



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Agronomie



Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Système de Production Agro-Ecologique

**THESE PRESENTÉE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT LMD**

Présentée par

AMIRI Ouafaa

Thème

**Effets éco-toxicologiques des produits phytosanitaires à usage
agricole sur les sols dans le plateau de Mostaganem.**

Soutenue publiquement le 01/12/2022

Devant le jury :

Pr. Larid Mohamed	Président	Université de Mostaganem
Pr. Taibi Khaled	Examineur	Université de Tiaret
Dr. Ghelamallah Amine	Examineur	Université de Mostaganem
Pr. Nemmiche Saïd	Directeur de thèse	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2022-2023

Remerciements

Tous d'abord je remerçant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Je tiens à adresser mes profonds remerciements à Mr. Said Nemmiche pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Je tiens à remercier aussi Mr. Benkhalifa Mohamed, responsable de notre parcours de doctorat. Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à Mr. Larid Mohamed pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury d'évaluation de ma thèse.

Mes vifs et sincères remerciements vont aussi à Mr. Ghelamallah Amine, d'avoir eu l'amabilité d'accepter d'être membre de jury de ce travail et pour sa disponibilité et ses orientations.

J'adresse aussi mes vifs remerciements au Mr. Taibi Khaled, Professeur à l'université de Tiaret, pour l'honneur que vous m'avez fait d'accepter de juger ce travail et de ses précises remarques.

En fin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma très chère mère ainsi mon père qu'ils ont été à mes côtés dans les moments difficiles, sans les quels je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré et instruit que Dieu les gardes.

*Mes très chères sœurs : Hanane et Nour el Houda

*Mes très chers frères : Ameer, Ibrahim et M^{ed} Zouhir.

*Tous mes amis : Asma, Zohra, Hafida et Hanane

* Tous mes collègues : Mounir, Abedljalil, Idriss et Nabil

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Amiri Ouafaa

Résumé

Les pesticides sont utilisés en agriculture pour protéger les cultures contre les organismes nuisibles. Ils peuvent également avoir des effets nocifs sur l'environnement, y compris le sol. Ce travail vise à évaluer les effets de l'application des pesticides à dose standard et doubles dans des conditions de terrain sur les réponses morphologiques biochimique des plants de pomme de terre (*Solanum tuberosum L.*). Ainsi que leurs effets sur la croissance de la microflore du sol (bactéries et champignons) et les propriétés physiques et chimiques du sol. Nos résultats ont montré un effet significatif de l'application de pesticides sur les propriétés biochimiques et antioxydantes de la plante. Des teneurs plus élevés en composés phénoliques et de flavonoïdes ont été observés chez les plantes traitées avec des doses standard et doubles. L'accumulation de malondialdéhyde augmente la peroxydation lipidique en raison de la production excessive d'espèces réactives de l'oxygène. Une augmentation significative des activités de la catalase, de l'ascorbate peroxydase et de la phénylalanine a été enregistrée au stade final de croissance lorsque les plantes ont été traitées avec des doses recommandées et des doses doubles de pesticides par rapport au témoin, ainsi qu'une augmentation du niveau de proline au dernier stade de croissance sous l'application d'une double dose. En revanche, l'application des deux doses a entraîné une diminution de la quantité de chlorophylle et de caroténoïdes au premier stade de croissance et une diminution du taux de thiols aux deux stades de croissance. Les résultats obtenus ont montré que l'application des deux doses de pesticides conduisait à une réduction significative des densités bactériennes de l'ordre de 23% et 50% et de 56% et 91% pour les densités fongiques. Enfin, les résultats ont montré également que le traitement avec des pesticides à des doses élevées à celles recommandées provoquent des perturbations oxydatives chez les plants de pomme de terre et entraînent également une augmentation de la capacité des enzymes antioxydantes, ainsi qu'ils agissent sur la microflore du sol dont le dérèglement de son activité.

Mots clés : pesticides ; *Solanum tuberosum L.*; stress oxydatif ; activité biologique; microflore du sol.

Abstract

Pesticides are used in agriculture to protect crops against pests. They can also have harmful effects on the environment, including the soil. This work aims to evaluate the effects of standard and double dose pesticide application under field conditions on the biochemical morphological responses of potato plants (*Solanum tuberosum* L). As well as their effects on the growth of soil microflora (bacteria and fungi) and the physical and chemical properties of the soil. Our results showed a significant effect of pesticide application on the biochemical and antioxidant properties of the plant. Higher contents of phenolic compounds and flavonoids were observed in plants treated with standard and double doses. Malondialdehyde accumulation increases lipid peroxidation due to excessive production of reactive oxygen species. A significant increase in the activities of catalase, ascorbate peroxidase and phenylalanine were recorded at the final stage of growth when the plants were treated with recommended doses and double doses of pesticides compared to the control, as well as an increase in the level of proline in the final stage of growth under the application of a double dose. On the other hand, the application of the two doses led to a decrease in the quantity of chlorophyll and carotenoids for the initial stage of growth and a decrease in the rate of thiols for both stages of growth. The results obtained showed that the application of the two doses of pesticides led to a significant reduction in bacterial densities of around 23% and 50% and 56% and 91% for fungal densities. Finally, the results also showed that the treatment with pesticides for doses higher than those recommended cause oxidative disturbances in potato plants and also lead to an increase in the capacity of antioxidant enzymes, as well as they act on the soil microflora including the disruption of its activity.

Keywords: pesticides; *Solanum tuberosum* L; oxidative stress; biological activity; soil microflora.

المخلص

تستخدم المبيدات في الزراعة لحماية المحاصيل من الكائنات الحية الضارة، حيث يمكن أن يكون لها آثار جانبية على البيئة، بما في ذلك التربة. يهدف هذا العمل إلى تقييم آثار استعمال المبيدات بجرعات موصى بها وجرعات مزدوجة على الاستجابة المورفولوجية 'الكيميائية' و الحيوية لنباتات البطاطس وكذلك تأثيرها على نمو الكائنات الدقيقة في التربة (البكتيريا والفطريات) والخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة. أظهرت النتائج تأثيرًا هامًا لتطبيق هذه المبيدات على الخواص الكيميائية الحيوية ومضادات الأكسدة للنبات، حيث تم تسجيل مستويات عالية من مركبات الفينول والفلافونويد في النباتات المعالجة بالجرعات القياسية والمزدوجة في مرحلتي النمو. كما يزيد تراكم مالونديالديهيد من خلال أكسدة الدهون بسبب الإنتاج المفرط لأنواع التفاعلات الأوكسجينية. كما تم تسجيل زيادة هامة في أنشطة الكاتالاز ، أسكورات بيروكسيداز وفينيل ألانين في المرحلة النهائية من النمو عند النباتات المعالجة بجرعات موصى بها وجرعات مزدوجة من المبيدات مقارنة بالشاهد، وتزايد أيضا في مستوى البرولين في المرحلة الأخيرة من النمو في ظل تطبيق الجرعة المزدوجة. من جهة الأولى للنمو وانخفاض في أخرى أدى تطبيق كلتا الجرعتين إلى تخفيض كمية الكلوروفيل والكاروتينات في المرحلة في كلتا مرحلتي النمو. أبدت النتائج المتحصل عليها أن استعمال كلتا الجرعتين من المبيدات أدى إلى مستوى الثيول انخفاض كبير في الكثافة البكتيرية بنسبة 23% و 50% والفطرية بنسبة 56% و 91%. في الأخير أظهرت النتائج أن العلاج بالمبيدات بجرعات أعلى من الموصى بها تسببت في اضطرابات تأكسدية في نباتات البطاطس كما أدت إلى زيادة قدرة الإنزيمات المضادة للأكسدة وكذلك تأثيرها على الكائنات الحية الدقيقة لتربة البطاطس بما في ذلك تعطيل نشاطها.

الكلمات المفتاحية: المبيدات؛ البطاطس ؛ الأكسدة؛ النشاط البيولوجي؛ الكتلة الحية الدقيقة للتربة.

Table des matières

Synthèse bibliographique

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I: Le sol

I.1. Introduction.....	3
I.2. Constituants du sol	3
I .2.1. Phase solide du sol.....	3
I .2.2. Phase liquide du sol	3
I .2.3. Phase gazeuse du sol.....	3
I. 3. Types de sols	4
I. 3. 1. Sol sableux	4
I .3.2. Sol calcaire.....	4
I .3.3. Sol argileux	5
I.4. Qualité du sol et leurs fonctions	5
I.5. Propriétés du sol.....	7
I .5.1. Propriétés physico-chimiques.....	7
I .5.1.1. Texture	7
I .5.2.2. Structure.....	7
I .5.2.3. Porosité	8
I .5.2.4. Humidité	8
I .5.2.5. Température du sol	8
I .5.2.6. Conductivité électrique.....	8
I .5.2.7. Azote.....	9
I .5.2.8. Phosphore	9
I .5.2.9. Potassium.....	9
I .5.2.10. Matière organique du sol	10

I.6. Propriétés biologiques du sol	10
I.6.1. Les microorganismes du sol	11
I.6.2. Indicateurs biologiques	12
I.6.3. Rôle des communautés microbiennes du sol et leur fonctionnement ..	12
I.6.4. Méthodes de détermination de la communauté microbienne du sol	12
I.6.4.1. Quantification des communautés microbiennes	12
I.6.4.2. Estimation de la biomasse microbienne	12
II.1. Généralités sur les pesticides	14
II.1.1. Historique	14
II.1.2. Définition du pesticide	15
II.1.2.1 Classification des pesticides	15
II. 1.3. Mode d'entrée des pesticides	17
II. 1.3.1. Pesticides systémiques de contact	17
II. 1.3.2. Pesticides de contact non systémiques	17
II. 1.4. Formes et modalités d'utilisation des pesticides	18
II. 1.5. Principaux usages et rôle des pesticides	18
II. 1.6. Comportement des pesticides dans l'environnement	19
II. 1.6.1. Dégradation des pesticides	19
II. 1.6.2. Migration des pesticides	20
II. 1.7. Consommation des pesticides	22
II.2. Impact des pesticides sur l'environnement	24
II.2.1. Contamination du sol	24
II.2.2. Effets des pesticides sur les bio-indicateurs du sol	24
II.2.3. Micro-organismes du sol	24
II.2.4. Contamination de l'eau	25
II.2.5. Effets des pesticides sur les bio-indicateurs de l'eau	26
II.2.6. Contamination de l'air	27
II.2.7. Contamination des aliments	27
II.2.8. Exposition aux pesticides	27

II.2.9. Effet des pesticides sur la santé.....	28
II.2.9. 1.Intoxications aiguës.....	28
II.2.9. 2. Intoxication chronique.....	28
II.2.10. Effet des pesticides sur la plante.....	28
II .2.10.1.Absorption et persistance des pesticides par les plantes	29
II.2.10.2. Toxicité des pesticides chez les plantes	29
II.2.11. Le stress oxydant	30
II.2.11.1. Les défenses cellulaires contre le stress oxydant.....	31
II.2.11.2. Les antioxydants.....	31
II.2.12. Classification des antioxydants	31

Partie expérimentale

Chapire II: Matériels et méthodes

II. 1. Présentation du site d'étude	34
II.1. 1. Climat	34
II.1.2. L'irrigation.....	34
II.2. Matériel et produits utilisés.....	35
II.2.1. Matériel végétal	35
II.2.2. Description morphologique	35
II.2.2.1. Partie aérienne	35
II.2.2.2. Partie souterraine.....	35
II.2.3. Multiplication et cycle végétatif de la pomme de terre.....	35
II.2.4. Composition biochimique du tubercule	36
II.2.5. Les principales wilayas productrices de la pomme de terre en Algérie	37
II.2.6. Les principales variétés cultivées en Algérie	37
II.3. Méthodes et traitement utilisés.....	38
II.4. Mesure des paramètres de croissance	39
II.5. Analyses biochimiques	39
II.5.1. Détermination de la teneur en chlorophylle	39

II.5.2. Détermination des métabolites secondaires	39
II.5.3. Détermination de l'activité enzymatique antioxydants	41
II.5.4. Détermination de l'activité de piégeage des radicaux FRAP et DPPH	42
II.5.5. Détermination de la teneur en malondialdéhyde (MDA).....	42
II.5.6. Détermination de la teneur en peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂).....	42
II.5.7. Détermination de la teneur en antioxydant non enzymatique.....	43
II.6. Analyses physiques et chimiques du sol	43
II.6.1 Répartition granulométrique	43
II.6.2 Caractéristiques chimiques des échantillons de sol	43
II.6.3. Teneur totale en carbone organique, azote total et matière organique	44
II.6.4. Teneur en éléments nutritifs dans les échantillons de sol	44
II.7. Analyses microbiologiques	44
II.7.1. Préparation des suspensions-dilutions.....	44
II.7.2. Dénombrement de la microflore totale.....	44
II.7.2.1. Dénombrement en milieu liquide	44
II.7.2.2. Dénombrement des bactéries sur milieu solide.....	45
II.7.2.3. Dénombrement des champignons	45
II.7.2.4. Détermination de la biomasse microbienne	45
II.8. Analyses statistiques.....	46

CHAPITE III: Résultats et discussion

III.1. Analyses biochimiques.....	47
III.1. 1.Effet des pesticides sur les paramètres de croissance	47
III.1.2. Effet de l'application de pesticides sur la teneur en pigments photosynthétiques.....	48
III.1.3. Effet de l'application de pesticides sur les teneurs totales en flavonoïdes et en phénols	49

III.1.4. Effet de l'application de pesticides sur l'activité enzymatique antioxydante	50
III.1.5. Effet de l'application de pesticides sur les capacités antioxydantes de la pomme de terre.....	50
III.1.6. Effet de l'application de pesticides sur la teneur en malondialdéhyde (MDA), peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂), proline et thiols totaux.....	51
III.1.7. Discussion	52
III.2. Caractérisation physico-chimique des sols	58
III.3.1. La densité bactérienne	61
III.3.2. La densité fongique.....	61
III.3.3. La biomasse microbienne et la microflore totale.....	62
III.3.4. Discussion	62
III.4. L'enquête réalisée auprès des agriculteurs de la wilaya de Mostaganem.....	67
III.4.1. Durée d'exercice et d'utilisation des pesticides.....	67
III.4.2. Différents types de traitements utilisés	67
III.4.3. Les différents produits agricoles cultivés et traités avec les pesticides.....	68
III.4.4. Toxicité des pesticides pour les agriculteurs, consommateurs et différents compartiments de l'environnement	68
III.4.5. Etat sanitaire.....	69
III.4.6. Niveau de connaissance sur les pesticides	69
III.4.7. Connaissance du danger de l'utilisation des pesticides	69
III.4.8. Equipements de protection.....	70
III.4.9. Discussion	70
Conclusion.....	72
Références bibliographiques	73
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau 1: Estimation du nombre d'espèces de végétaux et d'organismes du sol organisé en fonction de la largeur de leur corps.	11
Tableau 2: Historique de l'évolution des trois plus grandes classes de pesticides des années 1900 jusqu'à 2000	14
Tableau 3: Evolution des superficies et les productions de la culture de pomme de terre en Algérie entre 2008 et 2018.	38
Tableau 4 : Traitements pesticides de la pomme de terre utilisés dans les conditions de terrain	39
Tableau 5: Effets des différentes doses de pesticides sur les paramètres de croissance.....	40
Tableau 6 : Effets des différentes doses de pesticides sur le nombre de tubercules/plant et le rendement total/plant (kg) et le rendement total/hectare (t/ha) de pomme de terre.	48
Tableau 7 : Effets des pesticides sur les teneurs en chlorophylle a, b, caroténoïdes et chlorophylle totale, teneurs en composés phénoliques et sucres solubles des plants de pomme de terre.....	49
Tableau 8 : Effets des pesticides sur les enzymes antioxydantes des plants de pomme de terre.....	50
Tableau 9: Capacité de piégeage des radicaux libres des plants de pomme de terre par les tests DPPH et FRAP.....	51
Tableau 10 : Effets de l'application de pesticides sur la teneur en malondialdéhyde (MDA), le niveau de peroxyde d'hydrogène, la teneur en proline et en thiols totaux des plants de pomme de terre.....	52
Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques des sols étudiés.....	60

Liste des figures

Figure 1 : Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants.....	4
Figure 2 : Évaluation des contributions des fonctions du sol aux services écosystémiques.....	6
Figure3 : Schéma synthétique des mécanismes influençant la dynamique des pesticides dans l'environnement.	20
Figure 4 : Voies mécanistiques de la toxicité des pesticides dans le sol et la plante	25
Figure 5 : Stress chimiques causés par des xénobiotiques (exemple de l'herbicide glyphosate) sur les organismes cibles et non cibles	30
Figure 6 : Interactions entre la pollution, le stress oxydant et les mitochondries.	31
Figure 7 : Rôle de la SOD, de la catalase et de la GPx dans l'élimination des ROS.....	32
Figure 8 : Représentation graphique de la composition biochimique moyenne du tubercule de pomme de terre (<i>Solanumtuberosum</i> L.). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la matière fraîche totale.	37
Figure 9 : Effet de différentes doses de pesticides sur la densité bactérienne.	61
Figure 10 : Effet de différentes doses de pesticides sur la densité fongique.....	61
Figure 11 : Effet de différentes doses de pesticides sur la microflore totale.	62
Figure12 : Effet de différentes doses de pesticides sur la biomasse microbienne.	62
Figure 13 : Durée d'exercice et d'utilisation des pesticides.....	67
Figure 14 : Le pourcentage des pesticides les plus utilisés par les agriculteurs de la wilaya de Mostaganem	67
Figure 15 : Produits agricole cultivés avec utilisation de pesticides	68
Figure 16 : Toxicité des pesticides	68
Figure 17: Signes d'intoxication des pesticides	69
Figure 18 : Précaution lors de l'utilisation des pesticides	70

Introduction

Le développement de l'agriculture pour faire face aux besoins alimentaires et nutritionnels des populations sans cesse en croissance a induit l'utilisation de plus en plus croissante de produits phytosanitaires à usage agricole (pesticides) et des produits fertilisants. Les cultures maraîchères intensives, arboricoles, horticoles et viticoles sont très sensibles aux insectes et attaques fongiques ; ces cultures sont plus dépendantes aux pesticides chimiques que les grandes cultures. La lutte chimique par l'utilisation de pesticides est la méthode la plus utilisée, elle est favorisée par la disponibilité de molécules chimiques efficaces contre divers ennemis des cultures et la facilité d'utilisation et d'application des produits pesticides dans le contrôle phytosanitaire des cultures.

Les pesticides sont parmi les polluants les plus dangereux de l'environnement à cause de leurs mobilités. Leur devenir dans le sol, eau et air est inquiétant mais le sol reste un compartiment réservoir le plus important à cause des grandes quantités de pesticides appliqués lors du traitement des cultures. Ils affectent également la diversité biologique ainsi que la perte d'habitat et le changement climatique. Ils ont aussi des impacts toxiques à court terme sur les organismes qui y sont directement exposés, ou des impacts à long terme qu'ils peuvent entraîner sur les changements dans le biotope et la chaîne alimentaire. Leur application peut également entraîner une démolition de la microfaune et de la flore du sol. Ils peuvent persister sous forme de résidus et infiltrer les nappes et les eaux souterraines, source d'approvisionnement en eau potable. Ainsi, ils résultent des impacts sur l'environnement et la santé humaine. Cependant, l'utilisation intensive de pesticides peut entraîner une toxicité pour les plantes qui peut nuire au métabolisme de la plante et leur croissance et peuvent persister dans les parties de la plante sous forme de résidus de pesticides. Cette toxicité peut générer des espèces réactives de l'oxygène (ERO) responsables des dommages cellulaires, ainsi que le dysfonctionnement des activités biochimiques et physiologiques. En réponse au stress oxydatif, la plante active un système de défense antioxydant composé à la fois de composants enzymatiques et non enzymatiques.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'étude de l'effet de l'utilisation des pesticides sur les réponses éco-physiologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) variété « Sylvana ».

