-style-type: none"> • Enroulement des feuilles • Le nanisme de la plante • Durcissement des feuilles dû à l'accumulation de l'amidon.

2. 1. Le système sol

D'un point de vue pédologique, le sol est la partie superficielle de l'écorce terrestre fortement soumise à l'action des agents climatiques et biologiques (Stengel et Gelin, 1998). Les sols résultent d'une pédogenèse contrôlée par des facteurs de formation (Rossiter et Bouma, 2018).

Le sol est un milieu poreux et organisé, composé de trois phases inertes respectivement solide, liquide et gazeuse. Les proportions entre ces différentes phases peuvent varier dans le temps. En plus de ces trois phases, s'ajoutent un compartiment vivant. Ces quatre compartiments interagissent entre eux et sont le siège de nombreuses réactions bio-physicochimiques, dont quelques exemples sont cités dans la figure 3 (Darcheville, 2008).

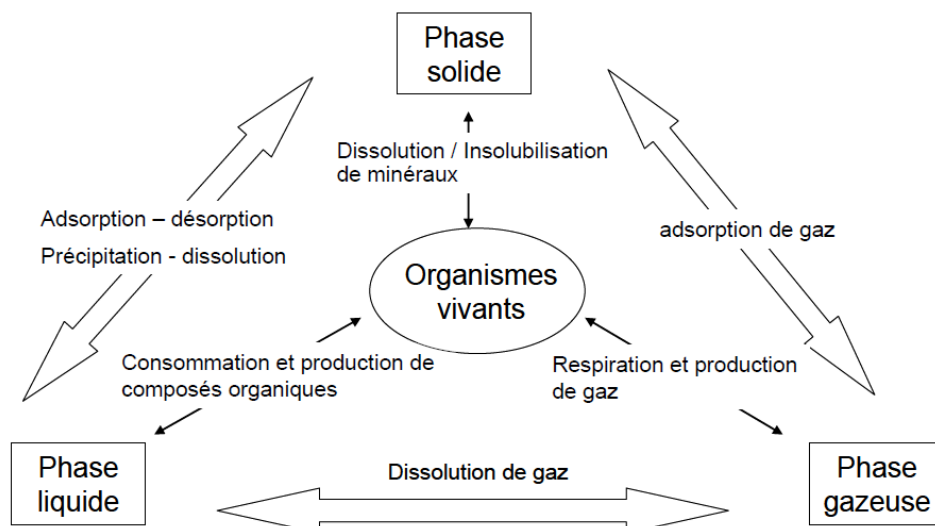


Figure 3. Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants (Darcheville, 2008).

2. 1.1. La phase solide

Cette phase représente la moitié à deux tiers du volume du sol. Elle est constituée à plus de 90% de minéraux inorganiques primaires et secondaires (Sposito, 1989). La matière organique, qui représente de 0,5 à 10 % du sol, est un mélange complexe de constituants en décomposition, solubles ou insolubles, provenant principalement des plantes, animaux et microorganismes. Cette matière organique est importante biologiquement (source d'énergie pour les organismes vivants...), chimiquement (sorption,

complexations, adsorption de cations...) et physiquement (stabilité du sol) (Darcheville, 2008).

2. 1.2. La phase liquide

Elle correspond à l'eau infiltrée qui, par percolation, se charge en gaz dissous (O₂, CO₂), en substances minérales dissoutes et en particules en suspension. Elle véhicule les substances nutritives nécessaires aux organismes vivants (Darcheville, 2008).

2. 1.3. La phase gazeuse

Cette phase appelée aussi atmosphère du sol, occupe les pores du sol non envahis par la phase liquide. Elle contient généralement de 18 à 20 % d'O₂, mais sa teneur peut chuter à 2 % voire 0 % au voisinage des racines, de résidus organiques en décomposition, au cœur d'agrégats ou de mottes saturées en eau, ou en profondeur dans le sol. La teneur en CO₂ peut varier de 0,3 à 5 % et peut atteindre et dépasser les 20 % dans certains cas (voisinage de racines ou source importante de matière organique). L'atmosphère du sol contient aussi N₂, H₂O vapeur et Ar, mais elle comporte également très souvent d'autres gaz produits et/ou consommés biologiquement : NO, N₂O, NH₃, H₂ ou CH₄ (Darcheville, 2008).

2. 1.4. Les organismes vivants du sol

De par sa nature chimique et physique très hétérogène, le sol offre aux organismes qui y habitent des habitats très divers. Ainsi, des plantes à la microflore, des animaux à la microfaune, il est le réservoir d'une vie extrêmement abondante (Figure 4). Les organismes vivants du sol sont en excluant les racines et la méso-faune (Proportion typique de biomasse), ils sont constitués d'actinobactéries (38 %), champignons et algues (28%), protozoaires et nématodes (6 %), vers de terre (22 %) et autres animaux (6 %) (figure 4) (Gobat *et al.*, 1998).

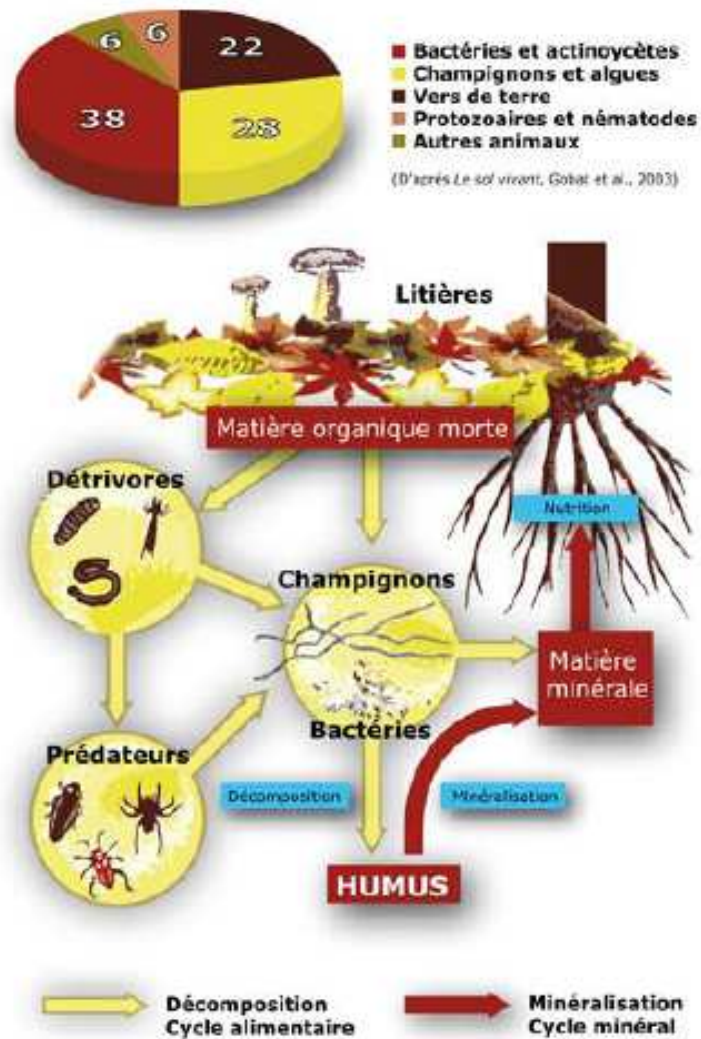


Figure 4. Schéma représentant la diversité biologique et le fonctionnement du sol (Galet, 2014).

2. 2. La texture du sol

La texture du sol est la répartition des particules du sol inférieures à 2 mm par catégorie de taille (ou granulométrie des particules < 2 mm). Habituellement, 3 catégories sont considérées : les argiles (< 2 µm), les limons (2-50 µm) et les sables (50-2000 µm). La répartition est habituellement représentée par un graphique ternaire ou triangle de texture. Au niveau international, la classification la plus utilisée est celle de l'USDA (Figure 5).

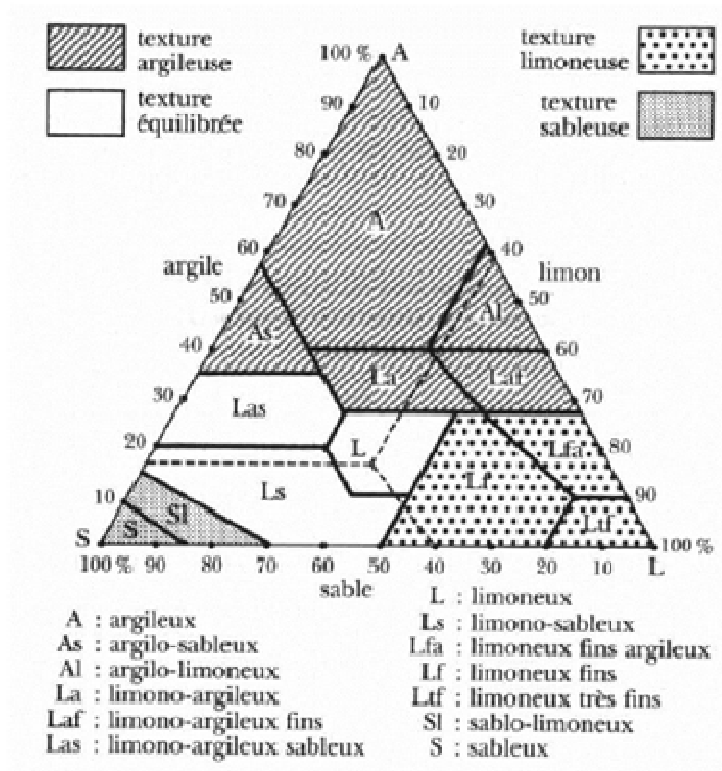


Figure 5. Triangle des textures d'un sol (Lombard, 2015).

2. 3. La structure du sol

La structure du sol fait référence à la taille, la forme et la disposition des constituants solides (minéraux et organiques) et des constituants gazeux (vides), à la continuité des pores, leur capacité à retenir et transférer les fluides et les substances organiques et inorganiques, et à sa capacité à servir de support de la croissance et le développement des racines (Emerson, 1959). Il est donc clair que la structure du sol peut être décrite à plusieurs échelles (particules minérales, agrégats, pédon, parcelle). Son influence sur les processus hydriques, tels que la rétention de l'eau, l'infiltration et le transfert préférentiel, dépend donc de l'échelle considérée (Jury *et al.*, 2011).

2. 4. Principaux types de microorganismes présents dans le sol et leur influence sur le milieu édaphique

La diversité des microorganismes et leur participation à de nombreuses activités biologiques dans le sol sont énormes. Les rôles de ces microorganismes sont mis en évidence dans le cycle des principaux éléments biologiques (C, N, P), dans le recyclage des déchets et la détoxification des polluants environnementaux (Dymond, 2013).

Dès 1916, Waksman s'intéressa à la distribution des bactéries dans le sous-sol. Par l'utilisation de la technique du dénombrement sur milieu gélosé, il réussit à dénombrer sur un profil de sol d'une hauteur de 76 cm, le nombre de bactéries viables (Waksman, 1916). La microflore du sous-sol superficiel, bien que composée en majorité de procaryotes, révèle cependant des organismes eucaryotes tels que les algues, les champignons et les protozoaires (Sinclair et Ghiorse, 1989). Pour Balkwill et Ghiorse (1985), les formes microscopiques d'un profil de sol de 6,5 mètres de profondeur contiennent 85 à 90% d'espèces procaryotiques (Balkwill and Ghiorse, 1985).

2. 4.1. Microorganismes procaryotes

2. 4.1.1. Les bactéries

Les bactéries sont les plus dominantes des microorganismes sur le plan quantitatif et fonctionnel (Morel, 1996). Leur nombre est estimé par la technique AODC et varie entre 10^9 et 10^7 g⁻¹ sol en surface (Beloin *et al.*, 1988). Elles ont une importance considérable dans les cycles biogéochimiques comme par exemple dans ceux du carbone ou de l'azote avec un rôle fondamental dans la fixation de l'azote atmosphérique, fonction qui a beaucoup été étudiée depuis plusieurs dizaines d'années (Vitousek and Howarth, 1991).

La capacité des bactéries hétérotrophes à dégrader une large variété de composés organiques est exploitée pour le traitement des sols pollués dans des stratégies de bioremédiation ou pour le traitement des eaux usées (Furukawa, 2003). Elles sont également utilisées dans les fosses septiques pour en assurer l'épuration. En agriculture, certaines bactéries peuvent être utilisées à la place de pesticides en lutte biologique pour combattre les ravageurs de plantes (Lucy *et al.*, 2004) ex : *Bacillus thuringiensis* (Berliner, 1915) (Bacillales : Bacillales), d'autres bactéries vont avoir un effet bénéfique sur la croissance des plantes comme les PGPR (Figure 6) (Lugtenberg and Kamilova, 2009).

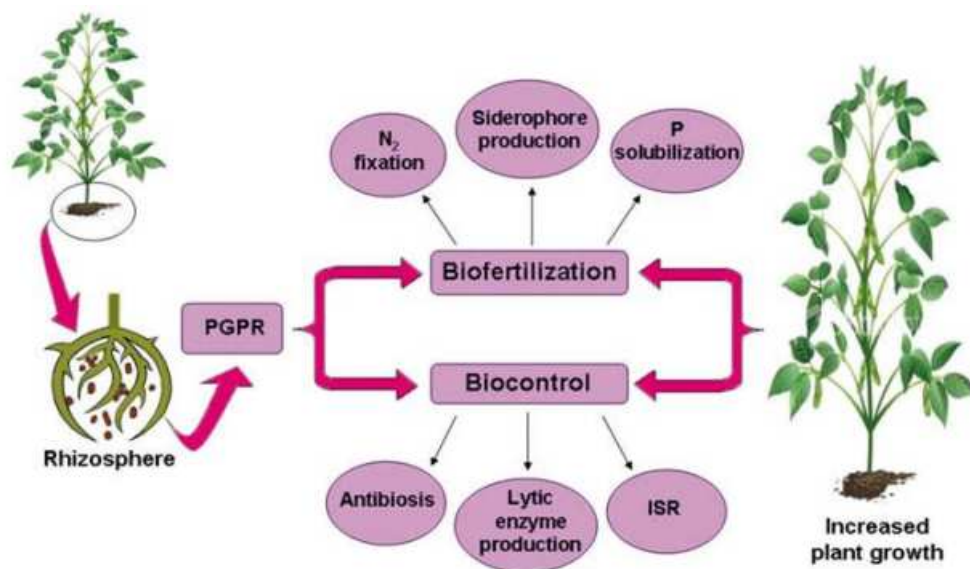


Figure 6. Promotion de la croissance des plantes par les PGPR (Cherif,2014).

Une étude comparative menée par Kolbel-Boelke *et al.* (1988) sur les communautés microbiennes présentes dans les particules de sol et l'eau souterraine, met en évidence une proportion de bactéries Gram+ de 3 à 7 fois supérieure dans les horizons du sol que dans l'eau souterraine. Concernant l'appartenance à une famille bactérienne, ces auteurs ont mis en évidence une majorité d'*Arthrobacter*, de *Pseudomonas* corroborant les observations de Balkwill et Ghiorse (1985).

- **Les Actinobactéries**

Les actinobactéries sont des bactéries à Gram positif avec une teneur élevée en G + C, produisent des filaments fins et ramifiés dont le diamètre est équivalent à celui des bactéries (compris entre 0,5 et 1 micromètre) (Alexander, 1977).

Elles jouent un rôle majeur dans la fixation d'azote et la solubilisation du phosphate. Elles produisent également divers groupes de métabolites secondaires : les antioxydants, enzymes et phytohormones telles que l'acide indole acétique (IAA) et acide gibbérellique (GA) (AbdElgawad *et al.*, 2019). Ces microorganismes sont rares voire absents lorsque la teneur en eau est supérieure à 85% (Alexander, 1977 ; Federle *et al.*, 1990).

2. 4.2. Microorganismes eucaryotes

2. 4.2.1. Les protozoaires

Les protozoaires sont un groupe diversifié de lignées distinctes d'organismes unicellulaires représentant la quasi-totalité des principaux clades d'eucaryotes. Les protozoaires mesurent généralement entre 5 et 1000 μm (Fenchel *et al.*, 1997).

En fonction de leur moyen de locomotion, leur classification s'organise en trois groupes : (1) les flagellés, d'une taille maximale de 20 micromètres de longueur, possèdent 1 à 4 flagelles ; (2) les ciliés, d'une longueur comprise entre 10 et 80 micromètres, ont des cils implantés tout autour de la cellule ; (3) les amibiens qui se déplacent par l'intermédiaire de pseudopodes (Alexander, 1982).

Les protozoaires jouent un rôle crucial dans le traitement des eaux usées puisqu'ils sont prédateurs de bactéries ; ils participent également dans la minéralisation du carbone organique dans le sol (RASTAK *et al.*, 1996).