La pomme de terre est une culture vivrière de base, stratégique, la plus importante au monde, qui fournit de l'énergie et certains ingrédients nutritionnellement pertinents. La valeur

nutritionnelle des tubercules de pomme de terre est principalement caractérisée par la présence d'acides aminés essentiels (en particulier la lysine), des teneurs élevées en amidon et fibres alimentaires ainsi qu'une faible concentration de graisses.

L'objectif de notre travail est de mieux comprendre la réponse des plantes de pomme de terre au stress induit par différents doses de pesticides ainsi que leurs effets sur la croissance de la microflore du sol (bactéries et champignons). Ainsi, l'effet de ces différentes doses de pesticides sera analysé à différents niveaux :

- L'effet du pesticides sur les paramètres biométriques (nombre des tiges/ plante, hauteur de la plante (cm), nombre des tubercules par plante, rendement total/plante (Kg), rendement total/ hectare (tonne), les pigments (chlorophylle a, b, totale et caroténoïdes).
- L'effet sur le métabolisme oxydant (les paramètres du stress oxydant)
- Les réponses antioxydantes enzymatiques (CAT, APX, PAL) et non-enzymatiques (proline, les thiols), les métabolites secondaires (flavonoïdes et polyphénols), le potentiel antioxydant (FRAP, DPPH).
- L'effet sur le développement des propriétés microbiologiques (bactéries, champignons, biomasse microbienne, microflore du sol).

Ce manuscrit de thèse est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre de ce travail résume les données bibliographiques sur les pesticides d'une façon générale et leur effets éco-toxicologiques sur les différents compartiments de l'environnement et sur la santé. Le deuxième chapitre sera consacré aux matériels et méthodes et le troisième chapitre aux résultats et discussions. Enfin, une discussion générale des résultats assortie par une conclusion générale avec des perspectives.

Synthèse bibliographique

Chapitre I

Le sol

I.1. Introduction

Le sol fournit de multiples services éco-systémiques tels que la nourriture, l'eau, le bois, et des services de régulation qui affectent le climat, les inondations, les maladies, les déchets et la qualité de l'eau. Le sol est le support des êtres vivants qui permet de préserver une biodiversité très élevée. Le sol est ainsi essentiel pour l'homme et son environnement et il est considéré comme une ressource non renouvelable.

I.2. Constituants du sol

Le sol est considéré comme un milieu poreux triphasique rempli partiellement d'eau (phase liquide) et d'air, ou de vapeur d'eau (phase gazeuse) et la phase solide est constituée des particules minérales agrégées de différentes tailles. C'est un milieu poreux dont la phase solide constituée par des minéraux et des composés organiques qui donnent au sol sa structure.

I.2.1. Phase solide du sol

Cette phase est constituée de 90% des composants inorganiques. Dans l'aspect minéralogique, ces constituants sont répartis en des minéraux primaires (quartz, feldspath...) et secondaires (kaolinite, goethite...). La matière organique représente plus de 50 % des sols tourbes. Cette matière organique joue un rôle crucial d'un point de vue biologique comme une source d'énergie pour les organismes vivants, chimique (sorption, complexations, adsorption de cations...) et physique (stabilité du sol) (Sposito, 1989).

I.2.2. Phase liquide du sol

La phase liquide du sol est constituée par l'eau « solution du sol ». Sa composition et sa mobilité varie selon la présence des ions minéraux et des molécules organiques, ainsi elle dépend du milieu géologique avec lequel elle est en contact. La teneur en eau d'un sol subit des changements en fonction des précipitations, de l'évapotranspiration et des remontées capillaires (Gobat *et al.*, 2010).

I.2.3. Phase gazeuse du sol

La phase gazeuse occupe les pores du sol, conditionnée par plusieurs phénomènes particulièrement les échanges des gazes avec l'atmosphère par la volatilisation et à la dissolution, la respiration des organismes vivants, et les échanges de gazes avec la solution du sol. L'atmosphère du sol contient deux gaz à l'état libre ou dissous : l'oxygène qui détermine la respiration des racines et des organismes et qui intervient dans des réactions d'oxydation, et le dioxyde de carbone qui est très important aux organismes autotrophes pour leur synthèse

organique (Chamayou and Legros., 1989). Les organismes vivants du sol peuvent représenter une partie de la phase solide, puisqu'ils ne sont ni gazeux ni liquides (Calvet, 2000).

Les sols bien aérés contiennent de 180 à 205 ml d'O₂ par litre d'air et il peut diminuer jusqu'à 100 ml dans les sols inondés et au tour des racines des plantes. La teneur du CO₂ en général est incluse entre 3 et 30 ml par litre de sol et peut s'élever jusqu'à 100 ml par litre d'air en profondeur et en milieu saturé en eau. Dans des conditions d'anaérobiose, les microorganismes produisent des gaz comme NO, N₂O, NH₃, CH₄ et H₂S (Sposito, 1989). Ces gaz existent dans les sols, soit à l'état libre, soit dissous dans la solution des sols.

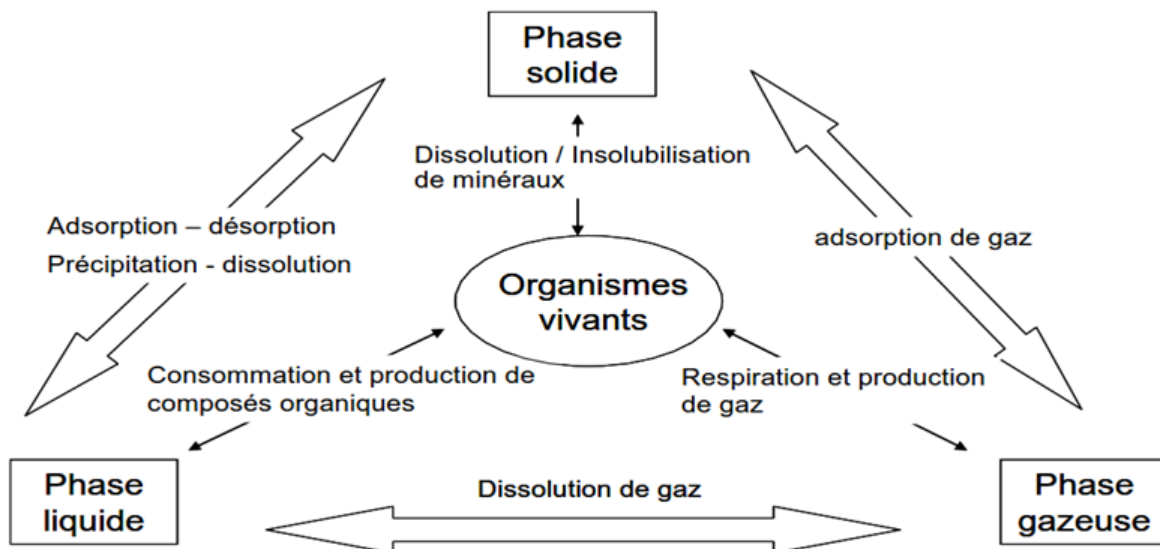


Figure 1 : Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants (Calvet, 2003).

I. 3. Types de sols

I. 3. 1. Sol sableux

Les sols sableux sont caractérisés par une faible capacité de fixation des éléments chimiques, ce qui les rend sensibles à l'acidification ainsi qu'aux propriétés d'infiltration rapide qui peut causer des risques de pollution des nappes en profondeur.

I. 3.2. Sol calcaire

Il est moins sensible à l'acidification avec un pouvoir tampon élevé. En fonction de leur granulométrie argilo-limoneuse à argileuse, et de leur structuration généralement de qualité, ils sont perméables et les risques de pollution des nappes sont à contrôler (Gobat et al., 2010).

I.3.3. Sol argileux

Les sols argileux comprennent les limons (silts) et les argiles qui sont par définition des sols à grains fins dont plus de 50 % de leur poids sec, et constitué de particules inférieures à 0,075 mm. Leur consistance peut varier de très molle à dure. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau élevées, ce qui les rend compressibles, indépendamment de leur consistance (Gobat *et al.*, 2010).

I.4. Qualité du sol et leurs fonctions

La qualité du sol est la capacité de favoriser la productivité et la santé des plantes et des animaux, d'augmenter la qualité de l'eau et de l'air (Doran and Zeiss, 2000). Généralement les indicateurs de santé des sols peuvent être classés comme physiques, chimiques ou biologiques (Bünemann *et al.*, 2018). Au total, le test de la santé du sol comprend actuellement la quantification traditionnelle de la matière organique du sol, du pH, du phosphore et du potassium assimilables par les plantes, et le stockage de l'eau ainsi que la densité apparente (Bünemann *et al.*, 2018) . D'autres tests recommandent également des mesures de respiration du sol, de la biomasse microbienne ou de la minéralisation de l'azote pour caractériser les propriétés biologiques, ainsi que la stabilité structurelle (Bünemann *et al.*, 2018).

L'objectif de la qualité des sols est basé sur la multi fonctionnalité et la résilience des sols ainsi que les services éco- systémiques qu'ils fournissent (Bünemann *et al.*, 2018). Les fonctions des sols sont fortement liées à la qualité des sols, qui a été définie par un groupe de travail de l'American Soil Science Society en 1995 comme "la capacité d'un type spécifique de sol à fonctionner dans les limites d'un écosystème naturel ou géré..." (Karlen *et al.*, 1997), en soulignant la multifonctionnalité des sols et leurs propriétés chimiques, physiques et biologiques.

Ecosystème du sol

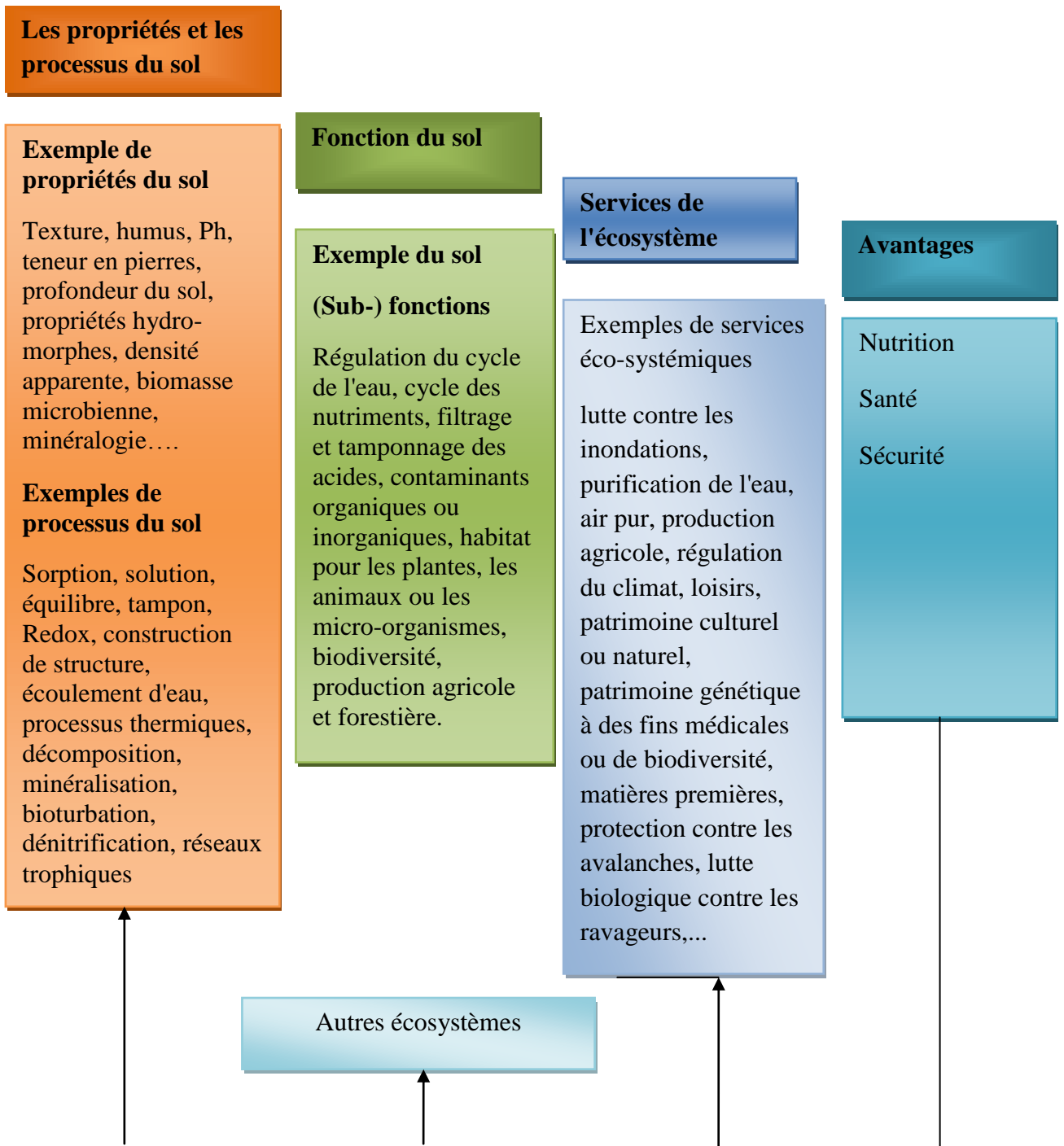


Figure 2 : Évaluation des contributions des fonctions du sol aux services écosystémiques à l'aide du cadre en cascade développé par Haines-Young and Potschin (2008).

I .5. Propriétés du sol

Le type de sol et ses propriétés a une grande importance en agriculture ([Ahire et al., 2013](#)). Les caractéristiques physico-chimiques des différents sols varient dans l'espace et dans le temps en raison de la variation de la topographie, du climat, des processus d'altération physique, de la couverture végétale, des activités microbiennes et de plusieurs autres variables biotiques et abiotiques ([Paudel and Sah, 2003](#)).

La productivité alimentaire et la qualité de l'environnement dépendent des propriétés physico-chimiques du sol, il est donc très important de connaître les connaissances de base sur les propriétés physico-chimiques du sol ([Tale and Ingole, 2015](#)).

I .5.1. Propriétés physico-chimiques

I .5.1.1. Texture

Les différentes proportions des différentes tailles de particules d'un sol déterminent sa texture. Elle est donc définie par une analyse de la distribution de taille des particules par différentes méthodes représentatives tel que La granulométrie. Les particules du sol influencent la relation sol-eau, l'aération et la pénétration des racines, ainsi que la densité et la porosité du sol ([Tale and Ingole, 2015](#)). D'après le triangle texturale, on peut séparer les particules de sol en trois différentes classes : sable, limon et argile ([Annexe 1](#)).

La taille des particules a également un effet sur le statut nutritionnel du sol, elle peut être aussi exprimée de manière significative par sa conductivité électrique ([Kekane et al., 2015](#)). Les sols sableux sont des sols légers ayant une faible concentration en éléments nutritifs, une faible capacité à retenir l'humidité, une faible capacité d'échange cationique et un faible pouvoir tampon, et une perméabilité rapide, ainsi qu'ils contiennent peu de matière organique ([Patnaik et al., 2013](#)).

I .5.2.2. Structure

La structure du sol est une propriété principale du sol car elle régule la teneur en eau du sol, l'aération et la température des sols ([Neira et al., 2015](#)). Elle influence également la germination des plantes et la croissance des racines. Par conséquent, l'évaluation de la structure du sol est importante pour déterminer la qualité du sol ([Ball and Munkholm, 2015](#)). La structure du sol comprend l'habitat physique des organismes vivants du sol, et elle contrôle de nombreuses fonctions physiques, chimiques et biologiques importantes du sol et des services écosystémiques associés. L'agrégation du sol est responsable de la structure du sol et

leur fonctionnement ainsi que pour la productivité agricole. Sa stabilisation est influencée par des facteurs internes et externes, et par leurs interactions (Jozefaciuk and Czachor, 2014 ; Šimanský and Bajčan, 2014).

I .5.2.3. Porosité

L'espace poreux ou la porosité du sol est le volume des pores total du sol. La porosité influence les différentes propriétés du sol, y compris l'abondance microbienne et la croissance des plantes (Krishnakumar *et al.*, 2014). C'est une propriété importante au sol puisque elle influence les processus de la zone racinaire tels que la respiration et l'absorption d'eau (Hillel, 2004). La porosité totale a été considérée comme une taille globale du système de pores de micro-, méso- et macroporosité (Hardie *et al.*, 2013). Les sols avec une bonne structure sont caractérisés par une augmentation des macro-agrégats et de porosité (Shah *et al.*, 2017).

I .5.2.4. Humidité

L'humidité est une des propriétés physiques les plus importantes du sol. L'absorption des nutriments dépend de l'humidité du sol. La teneur en eau du sol est également très liée à sa texture et à sa structure. L'humidité du sol dépend du taux de vide, de la taille des particules, des minéraux argileux, de la matière organique et de l'état des eaux souterraines (Yennawar *et al.*, 2013).

I .5.2.5. Température du sol

La température du sol est une propriété importante car elle influence les processus chimiques, physiques et biologiques associés à la croissance des plantes. La température du sol fluctue en fonction de la saison, de l'heure de la journée et des conditions climatiques locales. La principale source de chaleur est le soleil et la chaleur générée par l'activité chimique et biologique du sol (Jain *et al.*, 2014). Une augmentation de la température du sol accélère les réactions chimiques, diminue la solubilité des gaz et le pH du sol (Nayana and Malode, 2012). Elle joue ainsi un rôle important dans la germination des graines. Le changement de température aura un effet sur la croissance de la biomasse et l'activité des microorganismes (Naranjo *et al.*, 2004). La température du sol se situe entre -20 et 60 °C.

I .5.2.6. Conductivité électrique

La conductivité électrique est utilisée pour estimer la concentration de sels solubles dans le sol et elle est utilisée comme mesure de la salinité (Wagh *et al.*, 2013). La

conductivité électrique des sols varie en fonction de la quantité d'humidité retenue par les particules du sol. C'est une mesure des ions présents dans la solution (Tale and Ingole, 2015).

I .5.2.7. Azote

L'azote est un des éléments fertilisants le plus important. Il favorise la croissance de la végétation aérienne et donne une couleur verte intense aux feuilles. Les racines des plantes absorbent l'azote sous forme de NO_3 et de NH_4 (Sumithra *et al.*, 2013). Il est nécessaire à la croissance des plantes ainsi qu'il est un constituant de la chlorophylle, des protéines végétales et des acides nucléiques (Jain *et al.*, 2014). La valeur inférieure de l'azote total dans les parcelles biologiques pourrait être le résultat de l'absorption par la culture, de l'immobilisation par les micro-organismes et de la perte par volatilisation (Defoer *et al.*, 2000). L'azote joue un rôle aussi bien bénéfique que néfaste au sol. L'acidification du sol est le principal problème auquel sont confrontés les agriculteurs en raison de l'utilisation excessive d'engrais azotés inorganiques en agriculture.