Par la technique du dénombrement en milieu liquide, Sinclair et Ghiorse (1987) ont déterminé de $1,9 \cdot 10^5$ à $6,4 \cdot 10^6$ protozoaires. g^{-1} sol dans l'horizon de surface d'un sol limono-sableux. En revanche leur nombre décroît jusqu'à 28 à 40 protozoaires. g^{-1} sol dans la zone non saturée à texture limono-argileuse.

Les protozoaires peuvent se développer dans la rhizosphère de nombreuses plantes (Katznelson, 1965), où ils pourraient jouer un rôle indirect en ralentissant la prolifération des bactéries ou en stimulant leur activité, un rôle direct en synthétisant des substances exerçant sur le développement des plantes supérieures (Nikolyuk, 1969).

Les protozoaires prédateurs jouent un rôle dans l'équilibre biologique des sols puisqu'ils consomment de très grandes quantités de cellules bactériennes : un rhizopode utilise environ 40 000 bactéries par division cellulaire (Alexander, 1961).

2. 4.2.2. Les Champignons

Les champignons du sol ou mycètes sont des levures, des champignons supérieurs surtout des moisissures des genres *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Mucor*, *Trichoderma* (Soltner, 2000). Ils sont toujours hétérotrophes et aérobies, résistent mieux à la sécheresse et l'acidité, participent à la dégradation des substances complexes comme la lignine et peuvent aussi contracter au niveau des racines des symbioses

mycorhiziennes, dont les actions peuvent se révéler bénéfiques pour les végétaux (Morel, 1996). Par sa taille et sa structure, un mycélium peut transporter activement des quantités importantes d'eau et de substance d'un endroit à l'autre du sol (Gobat *et al.*, 2010).

Les champignons ont de nombreuses fonctions dans les sols. Ils peuvent être symbiotiques ou pathogènes de végétaux ou d'animaux. Mais l'un de leur plus grand rôle écologique dans le sol, reste celui de la décomposition de la matière organique effectuée notamment par les espèces dites saprophytes (Lucisine, 2015). Certaines levures peuvent participer dans les cycles d'azote et de soufre, ainsi dans la solubilisation du phosphate. Ces levures en tant que facteurs de croissance de plantes et conditionneurs de sol a été étudié dans le but de les utiliser dans le domaine de l'agriculture durable. Les genres *Aureobasidium*, *Coniosporium* et *Exophiala*, sont connus sous le nom de levures noires, ces dernières possèdent la capacité de dégrader les hydrocarbures récalcitrants ainsi que les biomolécules complexes du bois comme la lignine (Botha, 2011).

Les champignons mycorhiziens du sol forment des associations mutualistes hautement différenciées avec les racines des plantes et jouent ainsi un rôle crucial dans la détermination de la diversité des communautés de plantes et de leur succession (Smith and Read, 2010). Les Mycorhizes arbusculaires et les ectomycorhizes constituent les types les plus abondants de symbioses mycorhiziennes. Ces champignons favorisent l'absorption des nutriments et d'eau aux grands arbres à partir du sol, renforce la résistance aux agents pathogènes et à la sécheresse, augmentant ainsi la stabilité de l'écosystème forestier (Gaggini *et al.*, 2019).

2. 4.2.3. Les algues

Les algues sont des microorganismes unicellulaires ou en colonies filamenteuses, souvent abondants dans le sol, leur chlorophylle les rend autotrophes (Soltner, 2000). Grâce à leur activité photosynthétique, les algues colonisent rapidement les surfaces minérales brutes, dont elles accélèrent l'altération par des substances dissolvantes. Elles participent aussi à la cohésion des particules solides à travers la production des polysaccharides extracellulaires (Gobat *et al.*, 2010). Les algues présentes dans le sol jouent un rôle dans sa fertilisation.

Des études réalisées en serre ont montré que l'ajout d'algues (*Arthrospira platensis* (Spiruline), *Chlorella sp*, *Palmaria palmata*, *Laminaria digitata* et *Ascophyllum nodosum*)

dans des terrains agricoles cultivés par le petit pois et le blé, a augmenté les concentrations d'azote inorganique dans le sol, confirmant ainsi leur potentiel de recyclage de l'azote minéralisable dans les sols agricoles (Alobwede *et al.*, 2019).

2. 5. Influence du milieu édaphique sur la microflore d sol

2. 5.1. Influence de la température

La température influe sur l'activité métabolique des microorganismes dans l'environnement. Nous classons les microorganismes en 3 catégories : les *mésophiles* regroupant la plupart des microorganismes qui tolèrent des températures comprises entre 20 et 40°C, les *psychrophiles* qui sont capables de se développer à des températures comprises entre 0 et 5°C et les *thermophiles* dont l'optimum de température se situe entre 55 et 60°C (Dictor, 1994).

2. 5.2. Influence de la pression hydrostatique

La pression hydrostatique augmente avec la profondeur du sol. Les microorganismes de surface tolèrent des pressions d'une centaine d'atmosphères (Dictor, 1994).

2. 5.3. Influence du pH

Le pH a un impact sur la distribution des microorganismes. La majorité des bactéries prédominent dans des sols neutres ou légèrement alcalins, alors que les champignons prédominent plutôt dans des environnements acides (Prescott *et al.*, 2003). Des pH extrêmes ont une influence négative sur l'activité microbienne (Smelt *et al.*, 1978).

Des variations drastiques de pH peuvent également détruire la membrane plasmique ou inhiber l'activité d'enzymes ou de protéines membranaires de transport.

2. 5.4. Influence de la texture du sol

La texture des sédiments, exprimée par le rapport sable sur argile, est corrélée avec les mesures de densité de population microbienne (Beloin *et al.*, 1988).

2. 5.5. Influence du potentiel d'oxydo-réduction

2. 5.5.1. L'atmosphère du sol

Dans le sol de surface, la phase solide occupe environ la moitié du volume total, l'autre moitié comprend les phases liquide et gazeuse. Les proportions respectives de ces deux phases conditionnent l'état d'aération du sol (Alexander, 1977). L'atmosphère du sol se compose essentiellement d'azote, de dioxyde de carbone, d'oxygène et de vapeur d'eau (Dictor, 1994). En général, l'atmosphère d'un sol bien aéré (horizon de surface) contient moins d'oxygène, de 18 à 20%, que l'atmosphère de l'air mais plus de CO₂ de 1 à 3%. Toutefois, une teneur élevée en argile et en eau couplée avec une activité microbienne importante conduisent à une augmentation de la concentration en CO₂ qui peut atteindre 10% (Paul and Clark, 1996).

Certaines études ont montré que le CO₂ était nécessaire pour la croissance de quelques bactéries et champignons, notamment dans les processus de fermentations (Picek *et al.*, 2000), alors que d'autres études ont montré que le CO₂ limitait la croissance des microorganismes et inhibait certaines enzymes (Šantrůčková and Šimek, 1997). Lorsque le sol est bien structuré avec une forte porosité, ces échanges fonctionnent normalement. Dans la zone non saturée du sous-sol, les conditions aérobies sont généralement prédominantes au moins tant que les échanges gazeux avec l'atmosphère sont facilités. De plus, le passage du métabolisme aérobie au métabolisme anaérobie se produit à une concentration en oxygène inférieure à 1 % (Paul and Clark, 1996).

2. 5.6. Influence du carbone organique

La teneur en carbone organique soluble est un faible indicateur de la taille des populations microbiennes et de leurs activités car elle n'est pas représentative de la disponibilité des nutriments (Frederickson and Garland).

2. 5.7. Influence de l'eau

La teneur en eau dans le sol a des effets sur les microorganismes présents. Abondante, elle augmente la disponibilité des substrats et facilite les déplacements des microorganismes ; rare, elle facilite les échanges gazeux avec l'atmosphère. Un assèchement du sol a pour conséquence une mortalité partielle des populations et la

réduction des activités microbiennes, alors que la réhydratation entraîne une reprise rapide de l'activité microbienne (Gobat *et al.*, 1998).

2. 6. Interactions plantes-microflore du sol

La plante est la principale force structurante des communautés microbiennes. On estime qu'environ 20 000 espèces de plantes (sur environ 300 000) seraient entièrement dépendantes d'organismes microbiens pour leur croissance et leur survie (Van Der Heijden *et al.*, 2008). Les microorganismes absorbent les nombreuses formes d'azote présentes dans le sol (NO_3^- , NH_4^+ , acides aminés et peptides), quant aux plantes, elles préfèrent l'azote inorganique car il est facilement assimilable (Harrison *et al.*, 2008).

Ces aspects de compétition pour les nutriments constituent les interactions les plus directes entre les plantes et la microflore du sol. En effet, de fortes relations positives et négatives existent à travers des mécanismes de facilitation, de symbiose et de parasitisme. L'un des mécanismes de facilitation concerne la fixation d'azote atmosphérique (N_2) par les bactéries et les cyanobactéries libres du sol (Paul and Clark, 1996) et fournissent ainsi une quantité d'azote sous forme assimilable (N) aux plantes .

Des associations symbiotiques se développent avec les espèces de bactéries fixatrices d'azote atmosphérique appartenant aux deux genres *Rhizobium* et *Frankia* permettant à certaines plantes (Fabacées) de se pourvoir en cet élément. De même, certaines bactéries de la rhizosphère peuvent stimuler la croissance des plantes via la synthèse d'hormones végétales ou par inhibition de la croissance de pathogènes (Sturz and Christie, 2003).

L'amélioration de l'acquisition des nutriments pour les plantes peut se faire grâce à la mise en place de symbioses avec des champignons mycorhiziens leur permettant un accès à des ressources moins disponibles tel que le Phosphore (Van der Heijden *et al.*, 1998). La présence de ces mycorhizes améliore également la résistance des plantes aux maladies et à la sécheresse grâce à une meilleure prospection du sol pour l'acquisition de l'eau (Wardle *et al.*, 2004). A l'opposé de ces relations positives, les microorganismes pathogènes limitent la productivité végétale (Klironomos and Hart, 2002) et influencent la structure d'une communauté et le fonctionnement de l'écosystème (Bever, 2003).

Les plantes ont des effets clairs sur la structure et les fonctions des communautés microbiennes. Au niveau de la rhizosphère, ces effets sont principalement dus aux exsudats

racinaires (Griffiths *et al.*, 1998). Au niveau du sol non rhizosphérique, ils sont liés aux dépôts de litière aérienne et racinaire qui seront dégradés par les communautés microbiennes (Wardle, 1992). Ces dépôts sont l'un des facteurs majeurs du cycle des nutriments puisque les bactéries libres du sol vont produire, par transformation de cette matière organique, différentes sources de nutriments disponibles pour les communautés végétales et microbiennes (Wardle, 1992).

2. 7. Interactions faune- microflore du sol

2. 7.1. Interaction des nématodes et de la microflore

Certains nématodes peuvent prédateur plusieurs espèces de la faune du sol (protozoaires, autres nématodes, tardigrades). Selon Mankau et Mankau (1963), les nématodes peuvent se nourrir d'algues et d'actinomycètes. Certains sont qualifiés de mycophages, qui se nourrissent en enfonçant leurs stylets dans les hyphes de champignons. D'autre part, la mobilité des nématodes leur permet d'intervenir dans la dissémination des champignons et des bactéries (Domergues and Mangenot, 1970). La microflore du sol exerce sur les nématodes des effets attractifs ou répulsifs qui ont été étudiés par Katzelson et Henderson (1962, 1964). Certaines myxobactéries isolées du sol tuent les représentants de trois espèces de nématodes consommateurs de bactéries et secrètent un complexe enzymatique dont une fraction lyse les cadavres de ces vers (Domergues and Mangenot, 1970).

2. 7.2. Interactions mésofaune-microflore du sol

La microflore représente l'aliment essentiel de la mésofaune. Elle joue donc un rôle régulateur. A titre d'exemple, les collemboles détruisent les mycéliums des champignons, mais en même temps véhiculent leurs spores qui traversent sans dommage le tube digestif de l'animal (Nosek et Ambroz, 1964). Selon Farahat (1996), certaines espèces se nourrissent essentiellement de spores.

2. 7.3. Interactions vers de terre (lombriciens) - microflore du sol

Les vers de terre (**lombriciens**) sont capables de produire un ensemble de métabolites et autres substances actives, qui vont être bénéfiques à l'activité des microorganismes, lors de leur passage dans le tube digestif du vers de terre (Lavelle *et al.*, 1995 ; Brown *et al.*, 2000 ; Edwards, 2004).

Au cours de ce processus, du mucus intestinal chargé en eau et en carbone soluble est produit par le ver de terre et va permettre le réveil de certaines bactéries. Ainsi, pendant et après le passage dans le tube digestif des vers de terre, les bactéries seront fortement actives (Bernard *et al.*, 2012). La forte activité des bactéries va permettre la décomposition des formes stables de matière organique du sol pour lesquelles les vers de terre ne possèdent pas d'enzymes adéquates (Lavelle *et al.*, 1995 ; Brown *et al.*, 2000). Pendant ce processus, la population d'autres organismes (protozoaires, nématodes, champignons) va diminuer.

2. 7.4. Interactions fourmis-microflore du sol

La présence des bactéries est rare dans l'intestin moyen des insectes en raison des enzymes présentes dans cette région qui pourraient empêcher leur survie. Dans l'intestin moyen de *Odontomachus bauri*, des bactéries appelées «endocymbiotiques» ont été observées à l'intérieur des cellules épithéliales. Ces bactéries permettent de nouvelles possibilités pour exploiter les aliments présents dans l'environnement (Caetano *et al.*, 2010).

Les termites de la sous-famille des Macrotermitinae ont une relation symbiotique avec un champignon basidiomycète du genre *Termitomyces* (Rouland-Lefèvre., 2000 ; Rouland-Lefèvre et Bignell, 2001 ; Rouland-Lefèvre *et al.*, 2002 ; 2006). Contrairement aux associations existant chez la plupart des autres termites qui sont plutôt des endosymbioses avec des archées, amibes, levures, spirochètes, actinomycètes ou flagellées, les termites Macrotermitinae ont quant à eux, une exosymbiose avec un champignon qu'ils cultivent sur une structure spéciale construite à l'intérieur de leur nid et appelée meule à champignons (Guedegbe, 2008). Les aliments carbonés des termites paraissent être essentiellement la cellulose et les hémicelluloses, bien qu'ils puissent aussi utiliser l'amidon. La digestion des polysides pariétaux est rendue possible grâce à des micro-organismes associés, vivant dans le tube digestif de l'insecte (Domergues and Mangenot, 1970).

2. 8. Interactions entre les constituants de la microflore du sol

2. 8.1. Interactions champignons-bactéries

La diversité des bactéries et des champignons dans les sols est très élevée, un seul gramme de sol peut contenir plusieurs milliers d'espèces fongiques et bactériennes (Schulz

and Boyle, 2006). Les Protéobactéries représentent le phylum le plus abondant dans la plupart des sols (Mendes *et al.*, 2013).

Les Acidobacteria, Actinobacteria, Firmicutes et Bacteroidetes sont également souvent détectés en quantité importante (Roesch *et al.*, 2007 ; Uroz *et al.*, 2010 ; Weinert *et al.*, 2011). Les embranchements appartenant au règne des champignons plus retrouvés dans les sols sont généralement les Ascomycetes et les Basidiomycetes (Buée *et al.*, 2009 ; Kerfahi *et al.*, 2014 ; Tedersoo *et al.*, 2014). En raison de leur diversité, et puisque qu'ils vont souvent partager leur habitat et utiliser les mêmes ressources, les bactéries et les champignons des sols vont interagir en permanence via une multitude de types d'interactions, bénéfiques ou néfastes (Kobayashi et Crouch 2009 ; Frey-Klett *et al.*, 2011 ; Scherlach *et al.*, 2013).

2. 8.1. Les interactions bénéfiques

2. 8.1.1. Mutualisme

Le mutualisme est une interaction à bénéfice réciproque (Figure7). C'est par exemple, le cas de l'interaction entre le champignon *Aspergillus niger* et la bactérie *Salmonella typhimurium* (Balbontín *et al.*, 2014). Lors de cette interaction, la croissance de *S. typhimurium* est augmentée, probablement via l'utilisation de métabolites fongiques, en retour, la colonisation bactérienne des hyphes de *A. niger* confère au champignon une résistance contre un composé toxique (cycloheximide).