I .5.2.8. Phosphore

Le phosphore est le plus souvent un nutriment limitant resté présent dans les noyaux des plantes et agit comme un stockage d'énergie. C'est aussi un élément essentiel du processus de photosynthèse, impliqué dans la formation de toutes les huiles, sucres, amidons, etc (Singh and Rathore, 2013). La plupart des activités de la plante telles que la croissance, la respiration et la reproduction dépendent des niveaux de phosphore du sol dans lequel la plante pousse (Wangh *et al.*, 2013). Les sols à des teneurs élevées en matière organique ont de meilleures réserves de phosphate organique pour l'absorption par les plantes que les sols à faible teneur en matière organique (Miller and Donaheur, 2001). Une disponibilité adéquate de phosphore pour les plantes stimule la croissance précoce des plantes et accélère la maturité (Solanki and Chavda, 2012).

I .5.2.9. Potassium

Le potassium joue un rôle important dans différents processus physiologiques des plantes, de la synthèse des protéines au maintien de l'équilibre hydrique des plantes (Sumithra *et al.*, 2013). Le potassium se trouve sous sa forme minérale et affecte la division des cellules des plantes, la formation des glucides, la translocation du sucre, l'action de diverses enzymes et la résistance à certaines maladies végétales (Jain *et al.*, 2014). Elle diminue avec l'augmentation de la profondeur du sol (Campbell and Rouss, 1961). La perte d'eau des plantes est contrôlée par le potassium et joue un rôle important dans l'amélioration de la

croissance des plantes. Un sol avec une forte teneur en matière organique et/ou d'argile joue un rôle tampon plus efficace face aux pollutions et fournit une meilleure protection pour les microorganismes (Kuan *et al.*, 2006; Gregory *et al.*, 2009). Les propriétés physico-chimiques d'un sol peuvent modifier l'effet d'une perturbation sur la stabilité fonctionnelle et/ou structurale des communautés microbiennes et entraîner des impacts de confusion chez les auteurs quant à l'effet réel du nombre d'espèces.

L'escalade des contraintes sur les sols dus à la dégradation des terres et à la variabilité climatique sont corrélés à la perte de diversité et d'abondance microbienne ou à la dynamique de la biomasse (Singh and Gupta, 2018). D'autres facteurs liés aux changements climatiques comme l'augmentation de la température et la concentration en CO₂, la modification du régime hydrique sont aussi associés à des changements importants de la diversité et de la composition des communautés microbiennes (Bérard *et al.*, 2011; Guenet *et al.*, 2012).

I .5.2.10. Matière organique du sol

La matière organique est une propriété importante du sol. La présence d'une teneur plus élevée en matière organique dans le sol peut être une autre raison possible de l'abaissement du pH. Elle fournit des éléments nutritifs essentiels et possède une forte capacité à retenir l'eau et à absorber les cations (Amos-Tautua *et al.*, 2014). La matière organique du sol (MOS) joue un rôle important dans le contrôle de la qualité et de la résilience du sol puisque elle joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés du sol, notamment le pouvoir tampon, la biodiversité microbienne, la rétention d'eau et la stabilisation structurelle (Šimanský *et al.*, 2013 ; Šimanský and Polláková, 2016). La matière organique peut être ajoutée dans le sol sous forme de fumier animal, de compost, etc (Kekane *et al.*, 2015).

I .6. Propriétés biologiques du sol

Les propriétés biologiques et biochimiques du sol ont acquis une importance dans l'évaluation de la durabilité des écosystèmes (Singh *et al.*, 2015 ; Xue and Huang, 2013). Les processus comme la décomposition de la matière organique, le cycle des nutriments et le flux d'énergie dans les cycles biogéochimiques ont un potentiel d'implication dans le développement durable (Fernández *et al.*, 2009) et un rôle important des microorganismes du sol (Xue and Huang, 2013; Araújo *et al.*, 2016). Les micro-organismes du sol qui prolifèrent, les racines des plantes et la faune du sol sont responsables de la libération active de l'azote, tandis que les








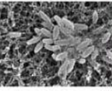
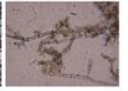
microbes morts et l'excrétion des cellules des racines sont impliqués dans leur libération passive (Torri *et al.*, 2014). L'activité enzymatique du sol revêt une importance particulière dans l'évaluation des propriétés biologiques du sol. Des paramètres clés de la fertilité sont utilisées comme des indicateurs de nombreux processus biologiques du sol (Araújo *et al.*, 2015) car la plupart des processus du sol dépendent de l'activité enzymatique du sol.

I.6.1. Les microorganismes du sol

Le sol représente l'un des écosystèmes les plus diversifiés sur notre planète. L'habitat des micro-organismes, leur activité et leurs interactions avec d'autres sont interdépendants et peuvent varier sur une petite distance. Les micro-organismes les plus importants du sol sont : les bactéries, les champignons, les algues, les protozoaires et les nématodes, car leur métabolisme est associé au flux d'énergie et à la circulation des éléments dans les écosystèmes (Cycoń and Piotrowska-Seget, 2016) (Tableau 1).

Ils sont des indicateurs essentiels de la qualité du sol et de sa santé à cause de leur réaction immédiate aux intempéries naturelles ou anthropiques.. L'analyse de la distribution des micro-organismes dans le sol est un facteur déterminant des conditions de développement et de la productivité des cultures (Hu *et al.*, 2014).

Tableau 1: Estimation du nombre d'espèces de végétaux et d'organismes du sol organisé en fonction de la largeur de leur corps (modifié à partir de Barrios, 2007)

Size	Group	Know species	Estimated total species	% Know
Vascular plants		270.000	300.000	90
Macrofauna				
0.5 - 50 mm	 Ants	8800	15.000	58,7
	 Termites	1600	3000	53,3
	 Earthworms	3600	No estimate	No estimate
Mesofauna				
0.08 - 2 mm	 Mites	20.000 – 30.000	900.000	2,2 – 3,3
	 Collembola	6500	24.000	27,1
Microfauna				
5 - 120 µm	 Protozoa	1500	200.000	7,5
	 Nematodes	5000	400.000	1,3
Microflora				
1 - 100 µm	 Bacteria	13000	1.000.000	1
	 Fungi	18.000 – 35.000	1.500.000	1 – 2

I.6.2. Indicateurs biologiques

L'indice biologique de la fertilité du sol peut être déterminé par des mesures enzymatiques du sol (Singh *et al.*, 2011b). Des niveaux élevés de la matière organique et de nutriments disponibles dans les amendements organiques conduisent à une activité microbienne du sol (Bettiol and Ghini, 2011).

I.6.3. Rôle des communautés microbiennes du sol et leur fonctionnement

Les communautés microbiennes du sol participent activement aux services de soutien du sol, ainsi que leur rôle dans les cycles biogéochimiques d'éléments majeurs tels que le carbone, le phosphore, le soufre et l'azote. Ils ont aussi différentes fonctions telles que la décomposition de la matière organique (Baumann *et al.*, 2012), la nitrification et la dénitrification (Attard *et al.*, 2011; Philippot *et al.*, 2013). Les microorganismes telluriques interviennent aussi dans la dégradation et l'immobilisation de polluants (ETM, pesticides...) apportés en milieu agricole ou industriel. Certains microorganismes ont également un impact important sur la santé et la croissance des plantes en réalisant des symbioses (Barrios, 2007) ou provoquant des maladies. D'autres sont impliqués dans la formation et la stabilité des agrégats du sol par l'établissement des liaisons physiques réalisées par les hyphes des champignons (Le Guillou *et al.*, 2012).

I.6.4. Méthodes de détermination de la communauté microbienne du sol

I.6.4.1. Quantification des communautés microbiennes

L'analyse de l'abondance ou de la biomasse microbienne est une mesure utilisée en écologie microbienne. Elle est reconnue pour être un indicateur important du fonctionnement biologique des sols (Gonzales-Quiñones *et al.*, 2011). La biomasse microbienne est également une information essentielle dans la modélisation des processus biologiques liés aux cycles du carbone et de l'azote puisqu'elle est fortement liée à l'intensité des flux (respiration du sol, minéralisation de l'azote) (Colman and Schimel, 2013).

I.6.4.2. Estimation de la biomasse microbienne

Le terme « biomasse microbienne » a été initialement proposé par Jenkinson (1966) et fait référence à la fraction vivante de la matière organique, considérant l'ensemble des microorganismes du sol. La biomasse de la communauté microbienne du sol est largement considérée comme un indice de la fertilité et la productivité des écosystèmes. Les premières méthodes permettant l'analyse de la biomasse microbienne se sont basées sur la quantification

du carbone d'origine microbien provenant du sol (Martens, 1995). Parmi celles-ci, la méthode d'extraction-fumigation est la plus utilisée en écologie microbienne du sol. Cette méthode, développée par Vance *et al.* (1987) consiste à détruire les microorganismes du sol par fumigation au chloroforme, libérant ainsi leurs composés organiques sous forme soluble.

Chapitre II

Les pesticides

II.1. Généralités sur les pesticides

II.1.1. Historique

Selon [Calvet et al. \(2005\)](#), l'utilisation des pesticides en agriculture est dès l'antiquité, alors que depuis la fin du XVIIe siècle Homère indique l'emploi du soufre ainsi que l'arsenic comme insecticide. Lorsque des graves épidémies avaient apparus durant des XIXe et XXe des propriétés biocides de plusieurs produits chimiques ont donnant lieu aux développements des techniques de protection des plantes. Dès lors, les traitements insecticides, fongicides et herbicides apparaissent. En Europe en 1845, l'apparition du mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) qui fut à l'origine d'une famine dramatique en Irlande, et de plusieurs invasions fongiques sur les céréales et la vigne agissant largement à ces progrès. Les pesticides les plus utilisés au cours du XIXe siècle sont les fongicides à base de sulfate de cuivre, notamment la fameuse bouillie bordelaise (mélange de sulfate de cuivre et de chaux) proposée par Millardet (1838-1902) et utilisée en 1885. L'arséniate de plomb fut utilisé en Algérie en 1888 en tant qu'insecticide pour lutter contre une maladie de la vigne. Le tableau 1 résume les différentes étapes des découvertes des pesticides qui commencent avant 1900 jusqu'à nos jours.

Tableau 2: Historique de l'évolution des trois plus grandes classes de pesticides des années 1900 jusqu'à 2000 ([Batsch, 2011](#))

Évolution 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 ●	Pyréthriinoïdes ● Benzoyl-urées (régulateurs de croissance) ●
1980 - 1990	Sulfonyl urées... ●		
1990 - 2000	▼▼▼▼▼▼▼	Phénylpyrroles ● Strobilurines ▼▼▼▼▼▼▼	▼▼▼

II.1.2. Définition du pesticide

Les pesticides sont des composés chimiques utilisés pour tuer les ravageurs, y compris les insectes, les rongeurs, les champignons et les plantes indésirables (mauvaises herbes). Les pesticides sont principalement utilisés pour la protection des cultures, conservation des aliments et prévention des maladies à transmission vectorielle (Akashe *et al.*, 2018).

Le terme pesticide rassemble des composés, naturels ou de synthèse, dans le but de réguler chimiquement une population d'individus nuisibles. Ces composés ont été introduits pour contenir certaines maladies ou pour développer les rendements de production du secteur agricole (Dufour, 2017). À travers leur structure chimique, ce sont habituellement des molécules persistantes dans l'environnement, susceptibles de migrer vers plusieurs compartiments naturels comme les sols, les eaux de surfaces, eaux souterraines ou l'atmosphère, et d'affecter les organismes y résidant (Dufour, 2017).

II.1.2.1 Classification des pesticides

Il existe quatre façons de classer les pesticides :

- 1) Selon leurs caractéristiques chimiques ;
- 2) Selon leurs cibles (Biologique) ;
- 3) Selon leurs usages ;
- 4) et selon les risques (toxicologiques) qu'ils peuvent engendrer d'après l'Organisation Mondiale de la Santé.

II.1.2.1.1. Classification chimique

Belhadi *et al.* (2016) décrit un millier de matières actives de pesticides, appartenant à une centaine de familles chimiques différentes, qui sont homologuées à travers le monde, et commercialisées dans près de 10 000 spécialités commerciales.

Selon cette classification chimique, il existe trois catégories de pesticides :

II. 1.2.1.1.1. Les pesticides inorganiques

Ces pesticides sont peu nombreux alors que certains d'entre eux comme le soufre et le cuivre sont utilisés en très grandes quantités. Leur emploi est avant les débuts de la chimie organique de synthèse. Les pesticides inorganiques sont des fongicides à base de soufre et de cuivre, et une des formes les plus utilisée est la bouillie bordelaise employée pour traiter la vigne ainsi que les arbres fruitiers, la pomme de terre et plusieurs cultures maraîchères.

II.1.2.1.1.2. Les pesticides organo-métalliques

Les pesticides organo-métalliques sont des substances fongicides constituées par un complexe métallique avec le zinc et le manganèse et un anion organique dithiocarbamate. Le mancozèbe (avec le zinc) et le manèbe (avec le manganèse) sont des exemples de ce type de pesticides.

II. 1.2.1.1.3. Les pesticides organiques

Les pesticides organiques sont nombreux riche de 80 familles (classes ou groupes) chimiques. Chaque famille se caractérise par un ensemble de molécules dérivées d'un groupe d'atomes qui constituent une structure de base (ex. famille des triazines pour les molécules contenant un noyau triazinique, etc).

II. 1.2.1.2. Classification biologique

Cette classification se base sur les organismes vivants ciblés. plusieurs catégories de pesticides dont les principales sont distingué comme des insecticides-acaricides, des fongicides et des herbicides (Calvet *et al.*, 2005). De plus on a les rodenticides, les molluscicides, les nématicides, les régulateurs de croissance des plantes et d'autres (Aktar *et al.*, 2009).

II. 1.2.1.2.1. Herbicides

Les herbicides peuvent être classés à des composés appliqués au sol ou au feuillage, qui sont couramment absorbés par les racines ou les tissus foliaires. Ces composés peuvent être des herbicides totaux ou sélectifs. Les herbicides totaux peuvent tuer toute la végétation, alors que les herbicides sélectifs peuvent contrôler les mauvaises herbes sans affecter la culture. Ces composés chimiques peuvent être appliqués à différents stades de la culture, comme le pré-semis et la pré- ou post-levée, et ces traitements seront utilisés en fonction de la mauvaise herbe nécessaire à la lutte contre une culture spécifique (Tadeo, 2019).

II. 1.2.1.2.2. Insecticides

Les insecticides sont utilisés pour lutter contre les parasites dans les cultures. Ces composés peuvent être employés sur le sol pour tuer les parasites présentent dans le sol ou sur la partie aérienne de la plante. Une grande partie de l'insecticide appliqué atteint le sol, que ce soit par des utilisations directes au sol ou indirectement par le ruissellement des feuilles et des tiges des plantes (Tadeo, 2019).

II. 1.2.1.2.3. Fongicides

Les fongicides sont utilisés en agriculture contre les maladies des plantes appartenant à différentes classes chimiques. On peut remarquer une grande variation des propriétés physico-chimiques de ces composés d'après les différentes structures chimiques des fongicides. Certains fongicides sont des stéréo-isomères et ils sont commercialisés sous forme de mélanges de ces isomères. Les fongicides peuvent être appliqués avant ou après la récolte pour protéger les céréales, les fruits et les légumes contre les maladies fongiques (Tadeo, 2019).

II. 1.2.1.3. Classification selon l'usage

Il existe six catégories de pesticides classés d'après la destination des traitements. Ces substances sont sous les termes d'insecticides-acaricide, de fongicides et d'herbicides.

D'autre part les pesticides sont utilisés dans la protection des bâtiments d'élevage, le traitement des locaux de stockage des produits végétaux, le traitement des zones non agricoles, le traitement des bâtiments d'habitation et le traitement des hommes et des animaux (Calvet *et al.*, 2005).

II.1.2.1.4. Classification selon risque toxicologique

Les pesticides appelés perturbateurs endocriniens causant des effets nocifs en imitant ou en antagonisant les hormones naturelles dans le corps ; ainsi l'exposition à faible dose et à long terme a des effets sur la santé humaine, comme l'immunosuppression, les perturbations hormonales, et des anomalies de la reproduction et le cancer (Aktar *et al.*, 2009).

II. 1.3. Mode d'entrée des pesticides

Le mode d'entrée des pesticides peut être systémique ou non systémique.

II. 1.3.1. Pesticides systémiques de contact

Les pesticides à contact systémique sont absorbés par les animaux ou des plantes et transférés dans des tissus qui ne sont pas traités. Les herbicides comme exemple de pesticides systémiques traversent la plante et peuvent atteindre les zones des feuilles, des tiges ou des racines qui ne sont pas traités. Ils sont efficaces pour tuer les mauvaises herbes même avec une couverture de pulvérisation partielle du pesticide (Egbuna and Sawicka, 2019).

II. 1.3.2. Pesticides de contact non systémiques

Les pesticides non systémiques sont ainsi connus sous le nom de pesticides de contact puisqu'ils produisent l'effet désiré lorsqu'ils entrent en contact avec le parasite. Les pesticides

non systémiques doivent entrer en contact physique avec le parasite pour être actifs. Les pesticides pénètrent dans le corps des parasites via leur épiderme ce qui entraîne la mort par empoisonnement (Egbuna and Sawicka, 2019).

II. 1.4. Formes et modalités d'utilisation des pesticides

Les produits phytosanitaires sont appliqués sous forme:

- Solide lorsqu'ils sont épandus en pré-semis ou en prélevée sur un sol nu. Les granulés diffusent alors lentement dans le sol. Les substances actives peuvent être incluses dans des microcapsules poreuses de polymères et sont dispersées en suspension dans l'eau,
- Liquide ou émulsifiable pour un épandage en post-levée qui est déterminé le plus souvent par le nombre de feuilles des plants,
- Enrobée : les semences sont enrobées de fongicides ou d'insecticides pour les préserver des nuisibles durant le stockage et après le semis.

Tout ou une partie des principes actifs ainsi libérés atteint donc le sol. Les polluants de l'eau se répartissent suivant leurs caractéristiques physicochimiques, dissouts (phase dissoute) ou adsorbés aux particules solides (phase particulaire). Les molécules sont ensuite transférées vers les eaux de nappe et de surface, en fonction de leurs propriétés physico-chimiques (solubilité, demi-vie, etc.), des événements météorologiques (occurrence et intensité de la pluie), de la structure et de la texture des sols traités, et des pratiques culturales en vigueur dans la zone concernée (labour, irrigation, etc.)(Boithias, 2012).

II. 1.5. Principaux usages et rôle des pesticides

Les pesticides sont utilisés dans la vie quotidienne pour tuer les parasites, tels que les moustiques, les tiques, les rats, et des souris dans les maisons, les bureaux, les centres commerciaux et les rues. Par conséquent, les maladies causées par ces vecteurs ont considérablement diminuée ou éliminer (Kim *et al.*, 2017 ; Lamichhane, 2017).

Les pesticides sont indispensables dans la production agricole. Ils ont été utilisés par les agriculteurs pour contrôler les mauvaises herbes et les insectes dans les cultures agricoles, et des augmentations remarquables ont été signalés dans la production agricole à la suite de l'utilisation de pesticides (Bernardes *et al.*, 2015 ; Lamichhane, 2017). L'augmentation de la population mondiale dans le XXe siècle n'aurait pas été possible sans une augmentation parallèle de la production alimentaire. Bien que les augmentations de la productivité

alimentaire soient dues à plusieurs facteurs, notamment l'utilisation de produits chimiques, de meilleures variétés de plantes et l'utilisation de machines, les pesticides ont été une partie intégrante du processus en diminuant les pertes de récolte induit par les mauvaises herbes, les maladies et insectes nuisibles (Aktar *et al.*, 2009). Environ un tiers des produits agricoles sont produits à l'aide de pesticides. Sans l'utilisation de pesticides, il y aurait une perte de 78 % de production de fruits, une perte de 54 % de la production de légumes et une perte de 32 % de la production céréalière (Lamichhane, 2017).

II. 1.6. Comportement des pesticides dans l'environnement

Actuellement, les travaux agricoles excessifs causent la pollution des eaux, l'atteinte de la faune et de la flore naturelles ainsi que l'érosion des sols. Ainsi, on a une dégradation quantitative et qualitative des ressources en eau, et changement de la fertilité des sols (Kanj, 2018). Les pesticides se déplacent d'un site à un autre milieu environnemental ou aux plantes non ciblées via des processus de transfert, d'adsorption, de lessivage, la volatilisation, la dérive de pulvérisation et le ruissellement (Figure 3).

II. 1.6.1. Dégradation des pesticides

Selon les conditions environnementales et les caractéristiques chimiques du pesticide, la dégradation peut prendre un temps de quelques heures à quelques jours, voire des années (Tcaciuc *et al.*, 2018). Les processus de dégradation des pesticides contrôlent la persistance des pesticides dans les sols (Tariq and Nisar, 2018). Il fournit aussi le concept de demi-vie des pesticides dans l'environnement (Marie *et al.*, 2017).

Il existe trois types de dégradation des pesticides (Luo *et al.*, 2018 ; Su *et al.*, 2016): La dégradation microbienne est la dégradation des pesticides par des micro-organismes tels que les champignons et les bactéries (Han *et al.*, 2012). Des Facteurs tels que l'oxygène, la température, l'humidité du sol, le pH du sol et la structure du sol poreuse influence la dégradation microbienne des pesticides (Singh, 2012 ; Yue *et al.*, 2017 ; Su *et al.*, 2016 ; Qian *et al.*, 2017). Les pesticides peuvent être dégradés chimiquement par des réactions chimiques dans le sol (Bansal, 2011). La réaction chimique du rayonnement solaire joue un rôle essentiel dans la dégradation des molécules à la surface du sol puisque il est toujours actif (Quan *et al.*, 2015). Le taux et le type de dégradation chimique sont affectés par la température du sol, les niveaux de pH, l'humidité et la liaison des insecticides au sol (Singh, 2012). La photo-dégradation est la dégradation des pesticides par la lumière du soleil. Tous les insecticides

sont capables à la photo-dégradation, ainsi que le taux de dégradation dépend aussi à l'intensité de la lumière, la durée d'exposition et les propriétés de l'insecticide (Singh, 2012).

II. 1.6.2. Migration des pesticides

II. 6.2.2.1. Adsorption

Le processus de sorption est un phénomène qui lie les pesticides aux particules du sol vu l'attraction entre les produits chimiques et les particules de sol (Bošković *et al.*, 2020). Plusieurs facteurs peuvent influencer l'adsorption des pesticides au sol dont le pH, la matière organique (Yue *et al.*, 2017) et l'amendement du sol (Si *et al.*, 2006). Les sols riches en matière organique ou en argile sont les plus adsorbants aux pesticides que les sols grossiers et sablonneux, puisque les sols argileux ou organiques ont soit une plus grande surface de particules, ou plusieurs sites sur lesquels les insecticides peuvent être liés (Bošković *et al.*, 2020 ; Wu *et al.*, 2018).

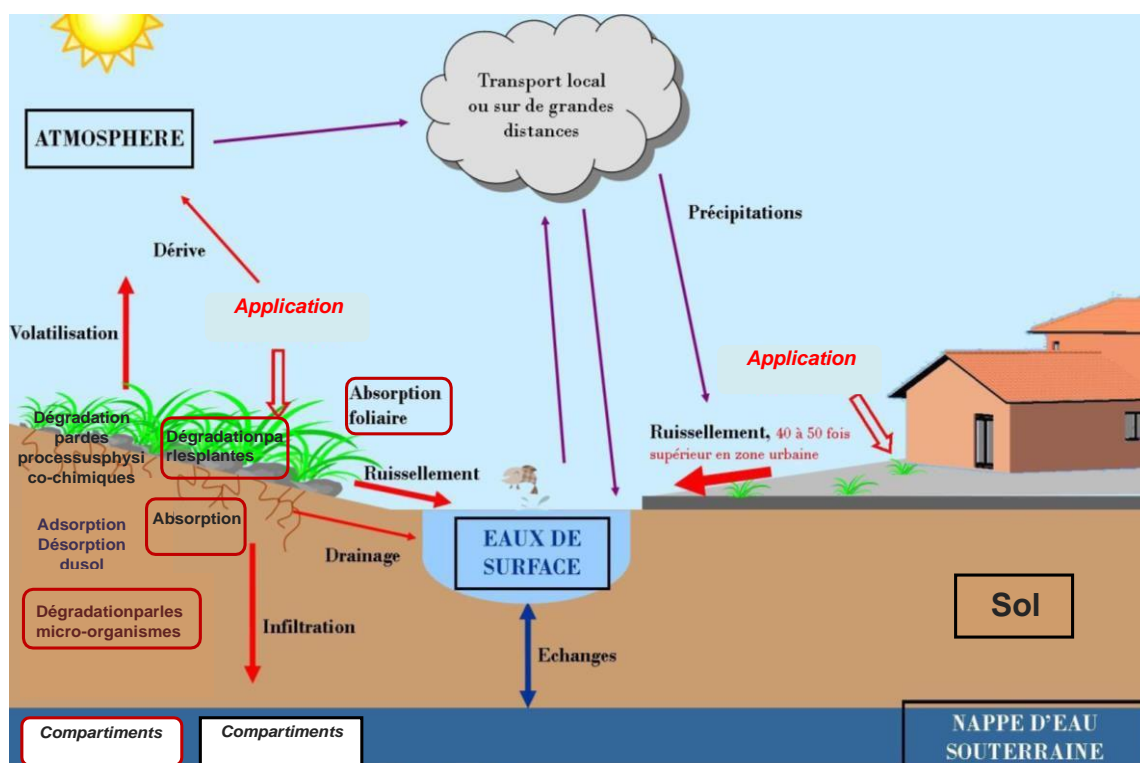


Figure 3 : Schéma synthétique des mécanismes influençant la dynamique des pesticides dans l'environnement (d'après Arias-Estévez *et al.*, 2008; Fenner *et al.*, 2013).

Les principales raisons de ce résultat sont les propriétés du sol, y compris la matière organique, le pH et la capacité d'échange cationique (CEC) influençant l'adsorption/désorption des fongicides. L'humidité influence ainsi l'adsorption de pesticides

dans le sol (Singh, 2012). La température est aussi un autre facteur qui influence l'adsorption de l'azote ammoniacal (Duan *et al.*, 2013). Certains pesticides ont une longue persistance dans le sol (Si *et al.*, 2006 ; Gao *et al.*, 2008), ils peuvent être absorbés par les plantes au cours de leur croissance. Ces types de pesticides peuvent endommager ou laisser des résidus dans les cultures (Duan *et al.*, 2008 ; Lozowicka *et al.*, 2015), Les molécules de pesticides chargées positivement sont attirées par les particules d'argile et peuvent être facilement liés (Đurišić-Mladenović *et al.*, 2010).

II. 6.2.2.2. Lessivage

De grandes quantités de pesticides sont homologués et utilisés dans le monde, dont certains sont capable de s'infiltrer dans les eaux souterraines et de provoquer une pollution de l'eau (Singh, 2012 ; Fontana *et al.*, 2010). La lixiviation est influencée par plusieurs facteurs (Singh, 2012). La perméabilité du sol est un autre facteur essentiel qui influence le lessivage des pesticides (Fontana *et al.*, 2010). Ainsi, plus la perméabilité du sol est grande, plus le potentiel de lessivage des pesticides dans le sol est élevé. Le coefficient d'adsorption (Koc) et la demi-vie dans un sol aérobie (DT50) peuvent influences le lessivage des insecticides (Connell, 2005). De plus, le niveau de lessivage dépend aussi de la persistance de l'insecticide dans l'environnement ainsi que les conditions météorologiques, tels que les précipitations annuelles et température moyenne annuelle, sont les principaux facteurs influençant la caractéristique de lessivage des pesticides (Singh, 2012).

Les précipitations sont un facteur essentiel qui influence le flux de lessivage vers le bas des eaux souterraines (Labite *et al.*, 2013). De plus, la température a un effet sur l'évapotranspiration du sol qui, à son tour peut influencer le comportement de lixiviation des pesticides dans le sol. Les propriétés du sol telles que la texture et la teneur en matière organique ont un effet sur la percolation de l'eau et le transport des pesticides vers les eaux souterraines (Geng *et al.*, 2017 ; Sijm *et al.*, 2007). Parmi ces conditions de sol, la texture du sol est le facteur le plus important qui influence le mouvement de l'eau et transports des pesticides dans le sol (Ou *et al.*, 2020). Boskovic *et al.* (2020) ont discuté de l'impact des propriétés du sol sur l'absorption des pesticides. Leurs résultats indiquent que l'adsorption des pesticides était fortement corrélée au pH (négativement corrélé) et moins associé au sol complexe organo-minéral (COT, argile et surface) et C et N dans la matière organique du sol.

II. 6.2.2.3. Dérive de pulvérisation

La dérive de pulvérisation est le mouvement aérien des gouttelettes de pulvérisation qui s'éloignent d'un traitement durant l'application de pesticides (Ou *et al.*, 2020 ; Wang *et al.*, 2020), causant ainsi une pollution de l'environnement (Zang *et al.*, 2020 ; Ghaste *et al.*, 2020).

II. 6.2.2.4. Volatilisation

La volatilisation est la transformation d'un solide ou d'un liquide en gaz. Une fois que les pesticides ont volatilisés, ils peuvent être emportés par des courants d'air loin de la surface traitée (Singh, 2012). Certains facteurs importants déterminent le niveau de volatilisation du pesticide (Connell, 2005), tels que la pression de vapeur, la température, l'humidité, le mouvement de l'air (Zhu *et al.*, 2017) et les conditions du sol telles que la texture, teneur en matière organique et humidité (Alamdar *et al.*, 2014).

De plus, des températures élevées, une faible humidité relative et des mouvements d'air ont tendance à augmenter la volatilisation (Connell, 2005).

II. 6.2.2.5. Ruissellement de surface

Le ruissellement est le mouvement des pesticides dans l'eau sur une surface en pente (Das *et al.*, 2020). Les pesticides peuvent se déplacer sous forme de composés dissous dans l'eau ou attachés aux particules de sol suite à l'érosion. Le ruissellement se produit lorsque la vitesse de l'eau à un champ est rapide qu'elle ne peut pas être absorbée par le sol (Singh, 2012). Ils entraînent aussi une pollution dans les cours d'eau, les étangs, les lacs et les puits ainsi que des impacts négatifs sur les plantes, les animaux et humains (Aktar *et al.*, 2008 ; Qin *et al.*, 2014)

II. 1.7. Consommation des pesticides

Pour assurer les besoins alimentaires d'une population mondiale de 9 milliards d'habitants en 2050, la production agricole mondiale doit augmenter de 70 % dans les pays en développement (Alexandratos and Bruinsma, 2012). Pour augmenter la production agricole, l'utilisation des produits phytosanitaires ou les pesticides dans le but de protéger les cultures contre les bioagresseurs est nécessaire puisque qu'ils protègent environ un tiers du total des produits agricoles dans le monde (Zhang *et al.*, 2011).

À l'échelle mondiale, les dommages aux cultures sont provoqués par environ 50 000 espèces de phytopathogènes, 9 000 espèces d'insectes et d'acariens et 8 000 espèces de mauvaises herbes (Zhang, 2018). Récemment, environ 2 millions de tonnes de pesticides sont

Chapitre II : Les pesticides

utilisées dans le monde, dont 47,5 % pour les herbicides, 29,5 % pour les insecticides, 17,5 % pour les fongicides et 5,5 % pour les autres pesticides (De *et al.*, 2014 ; Sharma *et al.*,2019). À l'échelle mondiale, les pays les plus consommateurs de pesticides sont la Chine, viennent ensuite les États-Unis, l'Argentine, la Thaïlande, le Brésil, l'Italie, la France, le Canada, le Japon et l'Inde (World atlas, 2018 in Sharma *et al.*, 2019).

Alors qu'on peut constater que, les pays du sud de la Méditerranée sont actuellement les plus consommateurs d'engrais et de pesticides, particulièrement dans les périmètres irrigués où sont situées les cultures maraîchères et fruitières (du Maroc à l'Algérie, en passant par la Tunisie, le Liban où la Jordanie) (Kanj, 2018). L'Algérie est classée parmi les pays les plus utilisateurs des pesticides dans le monde. Alors que, environ 400 produits phytosanitaires ont été homologués dans notre pays, et une quarantaine d'entre eux sont plus utilisés par les agriculteurs (Amgoud, 2015).

II.2. Impact des pesticides sur l'environnement

II.2.1. Contamination du sol

Le sol est le principal réservoir de pesticides environnementaux, jouant un rôle essentiel dans la distribution et le devenir de la contamination (Al-Wabel *et al.*, 2016). La dégradation des pesticides conduit à la production de résidus qui persistent et se transforment non seulement dans les écosystèmes aquatiques mais aussi dans les milieux terrestres pendant des années, causant des effets néfastes pour l'environnement (Barron *et al.*, 2017). Ils peuvent être toxiques pour les microorganismes des sols. Dans ce cas, l'activité microbienne diminue et on assiste à une sélection des microorganismes résistants aux pesticides, pouvant l'utiliser comme source de carbone.

II.2.2. Effets des pesticides sur les bio-indicateurs du sol

Les insectes nuisibles ciblés, les organismes non ciblés sont affectés négativement lors de l'application des pesticides sur les plantes cibles (Wanwimolruk *et al.*, 2016). Ils peuvent conduire également à des dommages pour la faune, les oiseaux, les écosystèmes aquatiques, les abeilles et les insectes bénéfiques et aussi les ennemis naturels d'insectes nuisibles.

Les pesticides, même ceux utilisés à faible concentration, influencent les propriétés chimiques et biologiques, l'activité biochimique et les micro-organismes du sol (AL-Ani *et al.*, 2019). D'autre part, ils peuvent aussi interférer avec la prolifération des micro-organismes bénéfiques du sol et leur biotransformation associée, diminuer les activités enzymatiques et affecter plusieurs réactions biochimiques telles que la minéralisation de la matière organique, la nitrification, la dénitrification, l'ammonification, les réactions redox et la méthanogénèse (Hussain *et al.*, 2009)

II.2.3. Micro-organismes du sol

Les bactéries du sol et les communautés fongiques contribuent à la fertilité du sol et aident à atténuer la dégradation du sol (Wagg *et al.*, 2019 ; Rosas-Medina *et al.*, 2020). L'ajout de glyphosate, d'alphacyperméthrine ou de malathion a significativement diminué le nombre de bactéries du sol, des champignons, des actinomycètes et les activités microbiennes à différentes périodes d'incubation (AL-Ani *et al.*, 2019) (Figure 4).

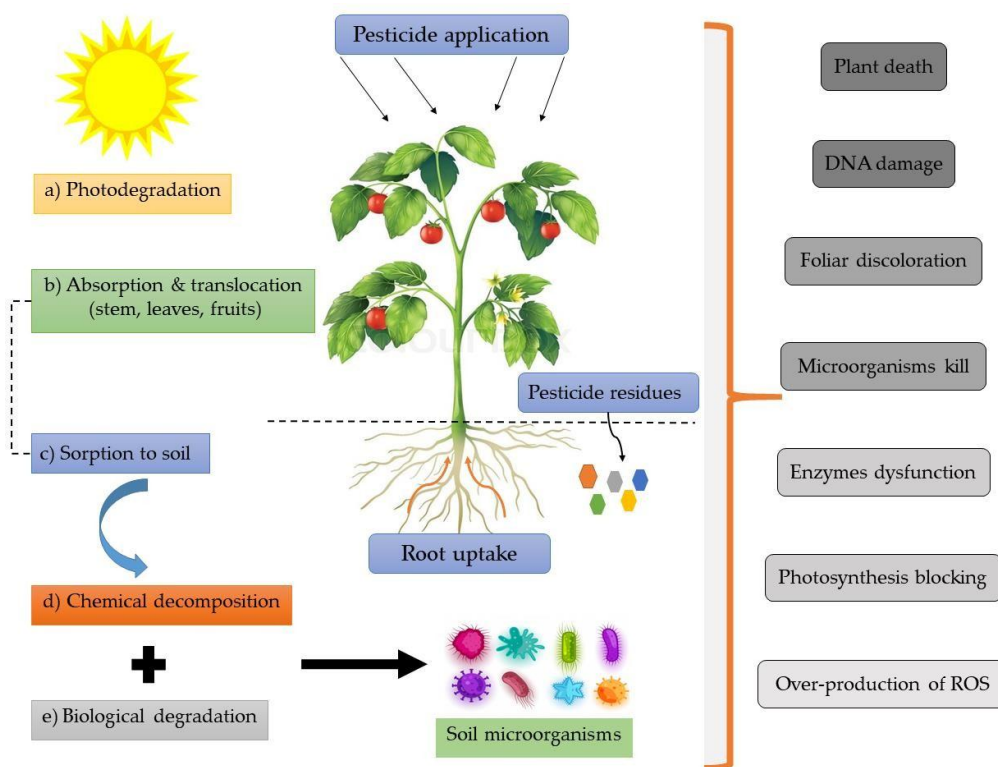


Figure 4 : Voies mécanistiques de la toxicité des pesticides dans le sol et la plante (Alengebarwy *et al.*, 2021)

II.2.4. Contamination de l'eau

Le biote souterrain joue un rôle crucial pour les services écosystémiques, dont le maintien de la qualité de l'eau et le soutien des écosystèmes dépendant des eaux souterraines, comme les sources et les rivières (Griebler *et al.*, 2014). L'évolution du biote souterrain les rendent notamment sensible aux effets anthropiques (Griebler and Avramov, 2015 ; Valverde *et al.*, 2017). Les pesticides présents dans les eaux de surface peuvent être transférés dans les eaux souterraines par infiltration, et dans l'atmosphère par évapotranspiration. Selon Lawanira *et al.*, (2017) la contamination des eaux dépend des propriétés du pesticide, du sol, et aux des conditions climatiques et à la distance du site d'application à la source d'eau. Et malgré l'utilisation des doses recommandées, certains auteurs ont mentionné des effets nocifs de divers pesticides sur les organismes aquatiques tels que les poissons, les daphnies et les algues (Mu *et al.*, 2013 ; Sanches *et al.*, 2017) ainsi que les organismes terrestres comme les collemboles (Alves *et al.*, 2014).

II.2.5. Effets des pesticides sur les bio-indicateurs de l'eau

L'eau contaminée par les pesticides peut être mortelle pour les organismes aquatiques. Les trois modèles biologiques les plus utilisés pour l'évaluation des risques écotoxicologiques des substances chimiques sont les algues, les lentilles d'eau, les poissons et les daphnies (Farahy *et al.*, 2021).

II.2.5.1. Algues

La conséquence directe de la présence de pesticides dans les écosystèmes aquatiques est la diminution des producteurs primaires photosynthétiques puisque une grande partie des herbicides inhibent leurs photosynthèse (Backhaus *et al.*, 2004).