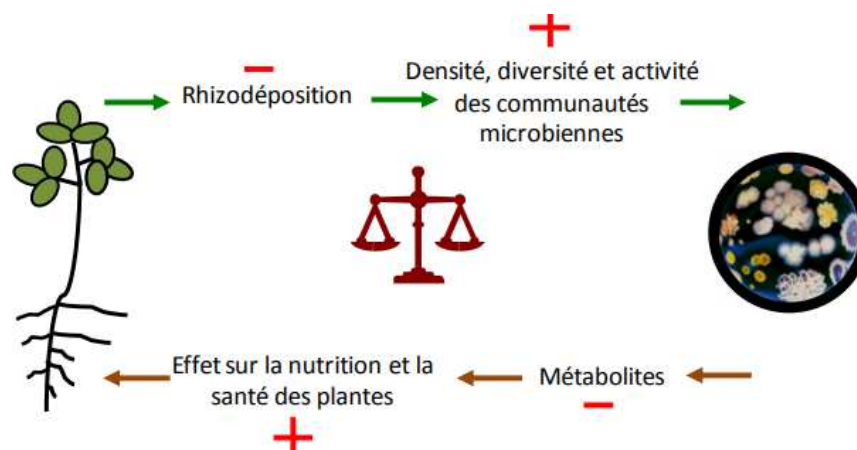


Figure 7. Vision coûts-bénéfices de l'interaction plantes-microorganismes mutualistes. Les coûts pour la plante et les microorganismes sont compris dans les processus respectifs de rhizodéposition et de production de métabolites. Ces coûts sont compensés par les bénéfices que chacun reçoit de l'autre partenaire, une influence positive de la plante sur la densité, la diversité et l'activité des communautés microbiennes et une influence positive des microorganismes sur la nutrition et la santé des plantes (Lepinay, 2013).

2. 8.1.2. Transport

Dans les sols certains champignons filamenteux participent au transport de certaines bactéries. En effet, de part leur forme filamenteuse, les champignons sont particulièrement bien adaptés aux écosystèmes du sol car ils peuvent ainsi parcourir de longues distances pour atteindre les éléments nutritifs, répartis de façon hétérogène dans les sols. Les bactéries en revanche sont limitées dans leur déplacement en raison de la présence de poches d'air entre les particules du sol. Les bactéries vont donc pouvoir se déplacer le long des hyphes pour atteindre les zones d'intérêt trophique (Wick *et al.*, 2007 ; Pion *et al.*, 2013).

2. 8.2. Les interactions délétères

- **Compétition** : Cette interaction se produit lorsque des organismes exploitent une ressource commune, en quantité limitée. Elle est fréquente entre les champignons et les bactéries du sols qui sont en compétition notamment pour le carbone, l'azote et le fer (Frey-Klett *et al.*, 2011).
- **Prédation** : Concernant les organismes du sol, plusieurs cas de bactéries mycophages, qui produisent les enzymes nécessaires à la dégradation des parois fongiques, ont été observés (Chernin *et al.*, 1995 ; De Boer *et al.*, 2001). A l'inverse, certains champignons sont capables de lyser et consommer des bactéries (Barron, 1988) et il a même été suggéré que ces derniers constituent une source d'azote importante pour certains champignons saprotrophes (Barron, 2003).

2. 9. Interaction entre les bactéries du sol

Les différentes espèces bactériennes peuvent être en interaction entre elles afin de subvenir à leurs besoins nutritionnels. A titre d'exemple, *Proteus vulgaris* a besoin de biotine mais synthétise de l'acide nicotinique ; *Bacillus polymyxa* a besoin d'acide nicotinique, mais synthétise de la biotine (Yeoh *et al.*, 1968). En présence l'une de l'autre, ces deux bactéries peuvent se multiplier puisque chacune fournit à l'autre la vitamine dont elle a besoin. Les interactions entre bactéries de biofilms (Figure 8) ont été essentiellement étudiées au travers des communications entre cellules au sein de biofilms mono-espèces ou bi-espèces, par le biais du « quorum sensing » (QS) (Figure 9) (Costerton *et al.*, 2003 ; Antonova et Hammer, 2011 ; Nagar *et al.*, 2015). En effet, des molécules de

communication intra et interspécifique sont connues pour jouer un rôle dans la régulation des processus d'adhésion et de formation des biofilms (Hammer and Bassler, 2003 ; Waters and Bassler, 2005 ; Dobretsov *et al.*, 2009).

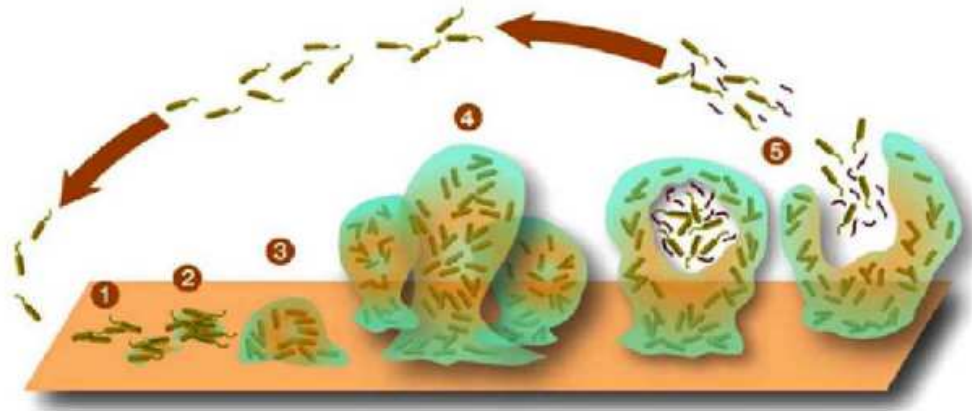


Figure 8. Les différentes étapes de la formation d'un biofilm bactérien (Aye, 2015). (1) Attachement initial des cellules à la surface (2) Attachement irréversible des cellules et production d'EPS (3) Développement précoce de l'architecture du biofilm. (4) Maturation du biofilm (5) Dispersion des cellules du biofilm (Aye, 2015).

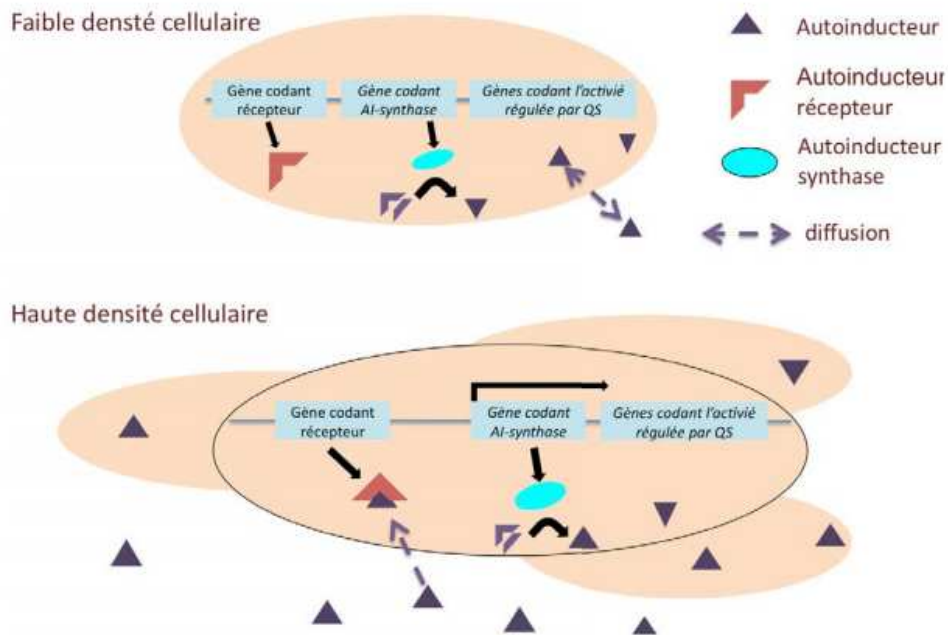


Figure 9. Fonctionnement du quorum sensing bactérien (Doberva, 2016).

Ce système de communication cellulaire, découvert à l'origine sur des bactéries marines, dépend de la densité cellulaire. Les bactéries produisent des signaux qui s'accumulent dans le milieu extracellulaire jusqu'à atteindre un seuil de détection. La détection de ces signaux conduit à des changements dans l'expression des gènes (Waters

and Bassler, 2005). L'augmentation du nombre de cellules d'une espèce donnée peut donc induire une modification métabolique ou physiologique de cette population, telle que la motilité (déplacement des cellules vers une zone plus propice à leur développement), la virulence (production de toxines par exemple), ou encore la sporulation (processus de survie dans l'attente de conditions plus propices). Il a été montré notamment que ce système de communication aide à modifier le comportement des cellules planctoniques lors de leur passage à la vie sédentaire (Sauer *et al.*, 2002).

2. 10. Interaction protozoaires- bactéries

De nombreuses bactéries pathogènes vivent en association étroite avec les protozoaires. Ces micro-organismes eucaryotes unicellulaires sont omniprésents dans divers environnements. Un certain nombre de protozoaires, tels que les amibes et les ciliés, ingèrent des bactéries pathogènes, les encapsulent généralement dans des structures membranaires, puis les libèrent dans l'environnement. Les bactéries conditionnées résistent mieux à divers stress et sont plus aptes à survivre que les bactéries libres (Denoncourt *et al.*, 2014).

2. 11. Interactions microalgues – bactéries

Les études sur les interactions microalgues-bactéries ont révélé un impact significatif des relations mutualistes ou parasitaires sur la croissance des algues. La croissance des algues, par exemple, s'est révélée être stimulée par des facteurs de croissance produits par des bactéries, telles que l'acide indole-3-acétique. La vitamine B₁₂ produite par des bactéries dans des cultures d'algues et des sidérophores bactériens est également connue pour être impliquée dans la promotion d'une croissance plus rapide des microalgues (Fuentes *et al.*, 2016).

3. 1. Historique de la lutte chimique

Les premières descriptions de ces dispositifs remontent à 1000 ans. L'arsenic et la nicotine sont connus dès le XVI^{ème} siècle en Chine (Institut Pasteur, 1999). Les propriétés insecticides du tabac sont utilisées en 1763 par des arboriculteurs de Montreuil afin d'éliminer les pucerons qui ont envahis leurs pêchers (Fournier, 1988). Le chlorure mercurique est proposé au XVIII^{ème} siècle pour protéger les bois (Pflieger, 2009).

La lutte chimique s'est réellement développée à partir du XIX^{ème} siècle avec des produits d'origine naturelle comme la roténone. Extraite des racines de *Derris* (une légumineuse), elle a pour effet de paralyser le système nerveux des insectes et des animaux à sang froid (Fournier, 1988). A la même époque, l'utilisation plus généralisée des pesticides a également suivi les progrès de la chimie minérale. Les traitements fongiques à base de sulfate de cuivre se répandent, notamment pour protéger la vigne du Mildiou. Les sels de mercures sont utilisés au début du XX^{ème} siècle pour le traitement des semences. Autour des années 1920, on s'aperçoit que les fruits et les légumes traités avec des produits arsenicaux enferment des doses d'insecticides pouvant être mortelles pour les consommateurs (Fournier, 1988).

Le début de l'ère des pesticides organiques se situe autour des années 1930, Parallèlement au développement de la chimie organique de synthèse. En 1874, Zeidler synthétise le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), dont Müller, en 1939, établit les propriétés insecticides (Fournier, 1988). Le DDT, commercialisé dès 1943, ouvre la voie à la famille des organochlorés et domine le marché des insecticides jusqu'au début des années 1970 (Pflieger, 2009).

En 1944, l'herbicide 2,4-D, copié d'une hormone de croissance de plante et encore fréquemment employé de nos jours, est synthétisé. Depuis, la chimie n'a cessé de proposer de nouvelles molécules. En 1950-55, apparaissent aux Etats-Unis, les herbicides de la famille des urées substituées (linuron, diuron), suivi peu après par les triazines. Les fongicides de type imidazoliques et triazoliques, datant des années 70, représentent actuellement le plus gros marché des fongicides. Les insecticides pyréthrinoïdes, mis au point dans les années 1970-80, dominant, pour leur part, le marché des insecticides (Pflieger, 2009).

L'historique de l'évolution des trois plus grandes familles des produits phytosanitaires dès les années 1900 jusqu'aux 2000 est présenté par le tableau ci-dessous.

Tableau 5. Historique de l'évolution des trois plus grandes familles de produits phytosanitaires dès les années 1900 jusqu'aux années 2000 (Batsch, 2011).

Evolution des produits			
	HERBICIDES	FONGICIDES	INSECTICIDES
Avant 1900	Sulfate de cuivre Sulfate de fer	Soufre Sels de cuivre	Nicotine
1900 - 1920	Acide sulfurique		Sels d'arsenic
1920 - 1940	Colorants nitrés		
1940 - 1950	Phytohormones		Organo-chlorés Organo-phosphorés
1950 -1960	Triazines, Urées substituées Carbamates	Dithiocarbamates Phtalimides	Carbamates
1960-1970	Dipyridyles, Toluidines...	Benzimidazoles	
1970 - 1980	Amino-phosphonates Propionates...	Triazoles Dicarboximides Amides, Phosphites Morholines	Pyréthroïdes Benzoyl-urées (régulateurs de croissance)
1980 - 1990	Sulfonyl urées...		
1990 - 2000		Phénylpyrroles Strobilurines	

3. 2. Les produits phytosanitaires

Les pesticides, réglementairement dénommés «produits phytosanitaires», désignent des substances permettant de lutter principalement contre les insectes (insecticides), les maladies fongiques (fongicides) et les « mauvaises herbes » (herbicides). Ils sont largement utilisés pour protéger les cultures, une protection souvent nécessaire et parfois obligatoire (Gatignol and Etienne, 2010).

3. 3. Classification des produits phytosanitaires

En général les substances actives sont classées, soit en fonction de la nature de l'espèce à combattre (premier système de classification), ou bien de la nature chimique de la principale substance active (deuxième système de classification) (Barriuso *et al.*, 2005).

3.3.1. Premier système de classification

Il existe de nombreuses façons de classer les pesticides (Eldridge, 2008). Selon Baldi *et al.* (2013), la plus simple et la plus globale d'entre elle consiste à les distinguer en fonction de leurs cible en grandes catégories :

- **Les fongicides** : destinés à traiter les maladies fongiques des plantes ;
- **Les insecticides** : destinés à la lutte contre les insectes, ils interviennent en les tuant ou en empêchant leur reproduction ;
- **Les herbicides** : destinés à lutter contre certains végétaux (appelés mauvaises herbes ou adventices) entrant en concurrence avec les plantes cultivées.

3.3.2. Deuxième système de classification

Le classement se fait en fonction de la nature chimique de la substance active. Parmi les plus importants on distingue :

- a. Les pesticides organiques ;
- b. Les organochlorés ;
- c. Les organophosphorés ;
- d. Les carbamates ;
- e. Les triazines ;
- f. Les urées substituées ;
- g. Les pyréthrénoïdes.

Néanmoins les grands groupes de pesticides couramment utilisés et les principales familles chimiques au sein de ces groupes sont présentés par le tableau 6.

3.3.4. Les pesticides inorganiques

En général ce sont des éléments chimiques qui ne se dégradent pas. Leur utilisation entraîne souvent de graves effets toxicologiques sur l'environnement par accumulation dans les sols. On cite le plomb, l'arsenic et le mercure qui se caractérisent par une forte toxicité (Boland *et al.*, 2004).

Tableau 6. Principaux groupes de pesticides classés selon leurs cibles (Baldi *et al.*, 2013).

Groupes de pesticides selon cible	Famille chimique	Exemples de molécules
Insecticides	Organochlorés	DDT, Chlordane, Lindane, Heptachlore, Endosulfan...
	Organophosphorés	Malathion, Parathion, Chlorpyrifos, Diazinon, Dichlorvos...
	Pyréthriinoïdes	Perméthrine, Alléthrine, Cyhalothrine...
	Néonicotinoïdes	Acétamipride, Imidaclopride, Thiaclopride, Thiaméthoxame...
	Phénylpyrazoles	Fipronil, Pyriprole
	Carbamates	Aldicarbe, Carbaryl, Carbofuran, Méthomyl...
Herbicides	Carbamates	Asulame, Diallate, Terbucarbe, Triallate
	Triazines	Atrazine, Simazine, Cyanazine...
	Phénoxyherbicides	MCPA, 2,4-D, 2,4,5-T
	Chloroacétamides	Alachlore, Métolachlore...
	Pyridines, bipyridiliums	Paraquat, Diquat...
	Aminophosphonates	Glyphosate, Glufosinate...
	Urées Substituées	Diuron, Ethidimuron, Isoproturon, Thiazafluron, Tebuthiuron, ...
Fongicides	Dithiocarbamates	Mancozèbe, Manèbe, Thirame, Métiram-zinc...
	Dérivés du benzène	Chlorothalonil
	Anilinopyrimidines	Cyprodinil
	Phtalimides	Folpel, Captane, Captafol...
	Inorganiques	Sulfate de cuivre, Chlorates, Soufre, Composés de l'arsenic, du mercure...

3.3.5. Les biopesticides

Les biopesticides, « organismes vivants ou produits issus de ces organismes ayant la particularité de supprimer ou limiter les ennemis des cultures » sont utilisés depuis des siècles par les fermiers et les paysans. De nos jours, ils sont classés en trois grandes catégories selon leur origine (microbienne, végétale ou animale) et présentent de nombreux avantages. Ils peuvent être aussi bien utilisés en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique, certains permettent aux plantes de résister à des stress abiotiques et d'une manière générale, ils sont moins toxiques que leurs homologues chimiques (Deravel *et al.*, 2014).