II.2.5.2. Lentilles d'eau

La famille des Lemnaceae, appelées aussi lentilles d'eau, comprend 37 espèces de plantes à fleurs. Leur petite taille et leur croissance clonale rapide dans des conditions aseptiques en ont fait un produit stable et un modèle simple pour la recherche scientifique (Fourounjian *et al.*, 2020). En région méditerranéenne, les espèces de lentilles d'eau les plus courantes sont *Lemna minor* et *Lemna gibba*. Plusieurs études ont montré une forte accumulation de pesticides chez *L. minor* (Megatehi *et al.*, 2013; Prasertsup and Ariyakanon 2011; Dosnon-Olette *et al.*, 2010).

II.2.5.3. Poissons

Les pesticides induisent plusieurs types de toxicité chez les poissons causant des modifications du comportement des poissons (Soni-Verma, 2018), une altération des enzymes, une génotoxicité (Olsvik *et al.*, 2019 ; Vieira and Dos, 2018), des modifications hématologiques (Maury *et al.*, 2019), et une perturbation du système endocrinien (Brander *et al.*, 2016).

II.2.5.4 Daphnie

L'exposition aux pesticides peut endommager l'ADN de la daphnie (Knapik and Ramsdorf, 2020) et provoquer également des perturbations endocriniennes (Palma *et al.*, 2009), ainsi que la diminution des taux de reproduction et de mobilité, et des troubles de la croissance qui peuvent conduire à la mort (Sancho *et al.*, 2016).

II.2.6. Contamination de l'air

L'activité agricole est la cause principale de la contamination de l'atmosphère par les pesticides. Les pesticides peuvent être appliqués au champ par plusieurs méthodes telles que la pulvérisation sur les plantes et le sol. Diverses voies de contamination de l'atmosphère sont possibles : une contamination directe durant l'application à cause des pertes par dérive, et une contamination indirecte en post-application, telle que les pertes par volatilisation depuis le sol ou le couvert traité, ainsi que par érosion éolienne (Lichiheb *et al.*, 2015). La contamination de l'air par les pesticides entraîne des impacts nocifs sur la flore et la faune ainsi que sur la santé humaine (Abdullah *et al.*, 2017).

II.2.7. Contamination des aliments

La contamination des aliments est essentiellement liée à l'usage de pesticides dans le cadre agricole pour protéger les cultures. Cette contamination n'est pas seulement une conséquence de la pulvérisation des pesticides sur les plantes non ciblées, mais aussi au comportement des pesticides dans l'environnement, comme la volatilisation de la zone traitée vers l'atmosphère, le sol et les plantes non ciblées, et les pesticides résiduels transmis par le sol et l'eau aux cultures, aux légumes et aux fruits (Carvalho, 2017 ; Zhang *et al.*, 2017 ; Damalas and Eleftherohorinos, 2011). Les fruits et légumes, ainsi que les céréales sont les aliments les plus contaminés. Des résidus de pesticides peuvent être aussi retrouvés dans les produits animaux ou d'origine animale, après contamination de la chaîne alimentaire (Grange *et al.*, 2008).

II.2.8. Exposition aux pesticides

L'exposition aux pesticides est un problème majeur de santé publique longtemps ignoré par l'ensemble de la population : les professionnels, notamment les agriculteurs ; les particuliers qui utilisent ces composés à la maison ou dans le jardin et le consommateur exposé par l'alimentation (Gamet-Payrastré, 2011). De plus la consommation de produits agricoles contaminés et d'eau potable polluée peut présenter un danger pour la santé humaine. L'exposition des organismes aux pesticides peut se faire par plusieurs voies (ingestion volontaire ou non : mains souillées, inhalation, contact cutané) et deux types d'exposition (Batsch, 2011) :

i) L'exposition primaire est concernée pour les personnes manipulant directement les produits, durant de la préparation, de l'application, du nettoyage des appareils, et du vidage

des cuves. Elle concerne la plupart des agriculteurs et professionnels utilisant ces produits, ainsi que les particuliers pour un usage domestique.

ii) L'exposition secondaire affecte l'ensemble de la population, par l'exposition aux résidus résultant de l'utilisation de pesticides, à travers l'alimentation et l'environnement. L'exposition alimentaire inclue la consommation d'aliments et d'eau potable contaminés par des pesticides (Tsakiris *et al.*, 2011), d'autre part l'exposition non alimentaire inclue le contact cutané avec des sédiments pollués et l'eau, l'inhalation de résidus dans les sédiments et les ingestion de sédiments contaminés (Huang *et al.*, 2013 ; Zhou *et al.*, 2006 ; Qu *et al.*, 2015). Les étude des résidus de pesticides chez les poissons, l'eau et les sédiments sont vitaux pour le bien-être humain (Munaretto *et al.*, 2013), car la consommation de poissons contaminés par des pesticides pose de graves risques pour la santé (Dang *et al.*, 2016).

II.2.9. Effet des pesticides sur la santé

II.2.9. 1.Intoxications aiguës

La toxicité aiguë (ou toxicité à court terme), est bien connue qu'elle se manifeste après quelques heures et après l'absorption d'une dose élevée ; elle a lieu généralement après une forte exposition aux pesticides en raison des erreurs de manipulation du produit (désherbage, mauvaise gestion des emballages, vidanges de fonds de cuves, ...) (Kheddam, 2012).

II.2.9. 2. Intoxication chronique

L'intoxication chronique survient suivant une absorption répétée de faibles doses de pesticides, le délai avant l'apparition des symptômes ou d'une maladie peut être long, alors que les impacts sur la santé peuvent même se manifester après plusieurs années, ce qui rend le lien difficile à faire. Alors que l'exposition aux pesticides peut entraîner une gamme d'effets liés à la santé à court et à long terme tels que la leucémie, le lymphome non hodgkinien, le cerveau, les os, cancers du sein, des ovaires, de la prostate, des testicules, du foie, de la reproduction, troubles gastro-intestinaux, neurologiques, congénitaux, système immunitaire, troubles respiratoires et endocriniens (Dang *et al.*, 2016).

II.2.10. Effet des pesticides sur la plante

Les plantes sont attaquées par plusieurs ravageurs, ce qui résulte une réduction du rendement et de la qualité de cultures, et pour contrôler ces ravageurs, divers pesticides sont utilisés (Goh *et al.*, 2011). Cependant, l'utilisation intensive de pesticides peut provoquer une toxicité pour les plantes qui peut nuire au métabolisme de la plante et persister dans les parties

de la plante sous forme de résidus de pesticides (Xia *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2015; Sharma *et al.*, 2016a).

II.2.10.1. Absorption et persistance des pesticides par les plantes

L'absorption de pesticides par les plantes peut se faire par les racines jusqu'à n'importe quelle partie aérienne telles que les feuilles et les fruits. Ils peuvent se déplacer également vers les pousses soit par le xylème ou le phloème, soit dans les racines via le phloème seul. L'absorption des pesticides dépend de divers facteurs, dont les propriétés physico-chimiques des pesticides et du sol, et les conditions environnementales telles que la température, les précipitations, la lumière et l'humidité relative (Schroder and Collins, 2002).

Les pesticides peuvent persister longtemps dans les plantes selon leur demi-vie. La persistance du pesticide est la tendance de s'accumuler dans l'environnement. C'est le temps nécessaire pour qu'un pesticide se dégrade à la moitié de sa quantité initiale. Il est classé en trois groupes comme suit : faible (demi-vie inférieure à 30 jours), modérée (30-100 jours) et élevée (supérieure à 100 jours) (Gavrilescu, 2005).

II.2.10.2. Toxicité des pesticides chez les plantes

L'application de pesticides provoque une toxicité pour les plantes par nécrose, chlorose, rabougrissement, brûlures et torsion des feuilles (Sharma *et al.*, 2018a). Il a été constaté que l'application de pesticides affecte négativement la croissance et le développement des plantes (Sharma *et al.*, 2015, 2016a; Shahzad *et al.*, 2018). Ils peuvent également réduire l'efficacité photosynthétique, l'azote et le métabolisme du carbone (Kaňa *et al.*, 2004). Cette toxicité dépend de nombreux facteurs tels que le taux d'application, la technique de pulvérisation, les conditions climatiques, l'organisation de la flore, les propriétés du sol telles que l'humidité, la température, pH, texture et activité microbienne. Les pesticides initient également plusieurs altérations morpho-physiologiques, moléculaires et biochimiques des plantes qui affectent négativement la croissance et la productivité ainsi que le développement de la résistance des ravageurs (Bhatnagar-Mathur *et al.*, 2008 ; Cheng *et al.*, 2012) (Figure 5).

L'application du pesticide provoque un stress oxydatif pour les plantes en raison de la génération des espèces réactives oxygénées (Sharma *et al.*, 2018b). Pour faire face au stress oxydatif, les antioxydants du système de défense des plantes est activé, tels que des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques (Xia *et al.*, 2009; Sharma *et al.*, 2015).

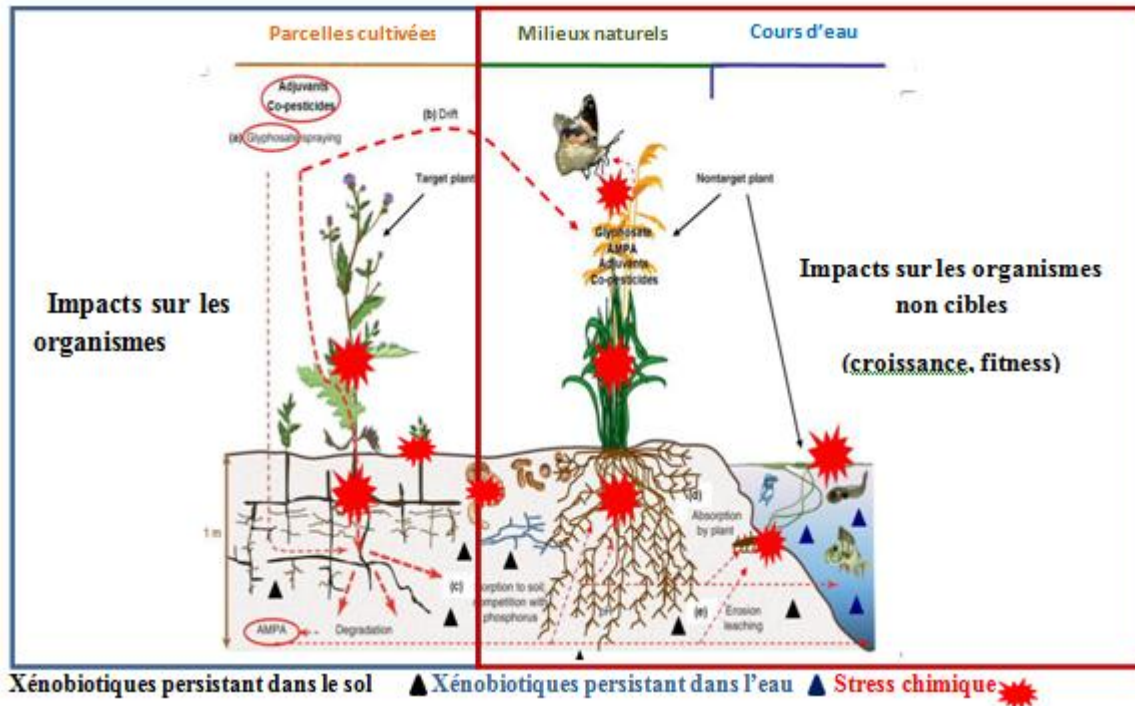


Figure 5 : Stress chimique causé par des xénobiotiques (exemple de l’herbicide glyphosate) sur les organismes cibles et non cibles (Helander *et al.*, 2012)

II.2.11. Le stress oxydant

Le stress oxydant est un déséquilibre entre la production d’espèces réactives (radicaux libres) de l’oxygène et le système anti oxydant endogène. Un stress oxydant est dû à une surproduction d’ERO et/ou à une diminution de l’activité anti oxydante.

Le radical libre est un composé ou une molécule contenant un ou plusieurs électrons non appariés dans son orbite externe. La présence d’électrons non appariés rend le composé hautement réactif à la recherche de paires, en attaquant et en se liant aux électrons moléculaires à proximité (Halliwell and Gutteridge, 2015; Rani, 2015).

Le stress oxydant joue un rôle essentiel comme un médiateur clé qui institue et exacerbe le processus pathologique. Alors qu’une faible exposition aux ROS résulte une biogénèse mitochondriale et une augmentation des défenses anti oxydantes intrinsèques (Geny *et al.*, 2019)

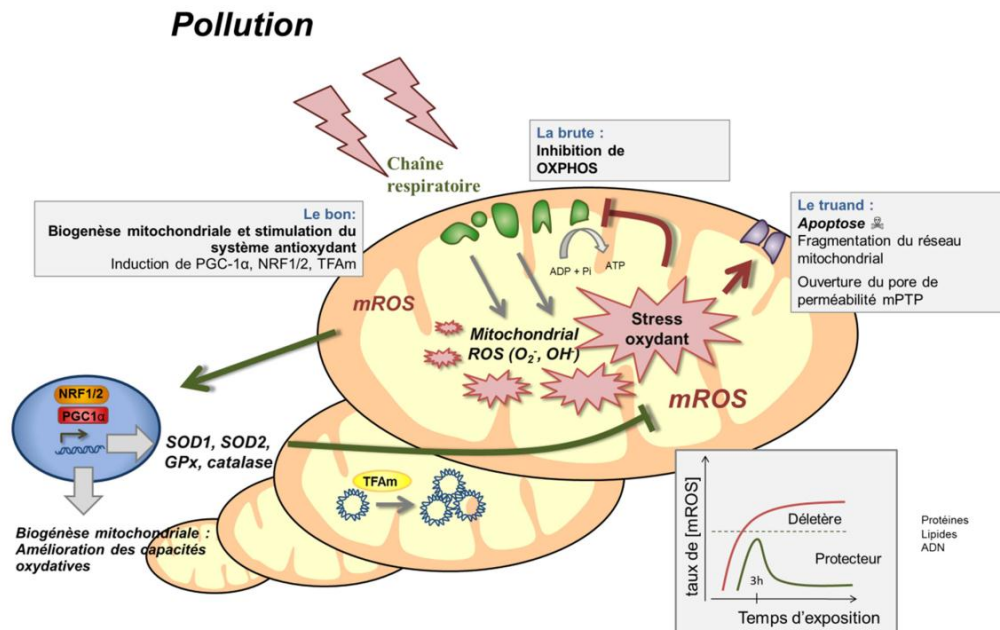


Figure 6. Interactions entre la pollution, le stress oxydant et les mitochondries (Geny *et al.*, 2019).

II.2.11.1. Les défenses cellulaires contre le stress oxydant

Afin de palier aux effets toxiques des espèces réactives de l'oxygène, les organismes disposent d'un arsenal de défenses antioxydants à la fois enzymatiques et non enzymatiques.

II.2.11.2. Les antioxydants

Un antioxydant est toute substance qui, à une concentration faible par rapport au substrat oxydable, retarde ou empêche l'oxydation de ce substrat.

II.2.12. Classification des antioxydants

II.2.12.1. Antioxydants enzymatiques

Les antioxydants enzymatiques sont des antioxydants endogènes, notamment les enzymes superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPx) et la glutathion réductase (GR). Ces enzymes agissent en protégeant les tissus des dommages oxydatifs causés par les radicaux libres d'oxygène tels que l'anion superoxyde ($O_2^{\bullet-}$), le radical hydroxyle (OH^{\bullet}), le radical peroxy (ROO^{\bullet}) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (Halliwell and Gutteridge, 2015).

II.2.12.1.1. Superoxyde dismutase (SOD)

Le superoxyde dismutase (SOD) est connue sous le nom de protéine contenant du Cu et est identifiée sous divers titres, tels que l'érythrocuprine, l'indofénol oxydase et la tétrazolium oxydase (Winarsi, 2007). L'enzyme SOD fonctionne comme un catalyseur de la réaction dismutase des anions superoxyde en peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et à l'oxygène (O_2) (Rani, 2015). Cette enzyme nécessite la présence des co-facteurs tels que le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu) pour fonctionner. L'activité enzymatique SOD joue un rôle crucial dans le système de défense de l'organisme, en particulier l'activité des composés oxygénés réactifs qui peuvent provoquer un stress oxydatif (Winarsi, 2007).

II.2.12.1.2. Catalase (CAT)

La catalase est un ferri-hème homo-tétramère contenant une enzyme, avec Fe comme cofacteur, qui catalyse le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) en eau et en oxygène (Rani, 2015). De nombreux chercheurs ont rapporté que l'activité de l'enzyme catalase peut être induite par l'apport d'antioxydants.

II.2.12.1.3. Glutathion Peroxydase (GPx)

La glutathion peroxydase (GPx) est une enzyme antioxydante contenant du sélénium (Se) sur son côté actif. Cette enzyme agit sur le glutathion réduit (GSH) et le H_2O_2 pour produire du glutathion oxydé (GSSG) et du H_2O (Halliwell and Gutteridge, 2015). Cette enzyme peut également réduire la peroxydation des lipides dans les membranes cellulaires. L'activité de l'enzyme glutathion peroxydase est capable de réduire la peroxydation organique de 70% et de plus de 90% H_2O_2 (Winarsi, 2007).

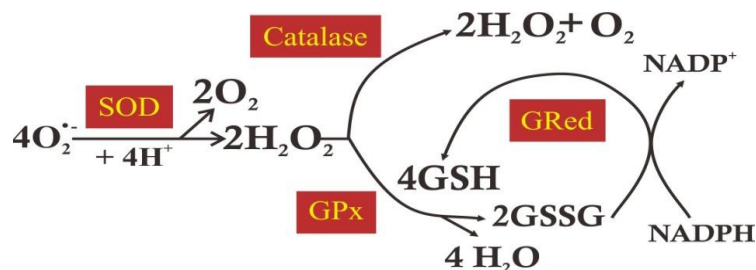


Figure 7 : Rôle de la SOD, de la catalase et de la GPx dans l'élimination des ROS (Kunwar, 2011)

II.2.12.1.4. Antioxydants non enzymatiques

Les antioxydants non enzymatiques se trouvent dans les légumes et les fruits, notamment le glutathion réduit (GSH), la vitamine C, E, le β -carotène, les flavonoïdes, les isoflavones, les flavones, l'antosionine, les catéchines et les isocatéchines, et l'acide lipoïque. Ces composés phytochimiques aident à protéger les cellules des dommages oxydatifs causés par les radicaux libres (Rani, 2015).

Dans les cellules vivantes, les radicaux libres se forment sur la membrane plasmique, les mitochondries, les peroxysomes, le réticulum endoplasmique et le cytosol par des réactions enzymatiques qui se produisent au cours du processus métabolique. L'organisme possède un mécanisme de protection qui neutralise les radicaux libres formés, entre autres, avec les enzymes superoxyde dismutase (SOD), catalase (CAT) et glutathion peroxydase (GPX).

II.2.12.1.5. Métabolisme des pesticides chez les plantes

Les plantes détoxifient les pesticides par un système de détoxification en trois phases à médiation enzymatique (Cherian and Oliveira, 2005). Tout d'abord l'activation des pesticides est catalysée par les enzymes P450 mono oxygénase, peroxydase et carboxyl estérase. Après cela, la conjugaison des pesticides activés au glutathion et au glucose est catalysée respectivement par la glutathion-S-transférase et l'UDP glycosyltransférase. Enfin, des métabolites de pesticides moins toxiques sont stockés dans les vacuoles/apoplastes (Sharma, 2018).

Partie expérimentale

Chapitre II

Matériel et méthodes

Objectifs

L'objectif de notre travail de recherche est d'étudier l'effet des doses de pesticides appliquées dans des conditions de terrain (dose agronomique, DA ; double dose agronomique, DDA) sur les réponses morphologiques, biochimiques et éco-physiologiques des plants de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.).