Les biopesticides sont de plus en plus utilisés pour remplacer les pesticides de synthèse dans la lutte contre les ravageurs et parasites de cultures (Pino-Otín *et al.*, 2019).

3.4. Législations régissant les pesticides

3.4.1. L'union Européenne

La législation Européenne sur les pesticides a été réformée en profondeur à travers le « paquet pesticides ». Ce paquet législatif contient le règlement (CE) n°1107/2009, relatif à la mise sur le marché et l'évaluation des produits phytosanitaires; *la directive 2009/128/CE* instaurant un cadre communautaire d'action pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable ; *la directive 2009/127/CE* concernant les machines destinées à l'application des pesticides et *le règlement (CE) n°1185/2009* relatif aux statistiques (Arbach, 2012).

L'Union Européenne exige que les aliments vendus sur le marché ne doivent pas contenir des doses de résidus de pesticides qui dépassent les LMR (limites maximales de résidus), listé dans la réglementation (EC) 396/2005 et déterminées par l'EFSA. Toutes les LMRs Européennes peuvent facilement être recherchées dans la base de données des LMRs (Arbach, 2012).

3.4.2. L'Algérie

Le contrôle des produits phytosanitaires s'est établi peu à peu en fonction de la politique de développement prônée par le pays et par la disponibilité des moyens. En Algérie, ce contrôle a connu une évolution dans le temps. La promulgation de la loi n° 87-17 du 01.08.1987 relative à la protection phytosanitaire a permis d'édicter les mesures relatives à la fabrication, l'étiquetage, l'entreposage, la distribution, la commercialisation et l'utilisation des produits phytosanitaires à usage agricole (JORA, 1987).

Au terme de la loi, aucun produit phytosanitaire ne peut être commercialisé, importé ou fabriqué s'il n'a pas fait l'objet d'une homologation. L'homologation des produits phytosanitaires a été instituée en Algérie par les décrets exécutifs suivant qui fixent les mesures applicables lors de l'importation et l'exportation des produits phytosanitaires à usage agricole

- Décret n° 95-405 du 02 décembre 1995 (JORA, 1987) ;
- Décret n° 10-69 du 31 janvier 2010 (JORA, 1987).

3.5. Effet des pesticides sur l'environnement

3.5.1. Effets sur la santé

Selon de nombreuses études examinant le risque de cancer lié à une intoxication par des pesticides, il existe des liens étroits avec les cancers du cerveau, de la prostate, des poumons, du foie, du pancréas, de la peau, du sein, des reins, de la leucémie et du lymphome (Joseph, 2018).

Les enfants exposés aux pesticides courent un plus grand risque de développer un cancer du sang, tandis que l'exposition des mères pendant la grossesse augmente le risque de cancer du cerveau, de leucémie et de tumeur de Wilms chez leurs enfants. La mort du fœtus, une altération de la croissance du fœtus et des incapacités congénitales sont également liés à l'exposition des femmes enceintes. Certains pesticides, tels que le 2,4-D et le dibromochlorophane, sont associés à une altération de la fonction hormonale et à une faible numération des spermatozoïdes, entraînant une réduction de la fertilité chez les hommes. En outre, l'intoxication par les pesticides a été associée à des problèmes respiratoires à long terme (Joseph, 2018).

3.5.2. Ecotoxicité des pesticides

Les pesticides peuvent avoir des effets directs sur les écosystèmes des zones d'application. Ainsi, la fertilité des sols peut être ébranlée à travers la diminution voir la disparition de certaines populations comme celles des lombrics (CPP, 2002). Par ailleurs, les insecticides sont particulièrement nocifs pour les antagonistes des ravageurs cibles. Or, les arthropodes comme les coccinelles permettent souvent de limiter le recours aux insecticides et il a été clairement montré que les pyréthroïdes affectent ces insectes (Grafton-Cardwell and Gu, 2003).

Le cas des populations d'oiseaux illustre la possibilité d'impacts indirects des pesticides, notamment via la raréfaction de la ressource alimentaire (Aubertot *et al.*, 2005). Les impacts négatifs peuvent se répercuter tout au long d'une chaîne alimentaire. Ainsi, les propriétés phytotoxiques des pesticides peuvent entraîner la destruction du phytoplancton et briser la chaîne trophique, cette microflore étant essentielle au maintien de la fertilité du milieu (Downing *et al.* 2008). Toutefois, il est parfois délicat d'associer la présence de pesticides dans les milieux aquatiques avec des effets car d'autres facteurs peuvent aussi intervenir dans le déclin de certaines populations comme la modification des

caractéristiques physiques des habitats (Aubertot *et al.*, 2005). Certains pesticides, particulièrement résistants comme les Polluants Organiques Persistants (POPs), se concentrent dans les régions froides du monde après avoir subi un transport atmosphérique.

3.6. La lutte chimique contre les principaux bioagresseurs de la pomme de terre

3.6.1. Le mildiou

La lutte chimique est éventuellement curative avec l'utilisation de fongicides de contact, pénétrants ou systémiques, reste actuellement la principale mesure de lutte contre le mildiou de la pomme de terre (Gaucher *et al.*, 1998). L'utilisation massive de fongicides systémiques a conduit à sélectionner des isolats résistants à ces matières actives, qui appartiennent principalement au groupe des phénylamides, Métalaxyl et son énantiomère Méfénoxam (Rrekad, 2018).

3.6.2. La fusariose

Une fois la culture installée, le recours à la lutte chimique est toujours possible mais avec une efficacité limitée. Toutefois, appliqué à la bonne dose et au bon stade, un traitement à l'aide d'un produit spécifique est un levier supplémentaire pour lutter contre la fusariose (Rakotonindraina, 2012). La diversité des agents pathogènes ainsi que les différences d'efficacité des matières actives d'une espèce à l'autre complexifient cette lutte. En effet, les travaux de Simpson *et al.* (2001) soulignent la sensibilité des champignons du genre *Fusarium* aux triazoles et ceux du genre *Microdochium* aux strobilurines.

3.6.3. La teigne de la pomme de terre

Les insecticides les plus utilisés contre la teigne de la pomme de terre (*Phthorimaea operculella*) sont à base des pyréthroides, acéphate, chlorpyrifos et profénofos, avec des caractéristiques toxicologiques allant de modérément à extrêmement toxique. Leur utilisation dans le long terme peut aussi conduire à la sélection de populations d'insectes résistants (phénomène souvent appelé : développement de résistances) impliquant l'utilisation de doses de plus en plus élevées (Arevalo et Castro, 2003).

3.6.4. Les pucerons

Les pucerons sont des insectes piqueurs-suceurs qui peuvent causer des dommages directs par spoliation de sève ou bien en indirects par la transmission de maladies virales. Les agriculteurs utilisent des insecticides et diverses méthodes de lutte culturale avec plus ou moins de succès (Jones, 2001 ; Dedryver *et al.*, 2010 ; Lai *et al.*, 2017 ; Schröder *et al.*, 2017).

L'activité résiduelle de nombreux insecticides actuellement utilisés contre les pucerons est insuffisante pour assurer une protection à long terme contre la transmission du virus. Par exemple, les insecticides de contact (lambda-cyhalothrine et flonicamide) et systémiques (pymétozine, diméthoate, acétamipride et imidaclopride) n'ont été efficaces que pendant un temps relativement court. Le recours excessif aux insecticides chimiques pour lutter contre les pucerons peut entraîner une résistance. Des études récentes sur *M. persicae* ont mis en évidence la résistance de ce dernier associée à plusieurs insecticides couramment utilisés (Nauen et Denholm 2005 ; Edwards *et al.*, 2008 ; Puinean *et al.*, 2010 ; Silva *et al.*, 2012 ; Bass *et al.*, 2014).

3. 7. Impact de la lutte chimique sur la microflore du sol

Les pesticides sont largement utilisés en agriculture dans les stratégies de lutte contre les parasites. Ils peuvent nuire à la prolifération de microorganismes bénéfiques du sol et à leur transformation biologique. Des études récentes montrent que certains pesticides perturbent les interactions moléculaires entre les plantes et les rhizobactéries fixatrices d'azote et inhibent par conséquent la fixation biologique de l'azote (Hussain *et al.*, 2009).

Certains groupes microbiens sont capables d'utiliser un pesticide appliqué comme source d'énergie et de nutriments pour se multiplier, alors que le pesticide peut être toxique pour d'autres organismes (Johnsen *et al.*, 2001). Des études récentes ont montré que les fongicides à base de strobilurine inhibent la croissance des microbes ainsi que leurs l'activité enzymatique dans le sol (Zhang *et al.*, 2019). Selon les études de Wang (2019), le métalaxyl entraîne une diminution spectaculaire de la population microbienne dans le sol.

3. 8. La lutte chimique dans le monde

Dans le monde, 40% des pesticides utilisés sont des herbicides, 17% des insecticides et 10% des fongicides. Le premier consommateur de produits phytosanitaires est la Chine, où 3.981.548.455 livres sont appliquées chaque année. La Chine a été l'un des premiers pays à commencer à utiliser les produits phytosanitaires, à copier les pratiques américaines, et compte sur son application pour les cultures de riz en particulier (Pariona, 2017).

Les États-Unis sont le deuxième plus gros consommateur de produits phytosanitaires, appliquant 850.984.332 livres par an. Les produits phytosanitaires sont si courants dans ce pays que même les ménages les appliquent sur les pelouses et les municipalités les utilisent pour les parcs. Les résidus de pesticides présents dans les aliments entraînent entre 4000 et 20.000 nouveaux cas de cancer chaque année. La contamination entraîne entre 6 et 14 millions de poissons et 67 millions d'oiseaux. D'autres animaux, notamment les amphibiens, ont souffert de malformations congénitales dues à des lésions nerveuses, ce qui a également entraîné un déclin de la population (Pariona, 2017).

Le Japon, figure parmi les principaux pays consommateurs de pesticides mais son territoire est l'un des plus petits, ce qui signifie que ses niveaux de contamination sont nettement plus concentrés. Partout où les pesticides sont utilisés, cependant, ils peuvent avoir les mêmes effets néfastes (Pariona, 2017).

Le tableau ci-dessous répertorie les listes des autres principaux pays consommateurs de pesticides.

Tableau 7. Principaux pays consommateurs de pesticides dans les années 2000 (Pariona, 2017).

Rank	Country	Annual Pesticide Consumption (millions of kilograms)
1	China	1,806
2	United States	386
3	Argentina	265
4	Thailand	87
5	Brazil	76
6	Italy	63
7	France	62
8	Canada	54
9	Japan	52
10	India	40

3. 8.1. La lutte chimique en Algérie

L'Algérie importe en moyenne 8827 tonnes de pesticides pour un cout estimé à près de 4 milliards et demi de dinars par an. Depuis quelques années, on observe dans notre pays, que l'usage des pesticides, des fertilisants, des engrais, et autres se répand de plus en plus avec le développement de l'agriculture, mais aussi dans le cadre des actions de lutte contre les vecteurs nuisibles (Bouziani, 2007).

Matériel
et
méthodes

1. Objectifs

L'objectif de notre étude consiste à déterminer l'impact des produits phytosanitaires sur la microflore du sol cultivé par la pomme de terre. La culture de la pomme de terre a été réalisée à la ferme expérimentale du département d'Agronomie de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Les analyses physico-chimiques des différents sols ont été réalisées au niveau du laboratoire de pédologie et celles microbiologiques dans le laboratoire de microbiologie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

2. Présentation du site d'étude

Le site est enclavé au Nord par la daïra de Mostaganem, au Sud par la daïra de Hassi Mameche, à l'Ouest par la commune de Mazagran et à l'Est par Douar Djedid (Figures 10 et 11). Cette ferme expérimentale s'étend sur une superficie globale de 76,14 ha avec une superficie agricole utile de l'ordre de 66,99 ha (DSA, 2015).



Figure 10. Site d'expérimentation de Mazagran (Google Earth, 2019).

2. 1. Climat

La région se caractérise par un climat semi-aride avec une hygrométrie comprise entre 60 à 70% pendant la période estivale. Les températures moyennes oscillent entre 25 et 30°C en été et de 6 à 13°C pendant l'hiver (DSA, 2015).



Figure 11. Plan de la ferme expérimentale de Mazagan (Haffari et Merzoug, 2017).

2. 2. Sols

Les sols de la station sont caractérisés par une texture sableuse. Ils sont considérés comme faisant partie des sols peu évolués à croûte calcaire, présentant un profil de type AC dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 40 cm. C'est le sol le plus répandu dans le plateau de Mostaganem. L'horizon est une dalle calcaire. L'analyse des caractères physico-chimiques montre au niveau de l'horizon de la surface des fractions granulométriques dominées par les sables donnant une texture sableuse, un pH alcalin de l'ordre de 8.3 et un faible taux en matière organique (0.69%). Les caractères hydriques exprimés par l'humidité relative et la capacité de rétention de l'eau sont également faibles. Ils sont dus en partie à la sécheresse et à la texture sableuse des sols (Reguieg, 2007).

2.3. L'irrigation

Dans les micro-parcelles, le système d'irrigation est de type goutte à goutte. L'irrigation est effectuée 3 fois par semaine pendant tout le cycle de la pomme de terre, daté du 21 février jusqu'au 09 mai de l'année 2019.

3. Matériel et produits utilisés

3. 1. Matériel végétal

La pomme de terre cultivée, de la variété Sylvana, est produite par le croisement des deux variétés Fabula et Xantia. Le tubercule est de forme ovale et de couleur jaune. Cette variété est caractérisée par une période de dormance longue, une bonne aptitude à la conservation, une levée assez lente, une bonne tolérance à la sécheresse et une teneur en amidon qui varie également de 13,4 à 19%. Elle présente également une sensibilité aux maladies telles que le mildiou du feuillage, le mildiou du tubercule ainsi que le virus Y.

3. 2. Produits utilisés

Quatre produits phytosanitaires ont été appliqués sur la culture de pomme de terre. Leurs caractéristiques sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8. Caractéristiques des produits phytosanitaires utilisés.

Nom commercial	Composition	Formulation	Matière active	Mode d'action	Références
Medamec (acaricide-insecticide)	Abamectine (18 g/l)	Suspension concentrée	Abamectine	action de contact et à action gastrique	MEDMAC (2015)
Equation Pro (fongicide anti-mildiou)	Famoxadone (22,5 %) + Cymoxanil (30 %)	Poudre Mouillable	Oxazolidinédiones, Acétamides	Cuticulaire et pénétrant	ACI (2015)
Folio Gold (fongicide systémique)	Chlorothalonil (500 g/l) + Métalaxyl.M 37.5 g/l	Suspension concentrée	Chloronitriles Phénylamides	De contact Diffusant (acropétales) Pénétrant (Translaminaire Foliaire)	Syngenta (2019)

4. Méthodes

4. 1. Collecte et la conservation des échantillons de sol

Les échantillons de sols ont été prélevés d'un lot de pomme de terre divisé en trois micro-parcelles dont deux ont été traitées avec 3 produits phytosanitaires à raison de deux doses (Tableau 9). Le prélèvement a été effectué au niveau de la couche superficielle du sol (0-20 cm). L'activité biologique est maximale dans l'horizon de surface et décroît plus ou moins rapidement avec la profondeur (Alvarez *et al.*, 2002). Les échantillons de sol ont été collectés dans des cylindres en plastique (5 x 25 cm) ce qui permet de limiter les contaminations biologiques entre les différents horizons puis conservés à - 20° C.

Tableau 9. Doses appliquées des produits phytosanitaires.

Produits/Doses	Dose 1 (dose agronomique)	Dose 2 (2x la dose agronomique)
Medamec (Acaricide)	0.075 % (v/v)	0.15 % (v/v)
Equation Pro (Fongicide)	0.031 % (m/v)	0.625% (m/v)
Folio Gold (Fongicide)	0.05 % (v/v)	0.1 % (v/v)

4. 2. Analyses physico-chimiques

4. 2.1. Mesure de la conductivité électrique

C'est la méthode internationale de référence qui a été mise au point par l'USSL, Pour extraire la solution, ce dernier a été mis à saturation par malaxage avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre le point de saturation. La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre. La mesure a été effectuée sur les extraits des échantillons de sols prélevés des trois lots expérimentaux et dont le rapport (terre/eau) est de 1/5 (Saoud, 2014).

4. 2.2. Mesure du pH

La mesure de pH des extraits cités précédemment a été effectuée selon la méthode électrométrique (Soltner, 2005).