Dans le cadre de l'élaboration de ce travail, une enquête sur le terrain au près de 460 agriculteurs de la wilaya de Mostaganem a été réalisé au niveau du Direction des services agricoles (DSA), et la chambre d'agriculture portant sur la collecte des informations sur l'utilisation des produits phytosanitaires à usage agricole. L'enquête s'est déroulée du 04/10/2018 au 4/01/2019.

II. 1. Présentation du site d'étude

Ce projet a été réalisé au niveau de la ferme de l'université de Mostaganem (atelier de l'ex ITA, Mazagan), où la culture de pomme de terre de la variété Sylvana a été réalisée.

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 Mazagan et à l'Est par Douar Djedid. 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).

II.1. 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).

II.1.2. 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 2019.

II.2. Matériel et produits utilisés

II.2.1. Matériel végétal

L'espèce végétale utilisée dans cette étude est : *Solanum tuberosum*, plus communément appelé pomme de terre de type « Sylvana ». Variété originaire des Andes, elle est issue d'un croisement de deux autres variétés de pomme de terre « Fabula » et « Xantia ».

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est l'une des plantes herbacées de la famille botanique des Solanacées les plus produites et les plus consommées au monde.

La pomme de terre est classée en tant que troisième culture la plus produite après le riz et le blé, et environ un milliard de personnes dans le monde la consomment sous différentes formes (Anwar *et al.*, 2015).

II.2.2. Description morphologique

II.2.2.1. Partie aérienne

La partie aérienne est constituée de plusieurs tiges herbacées telles que les tiges principales et latérales portant des feuilles alternes. La tige principale peut aller jusqu'à 1 m de longueur qui porte des feuilles pointues et des fleurs, de couleurs violettes, bleutées et rouges violacées (Soltner, 1999).

II.2.2.2. Partie souterraine

Le système souterrain est la partie la plus importante de la plante puisqu'il contient les tubercules. Il représente également environ de 75 à 85% de la matière sèche totale de la plante (Polese, 2006).

II.2.3. Multiplication et cycle végétatif de la pomme de terre

Vreugdenhil *et al.* (2007) indique différents modes de la multiplication de la pomme de terre telle que les boutures, graines ou par tubercules qui est le mode le plus courant.

Le cycle végétatif de la pomme de terre est variable selon l'état physiologique des tubercules plantés, les variétés utilisées et les facteurs agro-climatiques. La durée entre le semis et la récolte est plus court que celui des autres grandes cultures (moins de 90 jours) (Majeed and Muhammad, 2018). La multiplication végétative de la pomme de terre se déroule en trois étapes : la dormance, la germination et la tubérisation.

a-Dormance

La plupart des variétés de pommes de terre après la récolte passent par une période de dormance où le tubercule ne germe pas, même sous des conditions de croissance favorables (température, éclairage et humidité) , et sa durée est liée à sa variété ainsi qu'aux conditions d'entreposage, et surtout de la température (Péron, 2006).

b-Germination

Après une évolution physiologique interne, les tubercules sont capables d'émettre des bourgeons, cette évolution conduit d'abord à un seul germe qui se développe doucement alors que le germe issu du bourgeon terminal inhibe les autres bourgeons (dominance apicale).

c-Tubérisation

La durée de cette phase varie selon la variété des tubercules et des conditions environnementales (Midoune, 2015). Cette phase peut prendre deux semaines dès l'initiation des premiers tubercules jusqu'à l'initiation de tous les tubercules (Doubouya, 2015). Après certain moment, les stolons arrêtent leur élongation et leurs extrémités se renflent pour constituer les ébauches des tubercules (Soltner, 2005).

II.2.4. Composition biochimique du tubercule

Les caractéristiques morphologiques, chimiques et biochimiques du tubercule de pomme de terre varient selon la variété, les techniques culturales, les conditions climatiques et de l'âge physiologique de la pomme de terre. Les tubercules de pomme de terre stockent un pourcentage de 77,5 % d'eau à maturité. La matière sèche, exprimée en pourcentage de la matière fraîche de 19 % de glucides totaux (essentiellement amidon, saccharose, glucose, fructose, cellulose brute et substances pectiques), 2,0 % de protides (protéines, acides aminés libres et bases azotées), 1,0 % de cendres (potassium) et 0,1 % de lipides. Des acides organiques (acides citrique et ascorbique entre autres), ainsi que des substances phénoliques tels que les acides chlorogénique, caféique, et pigments (Mattila and Hellström, 2007).

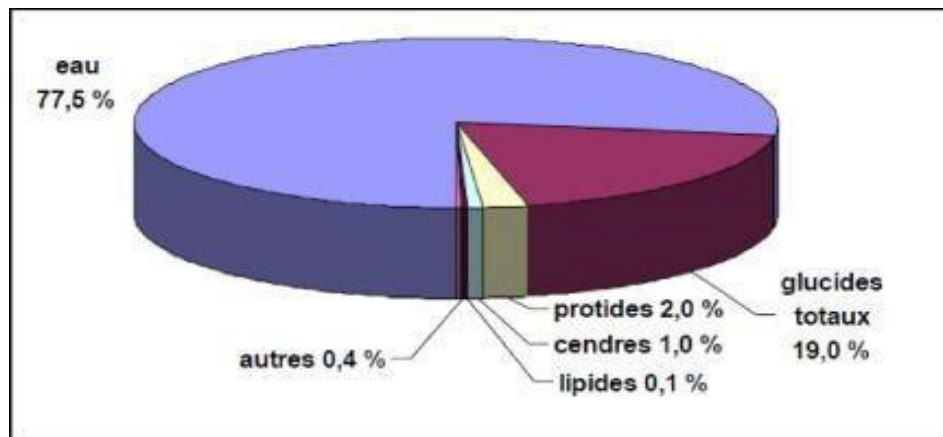


Figure 8 : Représentation graphique de la composition biochimique moyenne du tubercule de pomme de terre (*Solanumtuberosum* L.). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la matière fraîche totale (Mattila and Hellström, 2007).

II.2.5. Les principales wilayas productrices de la pomme de terre en Algérie

La superficie du maraichage a enregistré une augmentation plus de 44% durant la période 2010-2017 par rapport à la période 2000-2009. Les superficies réservées à la pomme de terre connus des augmentations, situées respectivement à plus de 68%. La production moyenne du maraichage a enregistré une hausse significative durant la période 2010-2017 atteignant plus de 121% par rapport à la période 2000-2009.

La pomme représente plus de 36% et plus de 12% de la production du maraichage ont enregistré une évolution respectivement de 143% (MADR, 2018).

- **Primeur:** Mostaganem, Boumerdes, Tipaza, Skikda, Alger, Tlemcen.
- **Saison :** Mostaganem, Ain-Defla, Mascara, Mila, Souk Ahras, Boumerdes, Sétif, Tizi Ouzou, Tiaret, M'Sila, Tlemcen, Batna, Chlef, Bouira, El-Oued.
- **Arrière saison :** Mostaganem, Ain-Defla, Mascara, Guelma, Chlef, El Oued, Tlemcen, Djelfa.

II.2.6. Les principales variétés cultivées en Algérie

Cent vingt variétés sont inscrites au catalogue algérien des espèces et variétés cultivées. Les principales variétés cultivées en Algérie sont : *Spunta* (à chair blanche), *Désirée* (à chair jaune), *Bartina*, *Lisita*. En Algérie, la pomme de terre est la première culture maraîchère après le blé (FAO, 2015).

Chapitre I : Matériel et méthodes

Tableau 03: Evolution des superficies et les productions de la culture de pomme de terre en Algérie entre 2008 et 2018 (FAO Stat., 2020)

Année	Superficies (ha)	Production (quintaux)	Rendement (quintaux/ha)
2008	91 841	21 710 580	236,39
2009	105 121	26 360 570	250,76
2010	121 996	33 003 120	270,53
2011	131 903	38 621 940	292,80
2012	138 666	42 194 760	304,29
2013	161 156	48 865 380	303,21
2014	156 176	46 735 160	299,25
2015	153 313	45 395 770	296,10
2016	156 308	47 596 770	304,50
2017	148 822	46 064 020	309,52
2018	149 665	46 533 220	310,91

II.3. Méthodes et traitement utilisés

Cette étude a été menée sur la pomme de terre commerciale (*Solanum tuberosum* L., variété Sylvana). Les tubercules de pomme de terre ont été plantés à main nu au mois de janvier 2019 et récoltés en mai 2019 au stade de maturité. Une parcelle d'environ 44,2 m² a été exploitée pour tester l'effet de deux doses de pesticides sur les paramètres biochimiques et biologiques des plants de pomme de terre.

Cette parcelle a été répartie en trois micro-parcelles d'environ 5,2 m². La première cultivée non traitée, elle a été utilisée comme témoin ; la deuxième micro-parcelle est cultivée et traitée avec une dose agronomique de pesticide (DA), et la troisième micro-parcelle cultivée et traitée avec une double dose agronomique de pesticide (DDA). Les traitements phytosanitaires ont été appliqués par pulvérisation, d'abord avec des herbicides puis des fongicides et des insecticides. Tous les douze jours, entre deux fongicides ou deux insecticides, et quatre jours entre un fongicide et un insecticide. Les produits chimiques utilisés sont énumérés dans le tableau 4. Les feuilles ont été récoltées aux deux stades, stade initial de croissance et stade final de maturation. Ils ont été conservés au froid afin d'effectuer les analyses biochimiques.

Les échantillons des sols ont été également prélevés dans les mêmes micro-parcelles au niveau de la couche superficielle du sol (0-20 cm). Ils ont 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 pour la réalisation des analyses microbiologiques.

Tableau 4. Traitements pesticides de la pomme de terre utilisés dans les conditions de terrain

Matières actives	Taux d'utilisation recommandé Par la fabrication
Abamectin (18 g/L)	50 mL/ha
Famoxadone (22.5 %) + Cymoxanil (30%)	400 g/ha
Metribuzin	450-650 g/ha
Chlorothalonil (500 g/L)	2L/ha
Chlorothalonil (500 g/L) + Metalaxyl (36.3 g/L)	2L/ha

II.4. Mesure des paramètres de croissance

Dix plantes ont été prélevées au hasard dans l'unité expérimentale pour déterminer les paramètres biométriques : nombre de feuilles, nombre de tiges aériennes/plante et hauteur de la plante (cm). Le nombre de tubercules/plant, le rendement total/plant (kg) et le rendement total/hectare (tonne) ont également été calculés au stade final de la récolte pour les deux doses AD et ADD.

II.5. Analyses biochimiques

II.5.1. Détermination de la teneur en chlorophylle

Un échantillon de feuilles de 500 mg a été écrasé dans un mortier et un pilon avec 80% d'acétone (v/v). Le mélange a été incubé pendant 60 minutes à 4 °C, ensuite filtré et centrifugé dans des tubes scellés à 15000 xg pendant 5 min. L'absorbance a été enregistrée à 470, 645 et 663 nm. Les teneurs en chlorophylle a (Chl a), en chlorophylle b (Chl b) et en caroténoïdes (Cx+c) ont été calculées à l'aide des formules suivants ([Lichtenthaler and Buschmann, 2001](#)) :

$$\text{Chla } (\mu\text{g/mL}) = 12.25 A_{663} - 2.79 A_{645}$$

$$\text{Chlb } (\mu\text{g/mL}) = 21.50A_{645} - 5.10A_{663}$$

$$C(x+c) (\mu\text{g/mL}) = (1000 A_{470} - 1.82 \text{ Chla} - 85.02 \text{ Chlb})/198$$

$$\text{Chlorophylle totale } (\mu\text{g/mL}) = (20.2 \times A_{645}) + (8.02 \times A_{663})$$

II.5.2. Détermination des métabolites secondaires

II.5.2.1. Détermination de la teneur en composés phénoliques

Les polyphénols totaux sont quantifiés par spectrophotométrie en utilisant le réactif de Folin-ciocalteu ; une solution de couleur jaune constituée d'un mélange de deux acides : acide

phosphotungstique et acide phosphomolybdique. Ce réactif est réduit lors de l'oxydation des phénols pour former un complexe bleu stable d'oxydes de tungstène et de molybdène.

Le contenu phénolique total a été déterminé par la méthode de [Singleton and Rossi \(1965\)](#).

20µl de l'extrait aqueux de feuilles de pomme de terre sont mélangés avec 100µl du réactif de Folin-ciocalteu. Après 5 à 8 minutes, un volume de 300µl d'une solution de carbonates de sodium (Na_2CO_3) (30mg/ml) est additionné au milieu réactionnel.

Après 2 heures d'incubation à température ambiante, l'absorbance des échantillons (de couleur bleue) est mesurée à 765 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV.

La concentration des polyphénols totaux est calculée à partir de l'équation de régression de la gamme d'étalonnage établie avec l'acide gallique et elle est exprimée en milligramme (ou en µg) équivalent d'acide gallique par gramme (ou milligramme) du poids frais des feuilles de pomme de terre (mg EAG/g d'extrait ou µg EAG/mg d'extrait).

II.5.2.2. Détermination de la teneur en flavonoïdes

La teneur en flavonoïdes des extraits a été déterminée selon le protocole de [Zhishen et al. \(1999\)](#). Un mélange de 500µl d'extrait éthanolique de feuilles fraîches de *Solanum tuberosum* et 2ml d'eau distillée ont été ajoutés à 150µl de nitrates de sodium (NaNO_2 5%). Après incubation de 5 minutes à température ambiante, 150µl de trichlorure d'aluminium (AlCl_3 à 10 %) ont été additionnés et mélangés vigoureusement. Après 6 minutes d'incubation, un autre volume de 2ml de NaOH à 4% a été ajouté au milieu. Le volume total de la solution est complété jusqu'à 5ml par l'eau distillée, et laissée incuber pendant 15 minutes. L'absorbance de la solution est lue à 510 nm et l'estimation de la concentration en flavonoïdes est faite en se référant à une courbe d'étalonnage préparée avec la quercétine.

La teneur en flavonoïde est exprimée en mg équivalent de quercétine par gramme de matière fraîche (mg EQ/g MF).

II.5.2.3. Détermination de la teneur en sucres solubles

La teneur en sucres solubles a été déterminée par la méthode de [Dubois et al. \(1956\)](#). Cent milligrammes de feuilles fraîches a été mélangé avec une aliquote de 3 ml de méthanol (80%) dans des tubes en verre recouvert et incubés à température ambiante pendant 24 h. Après l'incubation, les échantillons ont été centrifugés pendant 10 min à 4000 rpm. Une aliquote d'un millilitre de l'extrait a été mélangée avec 0,5 ml de phénol à 5 % et 2,5 ml d'acide sulfurique concentré. Après agitation, les tubes ont été chauffés pendant 10 à 20 min au bain-marie à 30 °C. Une fois l'extrait refroidi, son absorbance a été déterminée à 490 nm en utilisant du D-glucose comme standard.

II.5.3. Détermination de l'activité enzymatique antioxydants

II.5.3.1. Préparation des extraits enzymatiques

Les échantillons de feuilles fraîches de pomme de terre (150 mg) ont été homogénéisés dans 3 ml de tampon de phosphate 50 mM (pH 7,8) contenant 1 mM d'acide éthylène-diamine-tétra-acétique (EDTA) et 1% (p/v) de polyvinylpyrrolidone (PVP) en utilisant un mortier et un pilon pré-refroidis. L'extrait des feuilles obtenues ont été centrifugés à 13 000xg pendant 20 minutes à 4 °C. Le surnageant a été recueilli, aliquoté et stocké à -80 °C pour des analyses enzymatiques ultérieures.

II.5.3.2. Détermination de l'activité ascorbate peroxydase APX

L'activité ascorbate peroxydase (APX, EC 1.11.1.11) a été déterminée selon la méthode décrite par [Nakano and Asada \(1981\)](#). Le mélange réactionnel de volume total de 3 ml est préparé contenant 50 mM de tampon de phosphate de potassium (pH 7.0), 0.1 mM d'EDTA, 0.5 mM d'acide ascorbique, 0.1 mM de H₂O₂ et 100µL d'extrait enzymatique. L'absorbance a été enregistrée à 290 nm (coefficient d'extinction 2.8 mM⁻¹cm⁻¹). L'activité spécifique de l'enzyme est exprimée par µmol d'ascorbate oxydé par min par mg de protéines.

II.5.3.3. Détermination de l'activité de la catalase (CAT, EC 1.11.1.6)

L'activité catalase (CAT, EC 1.11.1.6) a été déterminée par la diminution de l'absorbance à 240 nm pendant 1 min lorsque H₂O₂ a été consommé selon la méthode d'[Aebi \(1984\)](#). Le mélange réactionnel contient 25 mM de tampon phosphate (pH 7,0) et 2 mM de H₂O₂. La réaction a été déclenchée par l'ajout de 100 µl d'extrait enzymatique. La solution enzymatique contenant le tampon phosphate sans H₂O₂ a servi de témoin. La diminution de l'absorption a été enregistrée à intervalles réguliers de 30 secondes à 3 minutes par un spectrophotomètre à 240 nm, et exprimée en nmol de H₂O₂ décomposé min⁻¹ .mg⁻¹ de protéines.

II.5.3.4. Détermination de l'activité du L-Phénylalanine ammonia lyse (PAL, EC 4.3.1.5)

L'activité de la phénylalanine ammonia lyase (PAL, EC. 4.3.1.5) a été estimée en utilisant la méthode de [Beaudoin-Eagan and Thorpe \(1985\)](#). Le mélange réactionnel, de volume final de 1mL, contient 500 µmol de tampon Tris-HCl (pH 8), 100 µL de préparation enzymatique et 6 µmol de L-phénylalanine.

La réaction enzymatique a été démarrée par l'ajout d'extrait enzymatique et après incubation pendant 60 min à 40 °C, les réactions ont été arrêtées par l'ajout de 50 µL de HCl 5 N. Les quantités d'acides trans-cinnamique et p-coumarique formées ont été déterminées en mesurant

l'absorbance à 290 et 333 nm, respectivement, contre un mélange identique dans lequel la D-phénylalanine a été substituée à la L-phénylalanine et la D-tyrosine à la L-tyrosine. L'activité enzymatique a été exprimée en nmoles (cinnamique ou acide coumarique) mg de protéine⁻¹ min⁻¹, où 1 U est défini comme 1 nmole (acide cinnamique ou coumarique) mg de protéines⁻¹ min⁻¹.

II.5.4. Détermination de l'activité de piégeage des radicaux FRAP et DPPH

Le radical diphénylpicrylhydrazyle (DPPH) a été estimé selon [Shimada et al. \(1992\)](#). Une aliquote de 500 µl d'extrait foliaire (l'extrait méthanolique) est ajouté à 2.5 ml de DPPH (0.1mM), et incubée à une température ambiante pendant 50 min à l'obscurité. L'absorbance des échantillons est mesurée à 593 nm.

L'activité de piégeage des radicaux libres est calculée comme suit :

$$\% \text{ de piégeage des radicaux} = 1 - (A_{517} \text{ échantillon} / A_{517} \text{ blanc}) \times 100.$$

Le dosage du pouvoir antioxydant réducteur ferrique (FRAP) a été déterminé par la méthode de [Rosales et al. \(2006\)](#). Une aliquote de 200µL d'extrait des feuilles été ajoutée à 2 mL du réactif FRAP (1 mM 2,4,6-tripiridyl-2-triazine (TPTZ) et 20 mM FeCl₃ dans 0.25 M CH₃COONa (pH 3.6)). Les absorbances ont été mesurée à 593 nm. Les résultats ont été calculés à l'aide d'une courbe standard préparée avec du sulfate fer d'ammonium (25–1600 µM Fe³⁺) fraîchement préparé.

II.5.5. Détermination de la teneur en malondialdéhyde (MDA)

La teneur en MDA a été déterminée dans les tissus végétaux par la réaction à l'acide thiobarbiturique (TBA) selon la méthode de [Heath and Packer \(1968\)](#). Un échantillon de 250 mg de feuilles fraîches a été mélangé avec 5 ml d'acide trichloroacétique (TCA) à 0.1 %. Le mélange a été centrifugé à 12000 xg pendant 15 min. À 1 ml d'aliquote du surnageant, 4 ml de TCA à 20% comprenant 0.5% de TBA ont été ajoutés, chauffés à 95 ° C pendant 30 min, puis rapidement refroidis dans un bain de glace et centrifugés à nouveau à 10 000 x g pendant 10 min. L'absorbance du surnageant a été mesurée à 532 nm et la valeur de l'absorbance non spécifique à 600 nm. La teneur en MDA a été calculée au moyen d'un coefficient d'extinction de 155 mM⁻¹ cm⁻¹.

II.5.6. Détermination de la teneur en peroxyde d'hydrogène (H₂O₂)

L'accumulation de H₂O₂ dans les feuilles a été détectée selon la méthode de [Velikova et al. \(2000\)](#). Dans un bain de glace, les tissus foliaires (70 mg) sont homogénéisés avec 5 ml TCA à 0,1%. L'homogénat est centrifugé à 12 000x g pendant 15 min, et 0.5 ml du surnageant

a été ajouté à 0.5 ml de tampon de phosphate de potassium 10 mM (pH 7.0) et 1 ml de 1 M KI. L'absorbance a été lu à 390 nm. La teneur en H₂O₂ a été calculée à partir d'une courbe d'étalonnage standard préalablement réalisée en utilisant différentes concentrations de H₂O₂ exprimée en $\mu\text{mol. g}^{-1}$ MF.

II.5.7. Détermination de la teneur en antioxydant non enzymatique

II.5.7.1. Mesure de la teneur en proline

La teneur en proline a été estimée par la méthode décrite par [Bates *et al.* \(1973\)](#). Des feuilles fraîches de la pomme de terre (100 mg) sont homogénéisées dans 10 ml d'acide sulfosalicylique aqueux à 3 %, puis l'homogénat est filtré. Deux ml de filtrat sont ajoutés à 2 ml ninhydrine et 2 ml d'acide acétique glacial dans un tube à essai de 10 ml pendant 1 h à 96°C. La réaction est stoppée par un bain de glace. Le mélange réactionnel a été extrait avec 4 ml de toluène, et mélangé à l'aide d'un vortex pendant 15-20 s. Après 1 h, le toluène est ajouté et l'absorbance à 520 nm est mesurée par un spectrophotomètre UV- visible. La courbe standard de la proline est préparée par la proline.

II.5.7.2. Détermination des thiols totaux

Les teneurs totales en thiols, et en thiols non protéiques des homogénats ont été mesurées en utilisant le réactif d'Ellman - 5,5'-dithio-bis-(acide 2-nitrobenzoïque) (DTNB) selon la méthode de [Sedlak and Lindsay \(1968\)](#).

Les plantules traitées ont été homogénéisées dans 20 mM EDTA dans des conditions froides. Des aliquotes de 500 μL sont mélangées avec 1.5 ml de tampon Tris 200 mM (pH 8.2) et 100 μL DTNB à 10 mM. Le mélange est porté à 10 ml par l'ajout de 7.9 ml de méthanol absolu. Le développement de la couleur s'effectue pendant 15 minutes. L'absorbance du surnageant clair est lue à 412 nm ($\epsilon = 13\ 100\ \text{mM}^{-1}\ \text{cm}^{-1}$).

II.6. Analyses physiques et chimiques du sol

II.6.1 Répartition granulométrique

La distribution granulométrique a été analysée par granulomètre laser après oxydation de la matière organique avec 5% H₂O₂ ([Muggler *et al.*, 1997](#)) et une dispersion physique aux ultrasons.

II.6.2 Caractéristiques chimiques des échantillons de sol

Le pH dans l'eau, les teneurs en Al, Mg et Ca et la conductivité électrique ont été déterminés selon la méthodologie décrite par [Tedesco *et al.* \(1995\)](#).

II.6.3. Teneur totale en carbone organique, azote total et matière organique

Les échantillons ont été soumis à un traitement HCl 1:1 afin d'éliminer les carbonates. La quantification du carbone organique total (TOC) et de l'azote total (TN) a été réalisée par combustion sèche à l'aide de l'analyseur élémentaire Flash EA 1112 (Thermo Finnigan, Milan, Italie). La teneur en matière organique du sol (MOS) a été estimée en multipliant la teneur en TOC par le facteur 1.724.

II.6.4. Teneur en éléments nutritifs dans les échantillons de sol

Le phosphore disponible a été extrait selon la méthodologie décrite par Hedley *et al.* (1982) avec des modifications de Condron *et al.* (1985), tandis que le phosphore contenu dans la biomasse microbienne était extrait selon Hedley et Stewart (1982); Brookes *et al.* (1984); Morel *et al.* (1994), tous deux déterminés par la méthode de Murphy and Riley (1962). Les éléments minéraux du sol (K, Na, NH₄, NO₃, Mn et Cu) ont été extraits et dosés selon la méthodologie décrite par Tedesco *et al.* (1995).

II.7. Analyses microbiologiques

II.7.1. 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 $1/10^{\circ}$ 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).

II.7.2. Dénombrement de la microflore totale

II.7.2.1. 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 2). 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.

II.7.2.2. 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 boîtes de pétri.

Trois boîtes 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 boîtes 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 boîtes (Dictor, 1994).

II.7.2.3. 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 boîtes ensemencées 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 boîtes (Dictor, 1994).

II.7.2.4. 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 béciers 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 fumigé et celui non fumigé.

II.8. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel SPSS (IBM SPSS Statistics, version 22.0) en utilisant une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA), suivie du test post-hoc de Tukey pour les comparaisons statistiques. La valeur de $p < 0.05$ représente une différence significative.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Analyses biochimiques

III.1. 1. Effet des pesticides sur les paramètres de croissance

Les résultats obtenus (Tableau 5) des paramètres de croissance n'ont montré aucun effet significatif des différentes doses de pesticides sur la croissance végétative tel que le nombre de tiges/plante par rapport au témoin non traité, on note également une augmentation de 10% de la surface foliaire pour la dose agronomique (DA) et une légère diminution pour la double dose (DDA) par rapport au témoin. D'autre part la hauteur des plantes au stade initial a augmenté de 34% et 30% pour les deux doses DA et DDA, respectivement. Aussi, on enregistre une augmentation significative de la hauteur au stade final avec 40% et 37% pour les deux doses DA et DDA respectivement.

Tableau 5: Effets des différentes doses de pesticides sur les paramètres de croissance

	Stade initial de croissance			Stade final de croissance		
	Surface foliaire (cm ²)	Nombre de tiges/plante	Hauteur de la plante (cm)	Surface foliaire (cm ²)	Nombre de tiges/plante	Hauteur de la plante (cm)
Control	25.12 ± 6.25 ^a	2.66 ± 0.25 ^a	13.08 ± 2.79 ^a	49.22 ± 8.86 ^b	2.66 ± 0.25 ^b	16.08 ± 2.89 ^b
DA	27.74 ± 4.17 ^a	2.53 ± 0.55 ^a	17.55 ± 1.53 ^a	52.94 ± 5.73 ^b	2.53 ± 0.55 ^b	22.55 ± 1.53 ^c
DDA	24.97 ± 2.88 ^a	2.66 ± 0.25 ^a	16.95 ± 1.30 ^a	49.12 ± 4.03 ^b	2.66 ± 0.25 ^b	21.95 ± 1.30 ^c

DA, dose agronomique de pesticide ; DDA, double dose agronomique de pesticide. Chaque valeur est la moyenne ± SD de 3 répétitions. Les valeurs dans les colonnes suivies de différentes lettres minuscules sont significativement différentes à $p < 0.05$

Les mesures du nombre de tubercules/plant, du poids des tubercules/plant (Kg) et du rendement total/hectare (tonne) des plants de pommes de terre traités avec DA et DDA ont montré une augmentation significative ($p < 0.05$) des rendements de pommes de terre pour DA et DDA par rapport au contrôle. Le nombre de tubercules augmente de 32% et 18% pour DA et DDA respectivement et avec 130% et 83% pour DA et DDA de poids des tubercules/plante ainsi que 112% et 83% pour DA et DDA de rendement total /hectare (Tableau 6).

Tableau 6 : Effets des différentes doses de pesticides sur le nombre de tubercules/plant et le rendement total/plant (kg) et le rendement total/hectare (t/ha) de pomme de terre

Parameters	Controle	DA	DDA
Nombre de tubercules /plant	6.35 ± 0.91 ^a	8.38 ± 0.24 ^b	7.49 ± 0.99 ^{ab}
Poids des tubercules /plant (kg)	0.47 ± 0.03 ^a	1.08 ± 0.01 ^b	0.86 ± 0.03 ^c
Rendement total /hectare (t/ha)	13.59 ± 1.03 ^a	28.81 ± 3.32 ^b	24.85 ± 1.10 ^b

DA, dose agronomique de pesticide ; DDA, double dose agronomique de pesticide. Chaque valeur est la moyenne ± SD de 3 répétitions. Les mêmes lettres n'indiquent aucune différence significative à $P < 0.05$.

III.1.2. Effet de l'application de pesticides sur la teneur en pigments photosynthétiques

L'effet des pesticides sur la chlorophylle a, b, totale et les caroténoïdes a été testé sur des feuilles de plants de pomme de terre. Les pigments photosynthétiques étaient sensibles au stress des pesticides, la teneur en chlorophylle (a) a diminué de 19% et 25% pour DA et DDA respectivement par rapport au témoin au stade initial de croissance. Cependant, au stade de croissance final, l'augmentation la plus élevée de la teneur en chlorophylle (a) a été observée pour le DDA de 20 % par rapport au témoin. En réponse au stress des pesticides, une réduction significative de la chlorophylle (b) a été enregistrée avec les concentrations recommandées de pesticides DA de 35 % au stade initial par rapport au témoin. Au stade de croissance final, une augmentation significative de la chlorophylle (b) sous l'application du DDA a été constatée de 227 % par rapport au témoin (Tableau 7).

L'application des concentrations de pesticides (DA et DDA) a montré des diminutions de la teneur en caroténoïdes de 14 % et 32 % pour la DA et le DDA respectivement par rapport au témoin du stade initial. Cependant, la tendance des caroténoïdes a augmenté de manière significative pour les deux doses DA et DDA de 307 % et 75 %, respectivement, par rapport au témoin au stade final de croissance. Tous les pesticides avec des doses différentes comme DA et DDA ont réduit de manière significative la concentration de chlorophylle totale au stade initial de 33% et 30% respectivement par rapport au témoin. Cependant, les niveaux de chlorophylle totale ont été améliorés de manière non significative pour la DA et le DDA de 43 % et 53 % respectivement par rapport au témoin (Tableau 7).

III.1.3. Effet de l'application de pesticides sur les teneurs totales en flavonoïdes et en phénols

Dans cette étude, la teneur en flavonoïdes a augmentée au cours des deux stades. Nous avons enregistré une augmentation des teneurs de flavonoïdes de 80% et 160% pour la DA et le DDA respectivement au stade initial de croissance par rapport au témoin et de 123% et 293 % pour les deux doses, respectivement au stade final de croissance par rapport au témoin. Les résultats obtenus dans la présente étude ont révélé que le taux de composés phénoliques totaux s'améliorait dans les deux stades de croissance avec 39% et 108% pour la DA et le DDA respectivement de l'étape initiale par rapport au témoin, et avec 22% et 60,20% pour la DA et le DDA respectivement de la phase finale. Cependant, ces résultats ont montré des niveaux significatifs de composés phénoliques chez les plantes traitées avec le DDA au cours des deux stades de croissance (Tableau 7).

Tableau 7 : Effets des pesticides sur les teneurs en chlorophylle a, b, caroténoïdes et chlorophylle totale, teneurs en composés phénoliques et sucres solubles des plants de pomme de terre

Paramètres	Stade initial de croissance			Stade final de croissance		
	Control	DA	DDA	Control	DA	DDA
Chlorophylle a ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW)	767 ± 6 ^a	621 ± 82 ^b	574 ± 98 ^b	282 ± 29 ^c	240 ± 26 ^c	301 ± 40 ^c
Chlorophylle b ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ MF)	1384 ± 17 ^a	1038 ± 296 ^b	916 ± 214 ^b	202 ± 15 ^c	217 ± 21 ^c	221 ± 151 ^c
Caroténoïdes ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ MF)	88.32 ± 1.13 ^a	76.32 ± 7.81 ^a	60.56 ± 23.34 ^a	6.82 ± 1.05 ^b	27.79 ± 0.17 ^c	11.98 ± 3.91 ^d
chlorophylle t ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ MF)	2180 ± 11 ^a	1766 ± 256 ^b	1512 ± 317 ^b	225 ± 78 ^d	285 ± 87 ^d	281 ± 38 ^d
Flavonoïdes (μg EQ/g MF)	22.05 ± 10.39 ^a	39.70 ± 22.87 ^a	57.35 ± 14.55 ^a	35.58 ± 4.57 ^b	79.41 ± 2.94 ^c	140.19 ± 28.56 ^d
Phénols total mg GAE/g MF)	17.90 ± 3.65 ^a	24.96 ± 9.86 ^{ab}	37.20 ± 5.24 ^b	3.43 ± 0.32 ^c	4.20 ± 1.01 ^{cd}	5.50 ± 0.65 ^d
Sucres solubles (g/g MF)	0.061 ± 0.009 ^a	0.137 ± 0.059 ^a	0.081 ± 0.001 ^a	0.245 ± 0.001 ^b	0.249 ± 0.010 ^b	0.243 ± 0.002 ^b

DA, dose agronomique de pesticide ; DDA, double dose agronomique de pesticide ; mg GAE/g PF, mg d'équivalents acide gallique par gramme de poids frais ; μg EQ/g PF, μg équivalent quercétine par gramme de poids frais. Chaque valeur est la moyenne ± SD de 3 répétitions. Les mêmes lettres n'indiquent aucune différence significative à $p < 0.05$ et les différentes lettres minuscules sont significativement différentes à $p < 0.05$

III.1.4. Effet de l'application de pesticides sur l'activité enzymatique antioxydante

L'activité APX a montré une tendance de variation significative de la DA et pour le DDA pour les deux stades de croissance par rapport au contrôle (Tableau 9). Une augmentation significative de l'activité a été observée au stade de croissance final pour la DA et le DDA de 130 %, 175 % respectivement. L'activité CAT a présenté une réponse similaire lors de l'exposition aux pesticides pour les deux stades de croissance. Une amélioration de l'activité CAT a été enregistrée au stade final de croissance de 67% et 122% pour la DA et le DDA respectivement par rapport au témoin. Par contre l'activité PAL a enregistré des valeurs élevées pour DDA de 127 % au stade initial et de 100 % au stade final (Tableau 8).

Tableau 8 : Effets des pesticides sur les enzymes antioxydantes des plants de pomme de terre

Activités enzymatiques (mM.min ⁻¹ .mg ⁻¹ deprotéine)	Stade initial de croissance			Stade final de croissance		
	Control	DA	DDA	Control	DA	DDA
CAT	0.006±0.001 ^a	0.007±0.001 ^a	0.017±0.001 ^b	0.006±0.001 ^a	0.01±0.001 ^{cd}	0.013 ±0.002 ^d
APX	0.072±0.014 ^a	0.039±0.005 ^b	0.099±0.010 ^a	0.033±0.005 ^b	0.077±0.002 ^a	0.092±0.0003 ^c
PAL	1.42 ± 0.30 ^a	1.39 ± 0.27 ^a	3.24 ±0.58 ^b	1.10 ±0.35 ^a	2.23 ± 0.21 ^c	2.13 ± 0.50 ^{b,c}

DA, dose agronomique de pesticide ; DDA, double dose agronomique de pesticide ; CAT, catalase; APX, ascorbate peroxydase; PAL, phénylalanine ammoniac lyase. Les valeurs suivies de différentes lettres minuscules sont significativement différentes à p<0,05

III.1.5. Effet de l'application de pesticides sur les capacités antioxydantes de la pomme de terre

Les plantes ont été examinées pour leurs capacités de piégeage des radicaux par la technique DPPH, largement utilisé pour tester la capacité de piégeage des radicaux libres de divers produits chimiques, et le test FRAP. Dans les deux essais, la capacité antioxydante des feuilles était significativement plus élevée au stade final par rapport au témoin. Cependant, aucune activité significative n'a été notifiée pour les deux doses au stade initial. Les résultats du pouvoir antioxydant réducteur ferrique (FRAP) ont diminué pour les traitements DA et DDA de 7% et 11% respectivement pour le stade initial de croissance, mais ils ont augmenté au stade final avec une capacité antioxydante significative enregistrée à une double dose agronomique de pesticide (DDA) (Tableau 9).

Tableau 9 : Capacité de piégeage des radicaux libres des plants de pomme de terre par les tests DPPH et FRAP.

Capacités antioxydantes	Stade initial de croissance			Stade final de croissance		
	Control	DA	DDA	Control	DA	DDA
DPPH inhibition (%)	36.65±1.44 ^a	30.80±4.69 ^a	38.38±2.17 ^a	11.84± 8.71 ^b	49.92±7.13 ^c	52.13 ± 2.84 ^c
FRAP activité (µM ferrous equivalent)	82 ±22.62 ^a	76.33±21.12 ^a	73 ±14.14 ^a	220.33±25.38 ^b	255±47.00 ^{bc}	333.33±44.29 ^c

AD, dose agronomique ; ADD, double dose agronomique. Les valeurs suivies de différentes lettres minuscules sont significativement différentes à $p < 0.05$

III.1.6. Effet de l'application de pesticides sur la teneur en malondialdéhyde (MDA), peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), proline et thiols totaux.

Le degré de peroxydation des lipides a été estimé par le dosage du MDA dans les feuilles des plantes. Des niveaux significatifs du MDA ont été mesurés dans les plantes traitées avec les deux doses au stade de croissance initial, mais le niveau de H₂O₂ n'a pas augmenté de manière significative qu'au stade de croissance final des plants de pomme de terre. La proline est considérée comme un marqueur biochimique de la réponse des plantes au stress abiotique. Dans notre étude, des teneurs de proline similaires ont été mesurées dans les feuilles des plantes traitées avec les différentes doses de pesticides pour le stade de croissance initial. Cependant, l'étape finale a montré une valeur élevée de proline pour le DDA de 34% par rapport au témoin. Nos résultats n'ont montré aucun changement significatif de la teneur en thiols pour les deux stades de croissance (Tableau 10).