4. 3. Analyses microbiologiques

4. 3.1. Préparation des suspensions-dilutions

Une suspension constituée de 10 grammes de sol pour chaque échantillon a été préparée dans un flacon en verre de 250 ml contenant 90 ml d'une solution de pyrophosphate de sodium 0.1 % stérile. La solution a été agitée pendant 10 minutes à travers un agitateur magnétique. 10 ml de la suspension de chaque échantillon a été transféré dans un flacon de 250 ml contenant 90 ml d'eau distillée stérile (10^{-2}). Après une homogénéisation au vortex, des dilutions en série au $1/10^e$ jusqu'à la dilution 10^{-6} ont été préparées par introduction de 1 ml de la dilution 10^{-n} dans des tubes en verre à vis de 23 ml contenant 9 ml d'eau distillée stérile (Dictor, 1994) (modifié).

4. 3.2. Dénombrement de la microflore totale

4. 3. 2.1. Dénombrement en milieu liquide

Le dénombrement de la microflore totale du sol en milieu liquide a été réalisé selon la technique du Nombre le Plus Probable (NPP) décrite par Dictor (1994) avec quelques modifications. Un volume de 1 ml des dilutions 10^{-3} à 10^{-7} de chaque échantillon a été transféré 5 fois dans 5 tubes en verre de 20 ml contenant 9 ml de milieu Extrait de sol (ES) stérile (Annexe 1). Les tubes ont été agités pendant quelques secondes au Vortex et incubés dans l'étuve à 28°C pendant 21 jours. Cinq tubes témoin contenant le milieu de

culture non inoculé ont été incubés en même temps que les autres pour vérifier l'absence de contamination durant l'incubation. Le nombre de microorganismes a été déterminé à l'aide des tables de Mac Crady.

4. 3.2.2. Dénombrement des bactéries sur milieu solide

Un volume de 0.1 ml de chaque dilution (10^{-1} à 10^{-6}) de chaque échantillon a été déposé à l'aide de pipettes pasteurs sur milieu ES repartitionné dans des boites de pétri. Trois boites par dilution ont été préparées. La répartition de la suspension-dilution sur le milieu solide a été réalisée par la méthode d'ensemencement par épuisement pour éviter la formation des nappes. Les boites ont été incubées dans l'étuve à 28°C pendant 7 jours. La taille de la microflore a été estimée par la méthode de comptage sur boites (Dictor, 1994) (modifié).

4. 3.3. Dénombrement des champignons

Le dénombrement des champignons du sol a été réalisé sur milieu solide. Un volume de 0.1 ml de chaque dilution (10^{-1} à 10^{-6}) de chaque échantillon a été déposé sur milieu solide ES selon la méthode citée précédemment. Les boitesensemencées ont été par la suite incubées à 28°C pendant 7 jours. La taille de la microflore a été estimée par la méthode de comptage sur boites (Dictor, 1994) (modifié).

4. 3.4. Détermination de la biomasse microbienne

La méthode de fumigation-extraction est la méthode usuelle pour la détermination de la biomasse microbienne du sol. Elle a été mise au point par Vance et *al.* (1987). La méthode consiste à doser le carbone organique présent dans le sol. Elle a été réalisée sur des échantillons de sol fumigué ainsi que d'autres non fumigués, ces derniers sont considérés comme témoins. Les étapes de cette technique sont :

A. La fumigation

10 g de sol sec de chaque échantillon ont été mis dans un dessiccateur avec 40 ml de chloroforme pendant 24 heures afin qu'ils soient fumigués. Pour le témoin, cette étape a été ignorée.

B. L'extraction

Les échantillons de sol fumigués et le témoin ont été transférés dans des béchers aux quels 25 ml de K_2SO_4 (0.5 M) ont été ajoutés. Les solutions ont été agitées à l'aide d'un agitateur magnétique puis centrifugés à 4000 rpm pendant 30 minutes.

C. La digestion

Après la centrifugation, un volume de 8 ml de chacun des filtrats a été mélangé dans des béchers avec 2 ml de $K_2Cr_2O_7$ (66.7 mM), 10 ml de H_2SO_4 (98%) et 5 ml de H_3PO_4 (88%). Les solutions ont été transférées dans des ballons puis mises dans un bain marie à reflux pendant 30 minutes. Le réfrigérant a été rincé avec 25 ml d'eau distillée.

D. Le titrage

Le digestat additionné d'une goutte d'indicateur coloré le bipyridine est titré à chaud par le Sel de Mohr (sulfate de fer et d'ammonium) (33.3 mM). Selon Vance *et al* (1987), la quantité de biomasse microbienne est calculée de la façon suivante :

$$\text{Biomasse microbienne} = 2,64 \times E_c$$

E_c : la différence entre le carbone organique extrait par l'échantillon du sol fumigué et celui non fumigué.

Résultats
et
discussions

1. Analyses physico-chimiques

1. 1. Mesure de la conductivité électrique

Les résultats de la conductivité électrique sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10. Résultats de la mesure de la conductivité électrique.

Echantillon	Conductivité électrique
Témoin	0.08 dS/m
Sol traité (D1)	0.09 dS/m
Sol traité (D2)	0.07 dS/m

Selon Maillard (2001), le sol des trois lots ne présente pas un problème de salinité puisque les résultats de la conductivité électrique sont inférieurs à 2 dS/m (Annexe 2). Pour les sols traités, les résultats montrent que le traitement avec les produits phytosanitaires utilisés n'a aucun impact significatif sur la conductivité électrique. Ces faibles valeurs de conductivité électriques seraient probablement dues à de faibles concentrations en ion Na^+ échangeable et le Cl^- dans le sol (Reguieg, 2007) classant ainsi nos sols expérimentaux comme non salins. Ce dernier avait signalé la faible présence du sodium (0.43 meq/100g de terre) dans ses lots témoins cultivés par le blé dur, le pois-chiche et leur association au niveau de notre station agronomique expérimentale.

Selon Van Hoorn (1981) in Gelaye et al. (2019), le processus de salinisation du sol est étroitement lié à sa texture et sa structure du sol. Ainsi, un sol à texture grossière, perméable et bien drainant est très peu affecté par la salinisation, on y rencontre les phénomènes de lixiviation et de migration des sels en profondeur. En revanche, les sols lourds, peu perméables et de texture fine présentent des problèmes d'hydromorphie et de salinisation. En effet, Reguieg (2017) avait classé ses sols à texture sableuse (54.43% de sable grossier et 30.62% de sable fin) donc bien drainants et perméables en plus des faibles concentrations en ions Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ de l'eau d'irrigation (5.95, 3.1, 2.74 et 0.28 meq/l, respectivement).

1. 2. Mesure du pH

Le pH s'avère basique pour les trois lots (Tableau 11) puisqu'il oscille entre 7.5 et 8.7 (Soltner, 2005). D'après les résultats obtenus, le traitement avec les produits phytosanitaires utilisés n'a pas affecté le pH du sol. Cette alcalinité peut être due aux bases échangeables

trouvées dans le sol, fait confirmé par Reguieg (2007) qui a signalé que le calcium et le magnésium échangeables présentent la fraction la plus importante largement dominante (4.1 et 1.6 meq/100g, respectivement) parmi les bases échangeables analysées dans ses sols cultivés sans apports d'engrais. Ce dernier a aussi reporté la présence d'une quantité appréciable de calcaire (30.47% de CaCO₃ total et 10.33% de CaCO₃ actif) ainsi qu'une faible teneur en matière organique (0.69%).

Tableau 11. Résultats de la mesure du pH.

Echantillon	pH
Témoin	8.05
Sol traité (D1)	8.1
Sol traité (D2)	8.3

2. Analyses microbiologiques

2. 1. Détermination de la microflore totale

2. 1.1. Dénombrement sur milieu liquide

Les résultats sont déterminés par observation macroscopique de présence de trouble ou pas de la microflore du sol dans les différents tubes. Les résultats de cette technique sont illustrés par la figure ci-dessous.

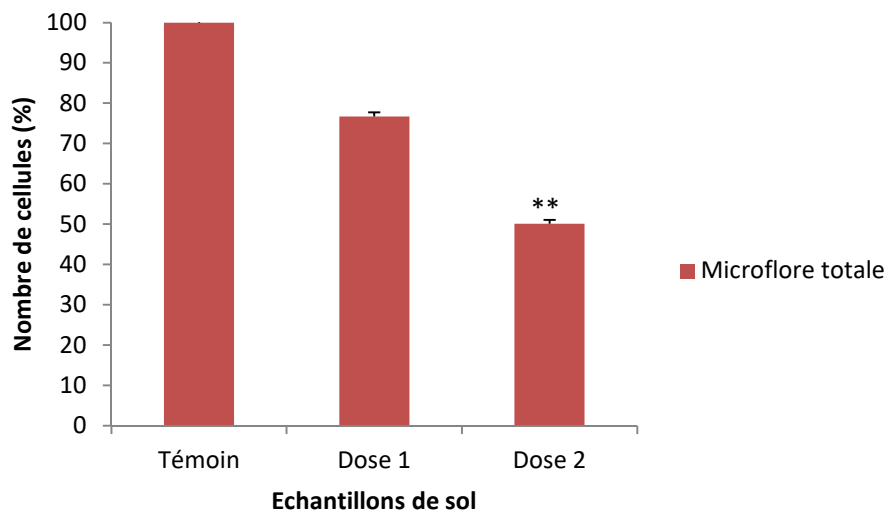


Figure 12. Dénombrement de la microflore totale du sol (Extrait de Sol) par la technique NPP dans les différents échantillons de sol.

D'après les analyses statistiques, une différence significative entre le sol témoin et celui recevant les doses les plus élevées (D2) des différents produits phytosanitaires a été observée ($P < 0.023$) avec une diminution de 50% par rapport au sol témoin.

2. 1.2. Dénombrement sur milieu solide

Les résultats (Figure 13) sont déterminés par comptage de colonies des bactéries du sol dans les différentes boîtes.

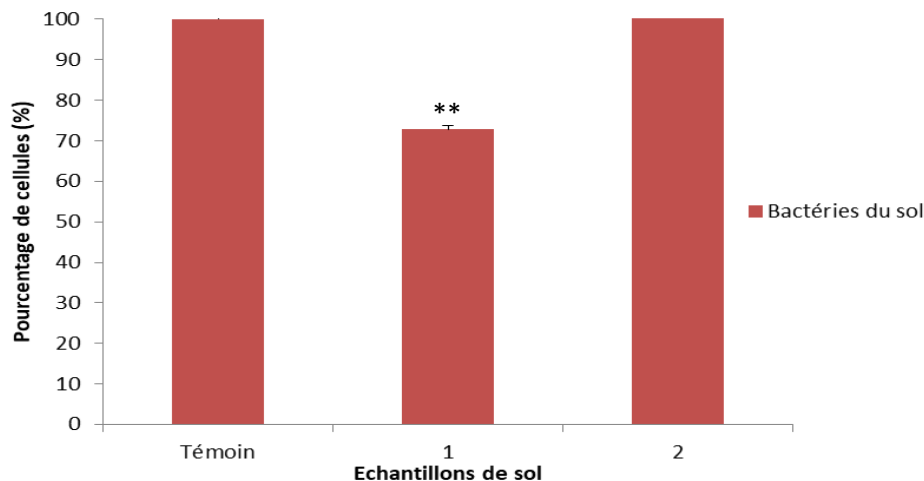


Figure 13. Dénombrement des bactéries du sol sur milieu solide (Extrait de Sol).

Cette technique a permis en l'occurrence de soulever une différence hautement significative entre le sol témoin et celui recevant la dose 1 ($P < 0.009$); pour ce dernier le pourcentage des cellules estimées est de l'ordre de 72%. Une différence significative aussi a été notée entre les sols recevant les doses 1, vu qu'on a enregistré des taux bactériens comparables pour le sol témoin et celui traité avec la dose 2.

2. 2. Dénombrement des champignons

Les résultats sont déterminés par comptage de colonies de la microflore fongique du sol sur les différentes boîtes (Figure 14).

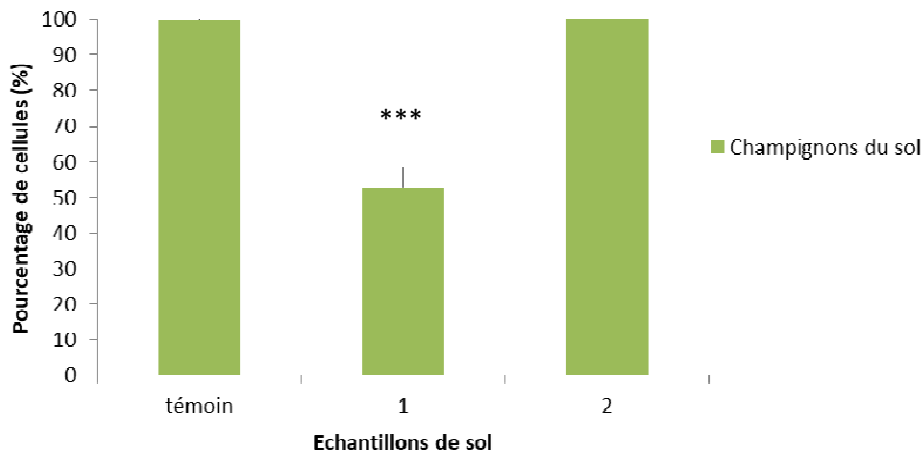


Figure 14. Résultats du dénombrement des champignons sur milieu solide.

Les valeurs du dénombrement des champignons exprimées en pourcentage de cellules confirment les résultats du comptage bactérien. Une différence significative a été notée en comparant le témoin avec le sol recevant la dose 1 ($P < 0.019$) présentant un pourcentage de colonies de l'ordre de 52 %. Cette comparaison est hautement significative entre le sol traité avec la dose 1 et celui traité avec la dose 2 ($P < 0.003$), dont le pourcentage des champignons est comparable à celui du sol témoin.

3. Détermination de la biomasse microbienne

Les résultats sont déterminés par titrage colorimétrique et illustrés par la figure ci-dessous.

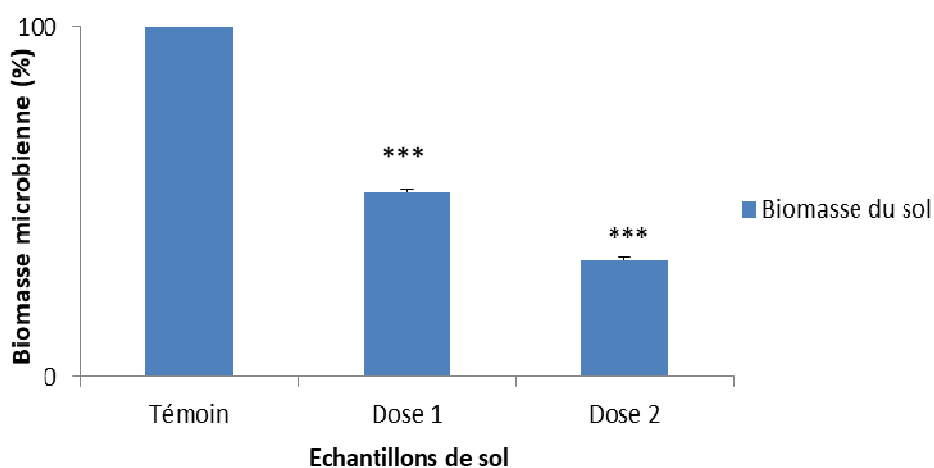


Figure 15. Biomasse microbienne des différents sols étudiés.

D'après les résultats obtenus, l'application des différentes doses des produits phytosanitaires a conduit à des diminutions hautement significatives ($P < 0.004$ et $P < 0.001$, pour les doses 1 et 2 respectivement) de la biomasse microbienne (47% et 67 %, pour les doses 1 et 2 respectivement). L'augmentation de la dose appliquée a aussi conduit à une diminution significative ($P < 0.048$) de la biomasse microbienne (33 % pour la dose 2 vs 53% pour la dose 1).

Selon les études réalisées par Halley *et al* (1993), l'abamectine ne possède aucune activité antibactérienne et antifongique significative mais il présente peu de toxicité pour les vers de terre, aviaires, les daphnies et aucune phytotoxicité. Ainsi, les recherches de Bai et Ogbourne (2016) confirment que la famille des avermectines y compris l'abamectine n'ont aucun effet antibactérien ni antifongique. Ils affirment aussi que l'abamectine est actif sur les helminthes et les arthropodes. Puisque les deux études confirment que l'abamectine n'a pas d'effet antifongique et antibactérien la diminution et la croissance des bactéries et champignons dans nos échantillons étudiés ne peuvent être dus à ce composé.

L'inhibition significative de la croissance de la microflore totale et les bactéries respectivement notée lors de l'application de la dose 2 (Figure12) et la dose1 (Figure 13) est due à l'effet antibactérien d'une part du cymoxanil et famoxadone (Robert *et al*, 2008 ; Fayette *et al*, 2012) et d'autre part du chlorothalonil, ce dernier inhibant précisément les bactéries participant dans le cycle d'azote (yang *et al*, 2011).

Lors du dénombrement des champignons en milieu solide, une diminution significative de cellules après application de la dose 1 a été notée (48%). Les études réalisées par Fayette *et al*. (2012) affirment que l'association des deux composés famoxadone et cymoxanil inhibent la croissance des champignons, Ainsi les recherches réalisées par Keinath (2007) confirme aussi que l'association des deux composés cymoxanil et famoxadone possèdent un effet antifongique contre *Phytophthora capsici* chez le poivron.

La famoxadone (famille des oxazolidinediones) est une substance cuticulaire ne pouvant être lessivée par les pluies qui inhibe l'ubiquinol oxydase au niveau du complexe III de la chaîne respiratoire mitochondrial fongique (Rocher, 2004). Le cymoxamil, cyanoacétamide-oxime, est un fongicide systémique à effet site unique qui agit sur la formation des parois cellulaires particulièrement chez les Oomycètes. Les souches sensibles sont celles qui dégradent les cyano-oximes en métabolites. Il est souvent employé en mélange avec d'autres fongicides à effet muti-sites (Rocher, 2004). Le mode d'action du cymoxanil

reste encore inconnu mais une étude récente suggère que ce dernier peut être considéré comme promédicament conduisant à la formation d'un métabolite actif non encore identifié, par exemple la cyanoglycine (Hillebrand *et al.*, 2019 in Jeschke *et al.*, 2019). Ces auteurs reportent aussi une inhibition de la respiration par le cymoxanil dans la levure à des concentrations d'environ 10-30µg/ml.

Le chlorothalonil, est un fongicide non systémique polyvalent ou multi-sites qui inhibe plus particulièrement la germination des spores mais peut avoir des effets secondaires sur d'autres microorganismes en raison de leurs multiples impacts sur les sites biochimiques. Le chlorothalonil (tétrachloroisophthalonitrile), un fongicide à base de phthalonitrile largement utilisé, peut bloquer la transformation des structures spéciales du glutathion et réduire les activités enzymatiques qui utilisent la conformation spéciale du glutathion comme centre de réaction. Des recherches antérieures ont montré que le chlorothalonil peut influencer la croissance bactérienne dans le sol, qui peut avoir des conséquences écologiques sur le cycle de l'azote (yang *et al.*, 2011).

Comme le métalaxyl, le métalaxyl-M contrôle tous les pathogènes des Oomycètes appartenant aux ordres Peronosporales, Sclerosporales et Pythiales tels que les moisissures duveteuses des genres *Albugo*, *Bremia*, *Peronospora*, *Peronosclerospora*, *Plasmopara*, *Pseudoperonospora*, *Sclerophthora* et *Sclerospora* ainsi que les espèces *Pythium* et *Phytophthora*. Les fongicides phénylamides (PA), incluant le métalaxyl et le métalaxyl-M, affectent la synthèse des acides nucléiques en inhibant l'activité du système ARN polymérase I. Par exemple, le métalaxyl (méthyl N-(méthoxyacétyl)-N-(2,6-xylyl)-DL-alaninate), un fongicide PA largement utilisé, inhibe l'incorporation d'uridine dans la chaîne ARN. Il interfère avec la synthèse des acides nucléiques par l'inhibition de l'activité de l'ARN polymérase I, bloquant ainsi la synthèse de l'ARNr au niveau de la transcription de l'uridine. Les hyphes traitées au métalaxyl produisent souvent des parois cellulaires plus épaisses que celles non traitées (Sierotzki *et al.* 2019 in Jeschke *et al.*, 2019). Usataya et ses collaborateurs (1993) in Monkiedje *et al.*, (2002)., ont montré que l'application de métalaxyl sur les sols de vignobles pendant trois ans, diminuait considérablement le nombre de microorganismes, diminuait leur activité et augmentait le nombre de micro-organismes impliqués dans la minéralisation de la matière organique. En effet, yang *et al.*, (2011) a signalé l'altération des activités d'ammonification et de nitrification des bactéries dans le sol. D'autre part Dvornikova et ses collaborateurs (1988) cités par les auteurs précédents, ont signalé que l'application systémique de métalaxyl induit une brève stimulation et une suppression

subséquente des champignons du sol et des actinomycètes (cas de notre étude voir Figures 13 et 14).

La biomasse microbienne est liée à la microflore du sol y compris les bactéries et les champignons. La méthode de la fumigation-extraction confirme les résultats du dénombrement sur milieu liquide (méthode NPP) et a permis de noter une diminution significative de la biomasse microbienne en fonction de la dose appliquée des différents pesticides (Figure 15). Les pesticides sont largement utilisés dans le monde entier pour lutter contre les champignons et les insectes qui détruisent les plantes cultivées et leurs produits. Cependant, ces produits agrochimiques détruisent également une grande variété de microorganismes bénéfiques non ciblés, qui contribuent de manière significative à améliorer la productivité des cultures (Venkataaman, 1972 ; Roger et Kulasooriya, 1980).

Les herbicides et les pesticides affectent divers processus microbiens du sol (Johnen et Drew, 1977 ; Ross, 1974 ; Wainwright, 1978), inhibent la décomposition (Pugh et Williams, 1971 ; Grossbard et Wingfield, 1978) et, selon le type et la dose d'application, peuvent modifier la biomasse sur le plan quantitatif et qualitatif à court et à long termes (Anderson et Armstrong, 1981). Les effets à court terme liés à l'utilisation d'engrais ou de pesticides sont généralement liés à des perturbations de l'équilibre chimique et biologique du sol. On sait que l'utilisation de pesticides supprime sélectivement l'activité des microorganismes responsables de la fixation et de la nitrification de N₂ pendant 4 à 12 semaines dans le sol (Bollen, 1961 ; Chandra, 1964).

L'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides aux doses recommandées a toutefois peu d'effets directs à long terme sur les populations microbiennes et leur activité (Wainwright, 1978 ; Biederbeck *et al.*, 1987). La décomposition des pesticides est souvent plus rapide dans les sols riches en matière organique, probablement en raison d'une activité microbienne plus vigoureuse (Greaves *et al.*, 1976). Il existe plusieurs rapports sur la toxicité de divers pesticides pour les bactéries fixatrices d'azote des rizières (Singh, 1973 ; Kar et Singh, 1978 ; Adhikary, 1989 ; Das et Adhikary, 1996). Anderson et ses collaborateurs (1992) ont conclu que, lorsqu'ils sont utilisés selon les directives, aucun des pesticides testés ne devrait avoir d'effets négatifs ou écologiques inacceptables sur la minéralisation en C ou en N des sols.

Conclusion et perspectives

La lutte chimique est largement utilisée en agriculture dans les stratégies de lutte contre les organismes nuisibles. La problématique de l'impact des produits phytosanitaires sur les microorganismes du sol a été abordée dans cette étude. L'objectif global était de déterminer à court terme, l'impact des produits phytosanitaires sur la microflore du sol, plus précisément la communauté bactérienne et fongique. L'étude expérimentale est également constituée de trois approches différentes, le dénombrement en milieu liquide, solide, et la méthode de fumigation-extraction.

D'après les résultats obtenus, il paraît que l'application de la dose 1 (dose agronomique) des différents produits phytosanitaires a conduit à une diminution de la microflore totale et la population fongique de l'ordre de 28% et 48%, respectivement. Fait confirmé par les valeurs enregistrées avec la technique NPP (23%) et celle avec la biomasse microbienne (47%). L'application de la dose 2 (2x la dose agronomique) a accentué cette diminution microbienne jusqu'à des taux de l'ordre de 50% et 67%, respectivement. La technique de dénombrement sur milieu solide a par contre révélé des densités microbiennes (bactérienne et fongique) légèrement plus élevées que celle observée pour le témoin. Ces résultats affirment que les produits phytosanitaires agissent en effet sur la microflore du sol car sa hausse et sa diminution reflète un dérèglement de son activité.

Dans la présente étude, on s'est limité à l'évaluation de l'impact des pesticides sur les bactéries et les champignons du sol. L'approche du dénombrement et de la fumigation-extraction a concerné uniquement une partie de la microflore du sol. Afin de permettre une meilleure connaissance de l'impact des produits phytosanitaires sur la microbiologie du sol, d'autres organismes doivent être pris en compte comme la microfaune du sol. Pour la suite des activités du projet, on devrait par exemple s'intéresser à l'impact des pesticides sur la diversité microbienne et les activités enzymatiques. Enfin, ce travail a concerné uniquement l'effet à court terme. Dans l'objectif d'une agriculture productive, durable et soucieuse de l'environnement, des études à long terme de l'impact des pesticides sur la microbiologie des sols doivent être réalisées.

Références bibliographiques

- Abdelgawad, H., Saleh, A.M., Al Jaouni, S., Selim, S., Hassan, M.O., Wadaan, M.A.M., Shuikan, A.M., Mohamed, H.S., Hozzein, W.N., 2019. Utilization of actinobacteria to enhance the production and quality of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits in a semi-arid environment. *Sci Total Environ* 665: 690-697.
- A.C.I., 2015. EQUATION PRO. Algerie
- Adachi, T., Suzuki, Y., Nishiyama, M., Kodaka, R., Fujisawa, T., Katagi, T., 2018. Photodegradation of strobilurin fungicide mandestrobin in water. *Journal of agricultural and food chemistry* 66: 8514-8521.
- Adhikary, S.P., 1989. Effect of pesticides on the growth, photosynthetic oxygen evolution and nitrogen fixation of *Westiellopsis prolifica*. *The Journal of General and Applied Microbiology* 35: 319-325.
- Alexander, M., 1961. *Introduction to soil microbiology*. John Wiley and Sons, Inc., pp. 472
- Alexander, M., 1977. *Introduction to soil microbiology-2*. John Wiley and Sons, Inc., Pp 467
- Alexander, M., 1982. *Most probable number method for microbial populations. Methods of Soil Analysis: Part 2. In Methods in Soil Analysis*. Eds. A L Page, R H Miller and D R Keeney. pp 815–820. Agronomy 9, part 2, 2nd ed. ASA, SSSA, Madson, WI.
- Alexandratos, N., 1995. World agriculture: towards 2010: an FAO study. Food & Agriculture Org., pp.
- Alobwede, E., Leake, J.R., Pandhal, J., 2019. Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. *Geoderma* 334: 113-123.
- Alvarez, G., Chaussod, R., Cluzeau, D., Godden, B., Lemarié, C., Metzger, L., 2002. *Activités biologiques et fertilité des sols. Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles*. l'ITAB, Paris. Pp27
- Ames, M., Spooner, D.M., 2008. DNA from herbarium specimens settles a controversy about origins of the European potato. *American Journal of Botany* 95: 252-257.
- Anderson, J., Armstrong, R.A., Smith, S., 1981. Methods to evaluate pesticide damage to the biomass of the soil microflora. *Soil Biology and Biochemistry* 13: 149-153.
- Antonova, E.S., Hammer, B.K., 2011. Quorum-sensing autoinducer molecules produced by members of a multispecies biofilm promote horizontal gene transfer to *Vibrio cholerae*. *FEMS microbiology letters* 322: 68-76.
- A.P., 2009. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2): 105-121.
- Arbach, G., 2012. Pesticide Legislation in the EU. Toward sustainable Use of plant protection products. *Library of the European Parliament*. Pp6
- Arévalo, A., Castro, R., 2003. Evaluación post-registro de los insecticidas con licencia de uso para controlar la polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* (Povolny 1973)(Lepidoptera: Gelechiidae) en Colombia. Memorias II Taller Nacional, *Tecia solanivora. CEVIPAPA, CNP, Bogotá, Colombia*: 86-89.
- Aubertot, J., Barbier, J., Carpentier, A., Gril, J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M., 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux*. Quae. pp136

Références bibliographiques

- Ayad-Mokhtari, N., 2012. Identification et dosage des pesticides dans l'Agriculture et les problèmes d'environnement liés. *Mémoire de Magister*, Univ. d'Oran 87.
- Aye, A.M., 2015. Mise en évidence du système de communication "Quorum Sensing" impliquant les AHLs chez des bactéries marines isolées de la Méditerranée. Thèse de Doctorat. Université de Toulon France. pp.304
- Bai, S.H., Ogbourne, S., 2016. Eco-toxicological effects of the avermectin family with a focus on abamectin and ivermectin. *Chemosphere* 154: 204-214.
- Bakalivanov, D., 1990. Side effect of the insecticide Lannate on some soil microorganisms. *Pochvoznanie i Agrokhimiya* 25: 56-61.
- Balbontín, R., Vlamakis, H., Kolter, R., 2014. Mutualistic interaction between *S almonella enterica* and *A spergillus niger* and its effects on *Z ea mays* colonization. *Microbial biotechnology* 7: 589-600.
- Baldi, I., Cordier, S., Coumoul, X., Elbaz, A., Gamet-Payrastre, L., Lebailly, P., Multigner, L., Rahmani, R., Spinosi, J., Van Maele-Fabry, G., 2013. Pesticides: effets sur la santé. Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) pp.161
- Balkwill, D.L., Ghiorse, W.C., 1985. Characterization of subsurface bacteria associated with 2 shallow aquifers in Oklahoma. *Applied and Environmental Microbiology* 50: 580-588.
- Balogh-Brunstad, Z., Keller, C., Gill, R., Bormann, B., Li, C., 2008. The effect of bacteria and fungi on chemical weathering and chemical denudation fluxes in pine growth experiments. *Biogeochemistry* 88: 153-167.
- Bamouh, H., 1999. Technique de production la culture de pomme de terre, *bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA*. N 58: 1-15.
- Barriuso, E., Bedos, C., Benoit, P., Charnay, M., Coquet, Y., 2005. *Les pesticides dans le sol. Conséquences agronomiques et environnementales*. Raoul Calvet. Pp637
- Barron, G., 1988. Microcolonies of bacteria as a nutrient source for lignicolous and other fungi. *Canadian Journal of Botany* 66: 2505-2510.
- Barron, G.L., 2003. Predatory fungi, wood decay, and the carbon cycle. *Biodiversity* 4: 3-9.
- Bass, C., Puinean, A.M., Zimmer, C.T., Denholm, I., Field, L.M., Foster, S.P., Gutbrod, O., Nauen, R., Slater, R., Williamson, M.S., 2014. The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect biochemistry and molecular biology* 51: 41-51.
- Batsch, D., 2011. L'impact des pesticides sur la santé humaine. Thèse de Doctorat. UHP- Université Henri Poincaré France. pp.187
- Beloin, R.M., Sinclair, J.L., Ghiorse, W.C., 1988. Distribution and activity of microorganisms in subsurface sediments of a pristine study site in Oklahoma. *Microbial ecology* 16: 85-97.
- Bernard, L., Chapuis-Lardy, L., Razafimbelo, T., Razafindrakoto, M., Pablo, A.-L., Legname, E., Poulain, J., Bröls, T., O'donohue, M., Brauman, A., 2012. Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil. *The ISME journal* 6: 213.
- Bernhards, U., 1998. La pomme de terre *Solanum tuberosum* L. Institut National Agronomique, Paris-Grignon.
- Bever, J.D., 2003. Soil community feedback and the coexistence of competitors: conceptual frameworks and empirical tests. *New Phytologist* 157: 465-473.
- Biederbeck, V., Campbell, C., Smith, A., 1987. Effects of Long-Term 2, 4-D Field Applications on Soil Biochemical Processes 1. *Journal of environmental quality* 16: 257-262.

Références bibliographiques

- Bohs, L., 2007. Phylogeny of the *Cyphomandra* clade of the genus *Solanum* (Solanaceae) based on ITS sequence data. *Taxon* 56: 1012-1026.
- Boland, J., Koomen, I., van Lidth de Jeude, J., Oudejans, J., 2004. *Les pesticides: composition, utilisation et risques*. Wageningen: Agrodok. 124
- Bollen, W.B., 1961. Interactions between pesticides and soil microorganisms. *Annual Reviews in Microbiology* 15: 69-92.
- Botha, A., 2011. The importance and ecology of yeasts in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1-8.
- Boualem, M., 2009. Etude bioécologique de *phyllocnistis citrella* stainton (Lépidoptera: gracillariidae) et de son complexe parasitaire dans la région de Mostaganem. Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem. pp.157
- Boudemagh, A., 2007. Isolement, à partir des sols Sahariens, de bactéries actinomycétales productrices de molécules antifongiques, identification moléculaire de souches actives. Thèse de Doctorat, Université de Constantine. Pp144
- Boukaya, N., Essai d'efficacité d'un biofertilisant dans la lutte contre la dissimulation du virus Y de la pomme de terre. Université Blida1-Saad Dahlab pp.88
- Bouziani, M., 2007a. L'usage immodéré des pesticides. De graves conséquences sanitaires. Le Guide de la Médecine et de la Santé.
- Bouziani, M., 2007b. L'usage immodéré des pesticides. De graves conséquences sanitaires. Le guide de médecine et de la santé. Santémaghreb.[consulté le, 11/12/2011].
- Boyle, C.J., Schulz, B.J., Sieber, T.N., 2006. *Microbial root endophytes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 367
- Brown, G.G., Barois, I., Lavelle, P., 2000. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European journal of soil biology* 36: 177-198.
- Buée, M., Reich, M., Murat, C., Morin, E., Nilsson, R., Uroz, S., Martin, F., 2009. 454 Pyrosequencing analyses of forest soils reveal an unexpectedly high fungal diversity. *New Phytologist* 184: 449-456.
- Caetano, F.H., Zara, F.J., Bution, M., 2010. A new strategy of endosymbiont midgut bacteria in ant (Ponerinae). *Micron* 41: 183-186.
- Calatrava, V., Hom, E.F.Y., Llamas, Á., Fernández, E., Galván, A., 2019. Nitrogen scavenging from amino acids and peptides in the model alga *Chlamydomonas reinhardtii*. The role of extracellular l-amino oxidase. *Algal Research* 38.
- Chandra, P., 1964. Herbicidal effects on certain soil microbial activities in some brown soils of Saskatchewan. *Weed Research* 4: 54-63.
- Chernin, L., Ismailov, Z., Haran, S., Chet, I., 1995. Chitinolytic *Enterobacter* agglomerans antagonistic to fungal plant pathogens. *Applied and Environmental Microbiology* 61: 1720-1726.
- Costerton, W., Veeh, R., Shirtliff, M., Pasmore, M., Post, C., Ehrlich, G., 2003. The application of biofilm science to the study and control of chronic bacterial infections. *The Journal of clinical investigation* 112: 1466-1477.
- CPP, 2002. Comité de la Prévention et de la Précaution.
- Dance, A., 2008. Soil ecology: what lies beneath. *Nature News* 455: 724-725.
- Darcheville, O., 2008. Rôle des composantes géochimiques et microbiologiques d'un sol sur le comportement du sélénium en conditions oxiques et anoxiques. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse pp. 251
- Das, M., Adhikary, S., 1996. Toxicity of three pesticides to several rice-field cyanobacteria. *Tropical agriculture*. 155-157.

Références bibliographiques

- De Boer, W., Gunnewiek, P.J.K., Kowalchuk, G.A., Van Veen, J.A., 2001. Growth of Chitinolytic Dune Soil β -Subclass Proteobacteria in Response to Invading Fungal Hyphae. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 3358-3362.
- Dedryver, C.-A., Le Ralec, A., Fabre, F., 2010. The conflicting relationships between aphids and men: a review of aphid damage and control strategies. *Comptes rendus biologies* 333: 539-553.
- Delaplace, P., 2007. Caractérisation physiologique et biochimique du processus de vieillissement du tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Université de Liège, Liège, Belgique pp.
- Denoncourt, A.M., Paquet, V.E., Charette, S.J., 2014. Potential role of bacteria packaging by protozoa in the persistence and transmission of pathogenic bacteria. *Front Microbiol* 5: 240.
- Deravel, J., Krier, F., Jacques, P., 2014. Les biopesticides, compléments et alternatives aux produits phytosanitaires chimiques (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 18: 220-232.
- Devi, A.R., Sharma, G.D., Majumdar, P.B., Pandey, P., 2018. A multispecies consortium of bacteria having plant growth promotion and antifungal activities, for the management of *Fusarium* wilt complex disease in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Biocatalysis and agricultural biotechnology* 16: 614-624.
- Dictor, M.-C., 1994. Caractérisation de la distribution et du comportement métabolique de la microflore indigène dans un profil de sol. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine France. pp.225
- Doberva, M., 2016. *Le quorum sensing bactérien dans l'environnement marin: diversité moléculaire et génétique des auto-inducteurs*. Paris 6 pp.
- Dobretsov, S., Teplitski, M., Paul, V., 2009. Mini-review: quorum sensing in the marine environment and its relationship to biofouling. *Biofouling* 25: 413-427.
- Domergues, Y., Mangenot, F., 1970. Les enzymes du sol. Ecologie Microbienne du Sol. Nielsen et Cie, Paris.
- Downing, A.L., DeVanna, K.M., Rubeck-Schurtz, C.N., Tuhela, L., Grunkemeyer, H., 2008. Community and ecosystem responses to a pulsed pesticide disturbance in freshwater ecosystems. *Ecotoxicology* 17: 539-548.
- DSA, 2015. Campagne 2000.2014. Mostaganem. Statistiques de la Direction des Services agricoles pp. 10.
- Dvornikova, T., Granatskaya, T., Finkel'shtejn, Z., Tolochkina, S., Pestereva, N., Nezhinskij, A., 1988. [The behaviour of Rhidomil in soil and its effect on soil microflora [Experiments on calcareous chernozem in Moldavian]].[Russian]. *Agrokhimiya*.
- Dymond, J.R., 2013. *Ecosystem services in New Zealand : conditions and trends*. Manaaki Whenua Press, 539 pp.
- Edwards, C.A., 2004. *Earthworm ecology*. CRC press, pp.456
- Edwards, O.R., Franzmann, B., Thackray, D., Micic, S., 2008. Insecticide resistance and implications for future aphid management in Australian grains and pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48: 1523-1530.
- Eldridge, B.F., 2008. *Pesticide application and safety training for applicators of public health pesticides*. Vector-Borne Disease Section. pp128
- Elzebroek, A.T.G., 2008. *Guide to cultivated plants*. CABI, pp.525
- EMERSON, W., 1959. The structure of soil crumbs. . *Journal of Soil Science*, 10: 235-244.
- FAO, 2002. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture,. Agriculture mondiale: horizon 2015/2030.
- FAO, 2008a. Année internationale de la pomme de terre

Références bibliographiques

- FAO, 2008b. Lutte raisonnée contre les ravageurs et les maladies de la pomme de terre. L'Année internationale de la pomme de terre.
- FAOSTAT, 2007. Food and Agriculture Organisation (FAO).
- Faostat, F., 2014. Food and Agriculture Organization statistical database.
- FAOSTAT, F., 2015. FAO Statistics Division; 2014.
- Farahat, A., 1966. STUDIES ON INFLUENCE OF SOME FUNGI ON COLLEMBOLA AND ACARI. *Pedobiologia* 6: 258-&.
- Fayette, J., Roberts, P.D., Pernezny, K.L., Jones, J.B., 2012. The role of cymoxanil and famoxadone in the management of bacterial spot on tomato and pepper and bacterial leaf spot on lettuce. *Crop Protection* 31: 107-112.
- Federle, T.W., Ventullo, R.M., White, D.C., 1990. Spatial distribution of microbial biomass, activity, community structure, and the biodegradation of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) and linear alcohol ethoxylate (LAE) in the subsurface. *Microbial ecology* 20: 297-313.
- Fenchel, T., Esteban, G.F., Finlay, B.J., 1997. Local versus global diversity of microorganisms: cryptic diversity of ciliated protozoa. *Oikos* 80: 220-225.
- Fournier, J., 1988a. Chimie des pesticides.
- Fournier, J., 1988b. Chimie des pesticides, Cultures et Techniques. ACCT, Paris: 199-200.
- Frederickson, J., Garland, T., Hicks, R.J., Thomas, J.M., Li, S.W. and McFadden, K.M. (1989) Lithotrophic and heterotrophic bacteria in deep subsurface sediments and their relation to sediment properties. *Geomicrobiology Journal* 7: 53-66.
- Frey-Klett, P., Burlinson, P., Deveau, A., Barret, M., Tarkka, M., Sarniguet, A., 2011. Bacterial-fungal interactions: hyphens between agricultural, clinical, environmental, and food microbiologists. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 75: 583-609.
- Fuentes, J., Garbayo, I., Cuaresma, M., Montero, Z., González-del-Valle, M., Vílchez, C., 2016. Impact of microalgae-bacteria interactions on the production of algal biomass and associated compounds. *Marine drugs* 14: 100.
- Furukawa, K., 2003. 'Super bugs' for bioremediation. *Trends in biotechnology* 21: 187-190.
- Gaggini, L., Rusterholz, H.-P., Baur, B., 2019. The annual invasive plant *Impatiens glandulifera* reduces hyphal biomass of soil fungi in deciduous forests. *Fungal Ecology* 39: 242-249.
- Galet, J., 2014. Vers la compréhension des dialogues microbiens dans les écosystèmes du sol: étude de l'interaction entre *Streptomyces* et *Pseudomonas*. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine.
- Gatignol, C., Etienne, J., 2010. Pesticides et santé. Rapport parlementaire. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*.
- Gaucher, D., Duvauchelle, S., Andrivon, D., 1998. Mildiou de la pomme de terre: le champignon évolue, la lutte aussi! Institut Technique des Céréales et des Fourrages.
- Gauthier, J., 1991. *Notions d'agriculture; le sol, les cultures, les élevages, l'économie et la gestion*. Lavoisier, Paris, 575 pp.
- Gelaye, K.K., Zehetner, F., Loiskandl, W., Klik, A., 2019. Comparison of growth of annual crops used for salinity bioremediation in the semi-arid irrigation area. *Plant, Soil and Environment*. (4): 165–171
- Ghelamallah, A., 2016. Etude des pucerons des cultures maraîchères et leurs complexes parasites dans la région de Mostaganem (Nord Ouest Algérien). Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen pp. 157
- Gisi, U., Cohen, Y., 1996. Resistance to phenylamide fungicides: a case study with *Phytophthora infestans* involving mating type and race structure. *Annual review of phytopathology* 34: 549-572.

Références bibliographiques

- Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W., 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques, pp.819
- Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 1998. *Le sol vivant* Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 519 pp.
- Gougoulias, C., Clark, J.M., Shaw, L.J., 2014. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94: 2362-2371.
- Grafton-Cardwell, E.E., Gu, P., 2003. Conserving vedalia beetle, *Rodolia cardinalis* (Mulsant)(Coleoptera: Coccinellidae), in citrus: a continuing challenge as new insecticides gain registration. *Journal of Economic Entomology* 96: 1388-1398.
- Greaves, M., Davies, H., Marsh, J., Wingfield, G., Wright, S., 1976. Herbicides and soil microorganisms. *CRC critical reviews in microbiology* 5: 1-38.
- Griffiths, B., Ritz, K., Ebbelwhite, N., Dobson, G., 1998. Soil microbial community structure: effects of substrate loading rates. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 145-153.
- Grossbard, E., Wingfield, G., 1978. Effects of paraquat, aminotriazole and glyphosate on cellulose decomposition. *Weed Research* 18: 347-353.
- Group, A.P., 2009. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society* 161: 105-121.
- Grube, A.H., Donaldson, D., Kiely, T., 2004. Pesticides industry sales and usage: 2000 and 2001 market estimates. Biological and Economic Analysis Division, US Environmental Protection Agency, .
- GUEDEGBE, H.J., 2008. *Diversité, Origine et Caractérisation de la Mycoflore des Meules de Macrotermitinae (Isoptera, Termitidae)*. UNIVERSITE PARIS EST. 128 pp.
- Hafsa, C., 2014. Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea agglomerans* isolées de sols arides. Université de Sétif 1-Ferhat Abbas pp.
- Halley, B.A., VandenHeuvel, W.J., Wislocki, P.G., 1993. Environmental effects of the usage of avermectins in livestock. *Veterinary parasitology* 48: 109-125.
- Hammer, B.K., Bassler, B.L., 2003. Quorum sensing controls biofilm formation in *Vibrio cholerae*. *Molecular microbiology* 50: 101-104.
- Harrison, K.A., Bol, R., Bardgett, R.D., 2008. Do plant species with different growth strategies vary in their ability to compete with soil microbes for chemical forms of nitrogen? *Soil Biology and Biochemistry* 40: 228-237.
- Hawkes, J.G., 1990. *The potato. Evolution, biodiversity and genetic resources*. Belhaven Press, London, 259 pp.
- Hillebrand S, Zundel J L, Tietjen K, 2011. Fungicides with Unknown Mode of Action. pages 911-932 In: *Modern Crop Protection Compounds*.
- Hussain, S., Siddique, T., Saleem, M., Arshad, M., Khalid, A., 2009. Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. *Advances in agronomy* 102: 159-200.
- Jeschke, P., Witschel, M., Krämer, W., Schirmer, U., 2019. *Modern Crop Protection Compounds* 2nd, Revised and Enlarged Columbia, MD, U.S.A.
- Johnen, B., 1977. Ecological Effects Of pesticides on Soil Microorganisms. *Soil Science* 123: 319-324.
- Johnsen, K., Jacobsen, C.S., Torsvik, V., Sørensen, J., 2001. Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils—a review. *Biology and Fertility of Soils* 33: 443-453.

Références bibliographiques

- Jones, R.A., 2001. Developing integrated disease management strategies against non-persistently aphid-borne viruses: a model programme. *Integrated Pest Management Reviews* 6: 15-46.
- Joseph, K., 2018. What Are The Effects Of Pesticide Poisoning? Worldatlas.com.
- Jury, W.A., Or, D., Pachepsky, Y., Vereecken, H., Hopmans, J.W., Ahuja, L.R., Clothier, B.E., Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J., Moldrup, P., Šimunek, J., Th Van Genuchten, M., Horton, R., 2011. Kirkham's legacy and contemporary challenges in soil physics research. *Soil Science Society of America Journal* 75: 1589-1601.
- Kadi, S., 2015. Organisation de la faune édaphique dans deux habitats forestiers de la région d'El Kala : la subéraie et le maquis. Université Badji Mokhtar Annaba pp.124
- Kar, S., Singh, P., 1978. Toxicity of carbofuran to blue-green alga *Nostoc muscorum*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 20: 707-714.
- Katznelson, H., 1965. Nature and importance of the rhizosphere. *Ecology of soil-borne plant pathogens*: 187-207.
- Katznelson, H., Henderson, V., 1964. Studies on the relationships between nematodes and other soil microorganisms: ii. interactions of *aphelenchoides parietinus* (bastian, 1865) steiner 1932 with actinomycetes, bacteria, and fungi. *Canadian journal of microbiology* 10: 37-41.
- Katznelson, H., Peterson, E., Rouatt, J., 1962. Phosphate-dissolving microorganisms on seed and in the root zone of plants. *Canadian Journal of Botany* 40: 1181-1186.
- Keinath, A.P., 2007. Sensitivity of populations of *Phytophthora capsici* from South Carolina to mefenoxam, dimethomorph, zoxamide, and cymoxanil. *Plant disease* 91: 743-748.
- Kerfahi, D., Tripathi, B.M., Lee, J., Edwards, D.P., Adams, J.M., 2014. The impact of selective-logging and forest clearance for oil palm on fungal communities in Borneo. *PLoS One* 9: e111525.
- Khedam, H., 2018. Etude de comportement de dix variétés de pomme de terre. Thèse de Doctorat. Université Saad Dahlab de Blida1
- Klironomos, J.N., Hart, M.M., 2002. Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza* 12: 181-184.
- Kobayashi, D.Y., Crouch, J.A., 2009. Bacterial/fungal interactions: from pathogens to mutualistic endosymbionts. *Annual review of phytopathology* 47: 63-82.
- Kölbel-Boelke, J., Anders, E.-M., Nehrkorn, A., 1988. Microbial communities in the saturated groundwater environment II: diversity of bacterial communities in a Pleistocene sand aquifer and their in vitro activities. *Microbial ecology* 16: 31-48.
- Laumonier, R., 1963. Cultures maraichères.
- Laumonier, R., 1978. Cultures légumières et maraichères. Tome 3. Baillière et fils, Paris, pp. 276.
- Lavelle, P., Lattaud, C., Trigo, D., Barois, I., 1995. Mutualism and biodiversity in soils. pages 23-33 In: The significance and regulation of soil biodiversity Springer.
- Lepinay, C., 2013. Etude des interactions plantes-microbes et microbes-microbes au sein de la rhizosphère, sous un aspect coûts-bénéfices, dans un contexte de variation environnementale. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne France. pp.263
- Lombard, N., 2007. Approches Métagénomiques en Microbiologie du Sol: Optimisation des Techniques Conventionnelles et Développement d'une Approche Alternative par Capture de Gènes dans une Bactérie Réceptrice. Thèse de Doctorat. Université Lyon 1. pp. 219
- Lucisine, P., 2015. Fonctionnement des sols contaminés. Université de Lorraine pp.298
- Lucy, M., Reed, E., Glick, B.R., 2004. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van leeuwenhoek* 86: 1-25.

Références bibliographiques

- Lugtenberg, B., Kamilova, F., 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of microbiology* 63: 541-556.
- Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.
- MADRP, 2006. Statistiques du Ministère de l'agriculture et du développement rural et de la pêche.
- Maillard, J., 2001. Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone aride: Risques et Recommandations. Handicap International.
- Mamane, A., 2015. Effets sanitaires aigus de l'exposition aux pesticides en milieu rural: étude dans un pays du nord: étude PhytoRiv: étude dans un pays du sud: PhytoNiger. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux pp. 236
- Mankau, R., Mankau, S., 1963. The role of mycophagous nematodes in the soil. I. The relationships of *Aphelenchus avenae* to phytopathogenic soil fungi. *Soil organisms*: 271-280.
- Marschner, P., Rengel, Z., 2007. *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems*. Springer Science & Business Media, pp.397
- Mathieu, C., Pieltain, F., Jeanroy, E., 2003. *Analyse chimique des sols: Méthodes choisies*. Tec & doc, pp.387
- MEDAMEC, M.A.C.V.P.L., 2015. MEDAMEC® 1.8 EC. Amman, Jordanie.
- Mendes, R., Garbeva, P., Raaijmakers, J.M., 2013. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS microbiology reviews* 37: 634-663.
- Merzoug, A., Haffari, F., 2017. Etudes bioécologique de l'entomofaune de deux espèces d'agrumes (Oranger et citronnier) dans la région de Mostaganem. Mémoire de Master. Université de Mostaganem. 138
- Miquel-Guennoc, C., 2017. Étude de l'interaction physique entre le champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* S238N et la bactérie auxiliaire de la mycorhization *Pseudomonas fluorescens* BBc6. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine pp.
- Monkiedje, A., Ilori, M.O., Spiteller, M., 2002. Soil quality changes resulting from the application of the fungicides mefenoxam and metalaxyl to a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1939-1948.
- Morel, R., 1996. *Les sols cultivés*. LAVOISIER / TEC ET DOC, Paris, 389 pp.
- Moule, C., 1982. *Les plantes sarclées*. La Maison Rustique, Paris.
- Multigner, L., 2005. Effets retardés des pesticides sur la santé humaine. *Environnement, risques & santé* 4: 187-194.
- Nagar, V., Sinha, V., Bandekar, J.R., 2015. Diverse Profiles of N-acyl Homoserine L-Lactones, Biofilm, Virulence Genes and Integrins in Food-Borne *Aeromonas* Isolates. *Journal of food science* 80: M1861-M1870.
- Nassar, A.M., 2009. Use of Somatic Embryogenesis in Potato (*Solanum tuberosum* L.) cv. Russet Burbank Improvement. McGill University pp.
- Nauen, R., Denholm, I., 2005. Resistance of insect pests to neonicotinoid insecticides: current status and future prospects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology: Published in Collaboration with the Entomological Society of America* 58: 200-215.
- Nikolyuk, V., 1969. Some aspects of the study of soil protozoa. *Acta Protozool* 7: 99-108.
- Nosek, J., Ambroz, Z., 1964. *Pedobiologia* 1: 222-240.
- PAN, U., 2007. Hazardous pesticides and health impacts in Africa. Food & fairness briefing 6.
- Pariona, A., 2017. Top Pesticide Using Countries. World Atlas.
- Pasteur, I., 1999. Produits phytosanitaires dans les eaux de pluie de la Région Nord. Pas-de-Calais, pp. 59.

Références bibliographiques

- Paul, E., Clark, F., 1996. Soil as a habitat for organisms and their reactions. *Soil Microbiology and Biochemistry*: 12-32.
- Pflieger, M., 2009. Etude de la dégradation photochimique des pesticides adsorbés à la surface de particules atmosphériques. Thèse de Doctorat. Université de Provence-Aix-Marseille I France pp.293
- Picek, T., Šimek, M., Šantrůčková, H., 2000. Microbial responses to fluctuation of soil aeration status and redox conditions. *Biology and Fertility of Soils* 31: 315-322.
- Pingali, P.L., Rola, A.C., 1995. Public regulatory roles in developing markets: The case of pesticides. pages 391-409 In: *Impact of pesticides on farmer health and the rice environment*. Springer.
- Pino-Otín, M.R., Ballesteros, D., Navarro, E., González-Coloma, A., Val, J., Mainar, A.M., 2019. Ecotoxicity of a novel biopesticide from *Artemisia absinthium* on non-target aquatic organisms. *Chemosphere* 216: 131-146.
- Pion, M., Spangenberg, J.E., Simon, A., Bindschedler, S., Flury, C., Chatelain, A., Bshary, R., Job, D., Junier, P., 2013. Bacterial farming by the fungus *Morchella crassipes*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280: 20132242.
- Prescott, L., Harley, J., Klein, D., Willey, J., Sherwood, L., Woolverton, C., 2003. *Microbiologie*. 2e éd. Bruxelles: De Boeck: 1139.
- Pugh, G., Williams, J., 1971. Effect of an organo-mercury fungicide on saprophytic fungi and on litter decomposition. *Transactions of the British Mycological Society* 57: 164-166.
- Puinean, A.M., Foster, S.P., Oliphant, L., Denholm, I., Field, L.M., Millar, N.S., Williamson, M.S., Bass, C., 2010. Amplification of a cytochrome P450 gene is associated with resistance to neonicotinoid insecticides in the aphid *Myzus persicae*. *PLOS genetics* 6: e1000999.
- Rabiet, M., Margoum, C., Gouy, V., Carluer, N., Coquery, M., 2010. Assessing pesticide concentrations and fluxes in the stream of a small vineyard catchment—effect of sampling frequency. *Environmental Pollution* 158: 737-748.
- Rakotonindraina, T.F., 2012. Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales sur les épidémies de mildiou de la pomme de terre. Adaptation du modèle SIPPOM (Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management) au pathosystème. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse France. pp.160
- RASTAK, C.H., MAARSEN, K.A., KOOLJMAN, S.A.L.M., 1996. Effects of Protozoa on carbon mineralization in activated sludge. *Water Research*. 30(1), 1-12.
- Roberts, P., Momol, M., Ritchie, L., Olson, S., Jones, J., Balogh, B., 2008. Evaluation of spray programs containing famoxadone plus cymoxanil, acibenzolar-S-methyl, and *Bacillus subtilis* compared to copper sprays for management of bacterial spot on tomato. *Crop Protection* 27: 1519-1526.
- Rocher, F., 2004. Lutte chimique contre les champignons pathogènes des plantes: évaluation de la systémie phloémienne de nouvelles molécules à effet fongicide et d'activateurs de réactions de défense. Thèse de Doctorat. Université de Poitiers pp.164
- Roesch, L.F., Fulthorpe, R.R., Riva, A., Casella, G., Hadwin, A.K., Kent, A.D., Daroub, S.H., Camargo, F.A., Farmerie, W.G., Triplett, E.W., 2007. Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. *The ISME journal* 1: 283.
- Ross, D., 1974. Influence of four pesticide formulations on microbial processes in a New Zealand pasture soil: II. Nitrogen mineralisation. *New Zealand journal of agricultural research* 17: 9-17.
- Rossiter, D.G., Bouma, J., 2018. A new look at soil phenofoms – Definition, identification, mapping. *Geoderma* 314: 113-121.

Références bibliographiques

- Rouland-Lefèvre, C., 2000. Symbiosis with fungi. pages 289-306 In: *Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology*. Springer.
- Rouland-Lefèvre, C., Bignell, D.E., 2001. Cultivation of symbiotic fungi by termites of the subfamily Macrotermitinae. pages 731-756 In: *Symbiosis*. Springer.
- Rouland-Lefèvre, C., Diouf, M.N., Brauman, A., Neyra, M., 2002. Phylogenetic relationships in Termitomyces (Family Agaricaceae) based on the nucleotide sequence of ITS: a first approach to elucidate the evolutionary history of the symbiosis between fungus-growing termites and their fungi. *Molecular phylogenetics and evolution* 22: 423-429.
- Rouland-Lefèvre, C., Inoue, T., Johjima, T., 2006. Termitomyces/termite interactions. pages 335-350 In: *Intestinal microorganisms of termites and other invertebrates*. Springer.
- Rousselle, P., Yvon, R., Crosnier, J.C., 1996. *La Pomme de terre*. INRA, Paris, 605 pp.
- Rekad, f.z., 2018. caractérisation phénotypique et génotypique d'isolats de Phytophthora infestans (Mont.) de Bary, agent causal du mildiou de la pomme de terre et de la tomate dans la région du nord-ouest d'Algérie. Thèse de Doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. 136 pp.
- Sánchez-Avila, J., Fernandez-Sanjuan, M., Vicente, J., & Lacorte, S. (2011). Development of a multi-residue method for the determination of organic micropollutants in water, sediment and mussels using gas chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1218(38), 6799-6811.
- Šantrůčková, H., Šimek, M., 1997. Effect of soil CO₂ concentration on microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils* 25: 269-273.
- Saoud, M., 2014. Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harach Alger. pp. 105
- Sauer, K., Camper, A.K., Ehrlich, G.D., Costerton, J.W., Davies, D.G., 2002. Pseudomonas aeruginosa displays multiple phenotypes during development as a biofilm. *Journal of bacteriology* 184: 1140-1154.
- Sauyer, R., 1972. La pomme de terre. *bulletins d'information technique de 1 à 19*. pp. 136
- Scherlach, K., Graupner, K., Hertweck, C., 2013. Molecular bacteria-fungi interactions: effects on environment, food, and medicine. *Annual review of microbiology* 67: 375-397.
- Schröder, M., Glinwood, R., Ignell, R., Krüger, K., 2017. The role of visual and olfactory plant cues in aphid behaviour and the development of non-persistent virus management strategies. *Arthropod-Plant Interactions* 11: 1-13.
- Schulz, B., Boyle, C., 2006. What are endophytes? pages 1-13 In: *Microbial root endophytes*. Springer.
- Sikorski, J., 2015. The prokaryotic biology of soil. *Soil organisms* 87: 1-28.
- Silva, A.X., Jander, G., Samaniego, H., Ramsey, J.S., Figueroa, C.C., 2012. Insecticide resistance mechanisms in the green peach aphid Myzus persicae (Hemiptera: Aphididae) I: a transcriptomic survey. *PLoS One* 7: e36366.
- Simpson, D.R., Weston, G.E., Turner, J.A., Jennings, P., Nicholson, P., 2001. Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. *European Journal of Plant Pathology* 107: 421-431.
- Sinclair, J.L., Ghiorse, W.C., 1987. Distribution of protozoa in subsurface sediments of a pristine groundwater study site in Oklahoma. *Appl. Environ. Microbiol.* 53: 1157-1163.
- Sinclair, J.L., Ghiorse, W.C., 1989. Distribution of aerobic bacteria, protozoa, algae, and fungi in deep subsurface sediments. *Geomicrobiology Journal* 7: 15-31.
- Singh, P., 1973. Effect of pesticides on blue-green algae. *Archiv für Mikrobiologie* 89: 317-320.

Références bibliographiques

- Smelt, J.H., Leistra, M., Houx, N.W., Dekker, A., 1978. Conversion rates of aldicarb and its oxidation products in soils. III. *Aldicarb. Pesticide Science* 9: 293-300.
- Smith, S.E., Read, D.J., 2010. Mycorrhizal symbiosis. Academic press, pp. 800
- Soltner, D., 1990. Les grandes productions végétales.
- Soltner, D., 1999. Les grandes productions végétales, 19ème éd. Sciences et techniques agricoles.
- Soltner, D., 2005. Les bases de production végétale. 24 e Edition. Tome I, paris.
- Soltner, R., 2000. Les bases de la production végétale: tome1 le sol et son amélioration. Coll. Sciences et techniques agricoles. Sainte-Gemmes-sur-Loire, USA.
- Sposito, G., 1989. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 277 pp.
- Stengel, P., Gelin, S., 1998. *Sol: Interface fragile*. INRA, Paris, 213 pp.
- Sturz, A., Christie, B., 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil and Tillage Research* 72: 107-123.
- Sukul, P., 2006. Enzymatic activities and microbial biomass in soil as influenced by metalaxyl residues. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 320-326.
- Sygenta, 2019. FOLIO GOLD. France.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N.S., Wijesundera, R., Ruiz, L.V., Vasco-Palacios, A.M., Thu, P.Q., Suija, A., 2014. Global diversity and geography of soil fungi. *Science* 346: 1256688.
- Tomlin, C., 1994. *The Pesticide Manual, British Crop Protection Council*. Surrey, UK 296.
- Tron, I., Piquet, O., Cohuet, S. 2001. Effets chroniques des pesticides sur la santé: état actuel des connaissances. Pp 90
- UIPP 2010. L'utilité des produits phytopharmaceutiques.
- Uroz, S., Buée, M., Murat, C., Frey-Klett, P., Martin, F., 2010. Pyrosequencing reveals a contrasted bacterial diversity between oak rhizosphere and surrounding soil. *Environmental Microbiology Reports* 2: 281-288.
- Van Der Heijden, M.G., Bardgett, R.D., Van Straalen, N.M., 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters* 11: 296-310.
- Van der Heijden, M.G., Klironomos, J.N., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A., Sanders, I.R., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69.
- Venketaraman, G., 1972. *Algal biofertilizers and rice cultivation*. Today and Tomorrow's Printers and Publishers New Delhi pp.75
- Vitousek, P.M., Howarth, R.W., 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry* 13: 87-115.
- Wainwright, M., 1978. A review of the effects of pesticides on microbial activity in soils. *Journal of Soil Science* 29: 287-298.
- Waksman, S.A., 1916. Bacterial numbers in soils, at different depths, and in different seasons. *Soil Science* 1: 363.
- Waksman, S.A., , 1916. Bacterial numbers in soils at different depths and in different seasons of the year. *Soil Science* 1: 363-380.
- Wang, F., Zhou, T., Zhu, L., Wang, X., Wang, J., Wang, J., Du, Z., Li, B., 2019. Effects of successive metalaxyl application on soil microorganisms and the residue dynamics. *Ecological Indicators* 103: 194-201.
- Wardle, D., 1992. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological reviews* 67: 321-358.

Références bibliographiques

- Wardle, D.A., Bardgett, R.D., Klironomos, J.N., Setälä, H., Van Der Putten, W.H., Wall, D.H., 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* 304: 1629-1633.
- Waters, C.M., Bassler, B.L., 2005. Quorum sensing: cell-to-cell communication in bacteria. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 21: 319-346.
- Weinert, N., Piceno, Y., Ding, G.-C., Meincke, R., Heuer, H., Berg, G., Schloter, M., Andersen, G., Smalla, K., 2011. PhyloChip hybridization uncovered an enormous bacterial diversity in the rhizosphere of different potato cultivars: many common and few cultivar-dependent taxa. *FEMS microbiology ecology* 75: 497-506.
- Wick, L.Y., Remer, R., Würz, B., Reichenbach, J., Braun, S., Schäfer, F., Harms, H., 2007. Effect of fungal hyphae on the access of bacteria to phenanthrene in soil. *Environmental science & technology* 41: 500-505.
- Yang, C., Hamel, C., Vujanovic, V., Gan, Y., 2011. Fungicide: modes of action and possible impact on nontarget microorganisms. *ISRN Ecology*. pp8
- Yang, Q., Arthurs, S., Lu, Z., Liang, Z., Mao, R., 2019. Use of horticultural mineral oils to control potato virus Y (PVY) and other non-persistent aphid-vectored viruses. *Crop Protection*. 97-103
- Yeoh, H., Bungay, H., Krieg, N., 1968. A microbial interaction involving combined mutualism and inhibition. *Canadian journal of microbiology* 14: 491-492.
- Zhang, C., Zhou, T., Zhu, L., Du, Z., Li, B., Wang, J., Wang, J., Sun, Y., 2019. Using enzyme activities and soil microbial diversity to understand the effects of fluoxastrobin on microorganisms in fluvo-aquic soil. *Science of The Total Environment* 666: 89-93.

Annexe 1

1. Préparation de l'extrait de sol (ES):

Pour la préparation de l'extrait de sol, nous avons opéré de la façon suivante: cinq kg de sol sec de la ferme expérimentale de l'université Abdelhamid Ibn Badis, prélevé dans l'horizon de surface et tamisé à 4-5 mm, sont autoclavés avec 7 litres d'eau déminéralisée à 120°C pendant 2 heures. Après décantation à température ambiante, la phase aqueuse est centrifugée 10 minutes à 7000 rpm. Le surnageant obtenu est filtré sur filtre Millipore 1,2 µm. Le pH final du milieu est de 7,4-7,5 (Dictor, 1994).

2. Préparation du milieu Extrait de Sol Agar (ESA) :

Le milieu ESA (Extrait de Sol Agar) est composé d'un litre de milieu ES additionné de 15 g.l⁻¹ d'agar (Dictor, 1994).

Pour le dénombrement des bactéries en Milieu ESA, après l'autoclavage à 120°C pendant 20 minutes et refroidissement jusqu'à 60°C, de l'amphotéricine B est ajoutée au milieu à raison de 0,05 g/l (Boudemagh, 2007)

Pour le dénombrement des champignons en milieu ESA, après l'autoclavage à 120°C pendant 20 minutes et refroidissement jusqu'à 60°C, le milieu est acidifié avec de l'acide citrique en poudre (250 mg/l). (Dictor, 1994).

Annexe 2

Tableau 1 : Normes des différents types des sols salins en fonction de leurs taux de conductivité (Maillard, 2001).

Classification	Valeur de la conductivité électrique (dS/m)
Non salins	0-2
Légèrement salins	2-4
Modérément salins	4-8
Fortement salins	8-16
Très fortement salins	>16