Tableau 10 : Effets de l'application de pesticides sur la teneur en malondialdéhyde (MDA), le niveau de peroxyde d'hydrogène, la teneur en proline et en thiols totaux des plants de pomme de terre

Antioxydants	Stade initial de croissance			Stade final de croissance		
	Control	DA	DDA	Control	DA	DDA
Non enzymatiques						
Thiols (mM)	43.60 ± 7.38 ^a	35.88 ± 1.97 ^a	38.45 ± 12.37 ^a	84.22 ± 22.20 ^b	83.57 ± 28.99 ^b	83.89 ± 8.32 ^b
Proline (mol/g MF)	4.59 ± 0.92 ^a	4.60 ± 0.96 ^a	4.69 ± 0.92 ^a	9.69 ± 0.83 ^b	9.28 ± 1.40 ^b	13.03 ± 1,70 ^c
MDA (µmol. g MF ⁻¹)	0.08 ± 0.03 ^a	0.28 ± 0.06 ^b	0.82 ± 0.12 ^c	0.511 ± 0.03 ^d	0.54 ± 0.16 ^d	0.66 ± 0.10 ^d
Peroxyde d'hydrogène (µmol H ₂ O ₂ . g MF ⁻¹)	2.66±0.41 ^a	3.14±0.55 ^a	2.08±0.30 ^a	1.83±0.08 ^b	2.32±0.09 ^c	2.29±0.11 ^c

DA, dose agronomique ; DDA, double dose agronomique ; mol/g FW, mol par gramme de poids frais.

Les valeurs suivies de la même lettre n'étaient pas significativement différentes au seuil de signification de 5 %.

III.1.7. Discussion

Les produits agrochimiques contrôlent divers types de maladies pour le maintien de la productivité des cultures (Dhanamanjuri *et al.*, 2013). Cependant l'application aveugle de ces produits agrochimiques cause souvent leur accumulation sélective sur les couches supérieures du sol des champs agricoles (Ahemad, 2011) et réduit leur fertilité (Mahapatra *et al.*, 2019). Leur utilisation excessive entraîne également la contamination de différents milieux, notamment l'air, la terre et l'eau (Craig, 2018; Li, 2018) avec des conséquences néfastes sur la santé humaine et les animaux non ciblées. L'augmentation de l'utilisation de pesticides perturbe plusieurs processus des plantes sur le plan physiologique et biochimiques avec une diminution de la photosynthèse, la stabilité des membranes, production de pigments tels que les hormones et le déséquilibre nutritionnel, inhibition de la réplication de l'ADN, de l'expression des gènes et la division cellulaire (Shakir *et al.*, 2016). L'augmentation du niveau de production des espèces réactives de l'oxygène dans les cellules végétales induit à la fois des réponses génotoxiques, entraînant une cytotoxicité et des dommages à divers composants cellulaires, tels que les protéines, les membranes et les acides nucléiques, résultant finalement une inhibition de la croissance et le développement cellulaires. Les cellules végétales répondent au stress oxydatif induit par les pesticides par l'activation de mécanismes de défense antioxydants (Karuppanapandian *et al.*, 2011), tels que les composants enzymatiques

(superoxyde dismutase, catalase, ascorbate peroxydase et glutathion réductase) et non enzymatiques (phénylpropanoïdes, caroténoïdes, glutathion et proline) pour l'inactivation directe et la détoxification des radicaux libres et leur élimination (Yusuf *et al.*, 2011; Gill and Tuteja, 2010).

Les résultats de tous les paramètres de croissances végétatives mesurées ont montré que la croissance n'était pas affectée par les deux doses de pesticide. La hauteur des plantes n'a montré aucun effet significatif au stade initial de croissance sous les deux applications de pesticides conformément à Wu *et al.* (2004). Cependant, un effet significatif a été enregistré au stade final de croissance par rapport au témoin. Des résultats similaires ont été rapportés par Sharma (2016) qui a mentionné que l'application de pesticides à base de cyperméthrine affecte de manière significative la croissance et la hauteur des plantes de sorte que la plus faible concentration d'application de cyperméthrine stimule la hauteur des plantes, mais à des concentrations plus élevées inhibe tous les paramètres de croissance. En revanche, Gafar *et al.* (2018) ont rapporté que les pesticides Folimat 800 et Icaros appliqués aux doses recommandées et excessives augmentaient la croissance végétative des carottes, mais sans différence entre les deux doses. Alors que nos résultats sont également en concordance avec Yelli *et al.* (2022) qui rapportent que le traitement avec le fongicide oxathiapiproline-famoxadone sur la plante de maïs a un effet significatif sur la hauteur et la croissance des plantes par rapport aux plantes non traitées avec ce fongicide. Les recherches de Sila and Sopialena (2016) montrent que l'application de fongicide a un effet sur l'intensité de la maladie chez les plantes. La maladie dans les feuilles peut perturber les processus photosynthétiques, de sorte que l'absorption et la formation des nutriments nécessaires aux plantes peuvent entraîner une croissance perturbée. En raison de l'application de fongicide, la perte de surface foliaire est moindre. Par conséquent, les processus physiologiques tels que la photosynthèse ne sont pas perturbés.

Dans cette étude, le rendement de la pomme de terre n'a pas été significativement affecté par l'application de dose faible et élevée de pesticides, mais Glover-Amengor and Tetteh (2008) ont rapporté que les doses de pesticides utilisées (applications d'unden et de diathane) affectent les cultures en augmentant le rendement à des concentrations plus faibles et en diminuant à des concentrations élevées. Il est bien noté que le rendement des plantes dépend de l'absorption des nutriments par la racine, mais la dose de pesticide peut influencer la fonction et la santé du sol (Lupwayi *et al.*, 2010).

On a démontré dans notre étude que l'exposition des plants de pommes de terre à de fortes doses de pesticides induisait la production d'espèces réactives de l'oxygène (EROs) et augmentait les activités des enzymes antioxydantes. Les EROs provoquent un stress oxydatif chez les plantes soumises à l'application de pesticides (Sharma *et al.*, 2018b). La défense antioxydante non enzymatique joue également un rôle crucial pour atténuer les effets nocifs des EROs et des dommages oxydatifs, nous avons ensuite comparé les teneurs totales en chlorophylle, caroténoïdes et proline chez le témoin non traité et traité aux pesticides.

La photosynthèse est un processus important pour la croissance et le développement des plantes. Dans cette étude, les teneurs en pigments photosynthétiques ont été perturbées sous les traitements aux pesticides, mais cette exposition a augmenté les teneurs en phénols totaux et en flavonoïdes. Xia *et al.* (2006) ont rapporté que la réduction induite par les pesticides de l'efficacité photosynthétique des plantes en réduisant la conductance des stomates et la génération de stress oxydatif ; et affectent divers processus métaboliques des plantes comme le rendement, les activités enzymatiques, la croissance des racines et la biosynthèse des pigments (Sharma *et al.*, 2016). La diminution de la teneur en chlorophylle et en caroténoïdes au stade de croissance initial des plants de pomme de terre est le premier symptôme de la toxicité des pesticides. Parween *et al.* (2016) ont signalé que l'application d'une dose plus élevée de fongicide (captane) réduit la teneur en chlorophylle et en caroténoïdes des plantes (Shakir *et al.*, 2016). Xia *et al.* (2006) ont montré qu'une diminution notable de la chlorophylle totale et la teneur en caroténoïdes a pu être détectée après des traitements des pesticides tels que le tricyclazole et plethora. Ils indiquent également que l'activité photosynthétique est compromise en présence de niveaux excessifs de pesticides.

Un effet similaire de pesticides a été observé par Shakir *et al.* (2016) sur les pigments photosynthétiques de la tomate, qu'une diminution des concentrations de pigments a été provoquée à des doses plus élevées.

Dans cette présente étude, la diminution de la teneur en chlorophylle peut être due à l'utilisation de métribuzine puisqu'il agit comme un inhibiteur du photosystème II (PSII), qui est situé dans les piles de grana de la membrane thylakoïde des chloroplastes. L'inhibition du PSII par la métribuzine entraîne une forte baisse du CO₂ ainsi que la génération d'espèces réactives de l'oxygène provoquant un stress oxydatif (Noctor *et al.*, 2018).

Les paramètres de dommages oxydatifs ont été représentés sous forme de produits de peroxydation lipidique (biomarqueur MDA) et d'espèces réactives de l'oxygène (peroxyde d'hydrogène). Nos résultats ont montré que le traitement à la fois simple et double dose de pesticides génère une augmentation du niveau de peroxydation lipidique, ils résultats sont en accord avec les conclusions rapportées par [Kaya and Doganlar \(2016\)](#). [Mahapatra et al. \(2019\)](#) ont également rapporté que la teneur en MDA a augmenté significativement suite à l'exposition des semis à des concentrations plus élevées de pesticides.

L'excès du niveau de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dans les cellules végétales conduit à l'apparition d'un stress oxydatif qui désactive les enzymes en oxydant leurs groupements thiol. C'est une molécule impliquée dans la signalisation d'acclimatation déclenchant la tolérance à divers stress biotiques et abiotiques et, à fortes concentrations, il conduit à la mort de la cellule ([Quan et al., 2008](#)). Il a également été démontré que le peroxyde d'hydrogène agit comme un régulateur clé dans un large éventail de processus physiologiques, tels que la sénescence ([Chang-lian et al., 2005](#)), la photo-respiration et photosynthèse, le mouvement stomatique ([Bright et al., 2006](#)), le cycle cellulaire ([Mittler et al., 2004](#)) et la croissance et développement ([Foreman et al., 2003](#)).

Cependant, le niveau de peroxyde d'hydrogène n'augmente de manière significative qu'au stade final de la croissance, dû à l'application du chlorothalonil en accord avec les résultats de [Zhou et al. \(2015\)](#).

Plusieurs enzymes, telles que GPX, SOD, APX et CAT, sont les composants enzymatiques du système de défense antioxydant que l'on trouve dans divers compartiments cellulaires. Chez les plantes soumises à un stress oxydatif, ces molécules antioxydantes enzymatiques sont essentielles au maintien de l'homéostasie cellulaire ([Gill et Tuteja, 2010](#)).

L'ascorbate peroxydase (APX) joue un rôle important dans le recyclage de l'AsA et la réponse au stress environnemental chez les plantes. Nos résultats ont montré une augmentation de l'activité APX à la fois pour la dose agronomique de pesticides (DA) et au double dose agronomique de pesticide (DDA) au stade final des plants de pomme de terre. Ces résultats sont en accord avec [Shakir et al. \(2018\)](#) qui ont rapporté que les pesticides induisaient l'activité APX dans la pousse des plants de tomates traités avec de l'émamectine, de la cyperméthrine et de l'imidaclopride. Des niveaux similaires d'activité CAT ont été détectés dans les feuilles de plantes pour le stade de croissance initial. Les CAT sont des

enzymes contenant de l'hème tétramérique avec le potentiel pour dismuter directement H_2O_2 en H_2O et O_2 , indispensable pour la détoxification des EROs en conditions de stress (Gar and Manchanda, 2009). En revanche, une augmentation significative de l'activité CAT a été observée dans les feuilles de plantes traitées sous DDA au stade final.

Le stress oxydatif causé par l'application de pesticides s'est avéré quelque peu corrélé à l'augmentation de la concentration de pesticides. Parween et al. (2012) ont démontré que l'application foliaire de l'insecticide chlorpyrifos chez *Vigna radiata* L. améliorait l'activité de la catalase. D'autre part, Mahapatra et al. (2019) ont montré également que le traitement des semis de *Trigonella* avec le tricyclazole et pléthore augmentent l'activation des composants enzymatiques (CAT, APX, POD) ainsi que le système de défense antioxydant non enzymatique pour neutraliser les effets des EROs générés via le stress oxydatif.

Les principaux tampons redox cellulaires GSH et ascorbate, ainsi que les caroténoïdes, la proline et les composés polyphénoliques, constituent différentes formes de voies de défense non enzymatiques (Gill and Tuteja, 2010).

La proline est également connue pour son activité antioxydante chez les plantes soumises à des stress abiotiques. Elle est produite et accumulée par les plantes sous stress abiotique, et joue un rôle essentiel pour augmenter la tolérance au stress. La proline est un médiateur de l'ajustement osmotique, et de l'intégrité ainsi que pour la protection de la membrane plasmique, elle est une source de carbone et d'azote et un agent antioxydant éliminant les ROS pendant le stress oxydatif (Hemaprabha et al., 2013). Nos résultats ont montré des niveaux élevés du taux de proline dans les plantes traitées par DDA au stade final de croissance, en accord avec les résultats de Mahapatra et al., (2019).

Les thiols végétaux sont impliqués dans la réponse des plantes à presque tous les facteurs de stress ; leurs accumulation et régulation sont essentiels à la tolérance des plantes au stress (Hernández et al., 2015 ; Touzout et al., 2021).

Le glutathion est un antioxydant clé qui joue un rôle central dans le piégeage des EROs à travers le cycle GSH-ascorbate et en tant que donneur d'électrons au glutathion peroxydase (GPx). C'est la forme de stockage et la forme de transport longue distance du soufre réduit, et participe à la détoxification des métaux lourds et des xénobiotiques (Hernández et al., 2015). Dans la présente étude, une diminution des teneurs en thiols non protéiques lors de l'exposition aux pesticides au cours des deux stades de croissance. Cette

diminution en thiols non protéiques indique que le GSH est utilisé pour détoxifier les xénobiotiques tels que les pesticides via les glutathion S-transférases (GST) (Noctor *et al.*, 2012 ; Touzout *et al.*, 2021).

Les sucres sont considérés comme des molécules biochimiques chargées de fournir suffisamment d'énergie aux plantes et régissent la photosynthèse, la floraison, la sénescence, la respiration et la germination des graines. Nos résultats ont montré que la teneur en sucres n'augmentait pas de manière significative au stade final de la croissance sous traitement phytosanitaire, conformément aux résultats rapportés par Gugala *et al.* (2013) que les herbicides n'avaient aucun effet sur les sucres totaux.

En plus des métabolites primaires, les plantes produisent divers métabolites secondaires qui contribuent à la survie des plantes pendant le stress. Les métabolites secondaires tels que les polyphénols, les flavonoïdes, les caroténoïdes, les acides phénoliques, les terpénoïdes et les alcaloïdes améliorent la survie des plantes en agissant comme antioxydants, en éliminant directement les radicaux libres sous stress environnemental, comme l'exposition aux pesticides (Berni *et al.*, 2019; Pourcel *et al.*, 2007). Les flavonoïdes jouent un rôle majeur dans la croissance des plantes dans plusieurs conditions environnementales défavorables (Gill and Tujeta, 2010). Les flavonoïdes font partie de la famille des polyphénols et possèdent de fortes propriétés antioxydantes. Dans l'étude actuelle, l'augmentation des flavonoïdes et de la teneur totale en phénols totaux peut être due à l'augmentation de l'activité PAL. Kováčik *et al.* (2007) indiquent que les pesticides stimulent la voie des phénylpropanoïdes tandis que l'accumulation de ce métabolite secondaire est une stratégie adaptative et un mécanisme de protection pour faire face au stress provoqué par la surproduction des EROs (Gill and Tuteja, 2010). Nos résultats des teneurs en polyphénols des feuilles de pomme de terre (cultivar Sylvana) sont inférieurs à ceux rapportés par Zarzecka *et al.* (2019) utilisant d'autres cultivars (Bartek, Gawin et Honorata).

Les pesticides stimulent également la biosynthèse phénolique chez les plantes et aide à fournir une résistance contre les effets phytotoxiques du stress abiotique (Sharma *et al.*, 2019 ; Ghasemi *et al.*, 2019; Körösi *et al.*, 2019). Les voies de biosynthèse phénoliques sont également activées dans les plantes poussant dans des conditions de stress phytosanitaire. Cela conduit à une plus grande accumulation de composés phénoliques dans les plantes, qui confèrent une résistance pour survivre contre la toxicité des pesticides (Sharma *et al.*, 2016 ; Mahdavi *et al.*, 2015). La stimulation de la biosynthèse phénolique est due à l'activation

d'enzymes biosynthétiques clés et à la hausse régulation de gènes clés de branche phénylpropanoïde, y compris PAL (Sharma *et al.*, 2016 ; Sharma *et al.*, 2019).

La phénylalanine ammonia-lyase (PAL) est l'enzyme limitant la vitesse de production des composés phénoliques par la voie des phénylpropanoïdes (Kováčik *et al.*, 2007). L'activité PAL a augmenté de manière significative et améliore la tolérance au stress des pesticides par l'accumulation de métabolites secondaires, en particulier les flavonoïdes en tant que piègeurs efficaces des EROs. Kováčik *et al.* (2007) ont montré également qu'une activité accrue de l'enzyme PAL peut être considéré comme un mécanisme important contribuant à l'accumulation croissante de composés phénoliques.

La capacité de piégeage des radicaux libres (DPPH) et le potentiel antioxydant réducteur ferrique (FRAP) ont été utilisés pour évaluer l'activité antioxydante et antiradicalaire potentielle de la pomme de terre. Cette activité a augmenté de manière significative pour les doses DA et DDA du stade de croissance final par rapport au témoin. Nos résultats sont conformes aux études de Radwan (2012), qui ont montré que le cléthodime provoquait une augmentation significative de l'activité antioxydante totale (DPPH) dans les feuilles de maïs (*Zea mays* L.). L'activité du DPPH et celle du FRAP est en corrélation avec la teneur en métabolites secondaires, y compris les flavonoïdes. Les améliorations de la capacité antioxydante des feuilles de pomme de terre exposées aux pesticides peuvent être attribuées à une teneur plus élevée en flavonoïdes, indiquant que la pomme de terre avait une capacité antioxydante plus forte pour éliminer les EROs et atténuer les dommages oxydatifs. L'accumulation accrue de flavonoïdes et une capacité antioxydante plus élevée est une adaptation biochimique utilisée par la pomme de terre pour éviter les dommages oxydatifs, et pourrait être une meilleure tolérance au stress des pesticides.

III.2. Caractérisation physico-chimique des sols

La texture du sol de toutes les parcelles utilisées est sable limoneux communément appelé sol sableux, modérément alcalin avec l'absence d'aluminium (Al) qui confirme la non-toxicité de ces sols. Les concentrations de cation échangeable sous forme de Mg^{+2} sont faibles dans toutes les parcelles. Cependant la teneur du Ca^{+2} fluctue du niveau modéré à très élevé ; modéré pour NC_0D_0 , C_1D_1 respectivement et élevé pour C_0D_0 , C_2D_2 . La conductivité électrique (CE) était inférieure à 4, ce qui indique que le sol est non salin pour toutes les parcelles (Tableau 11).

Résultats et discussion

La teneur en matière organique (MO) était plus faible pour la parcelle non cultivée témoin (NC₀D₀), mais elle augmentait pour la parcelle cultivée témoin (C₀D₀) et cultivée traitée par la première dose (C₁D₁). En revanche, elle diminue avec C₂D₂ (cultivée traitée par la deuxième) par rapport à NC₀D₀. La teneur du carbone organique totale (TOC) était plus faible pour NC₀D₀, modérée pour les autres parcelles (C₀D₀ et C₁D₁). Cependant, elle a diminué avec C₂D₂ par rapport au NC₀D₀. Alors que les teneurs en azote total (NT) étaient plus faibles pour toutes les parcelles (NC₀D₀, C₀D₀, C₁D₁ et C₂D₂) (Tableau 11).

La teneur en éléments nutritifs sous forme de potassium (K) était modérée pour la plupart des parcelles (NC₀D₀, C₀D₀, C₂D₂) ; la teneur du NO₃ était élevée pour NC₀D₀ et modérée pour les trois parcelles C₀D₀, C₁D₁, et C₂D₂. Les teneurs en sodium (Na⁺) étaient plus élevées pour NC₀D₀ et C₀D₀, et modérées pour C₁D₁ et C₂D₂. Par contre, les concentrations en phosphore (P) étaient suffisantes pour NC₀D₀ et C₁D₁, et insuffisantes pour C₀D₀ et C₂D₂ (Tableau 11).

Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques des sols étudiés

	Granulometry			pH H ₂ O	EC	Al	Mg	Ca	P _{ava}	P _{mic}	K	Na	NH ₄	NO ₃	Mn	Cu	NT	COT	MOS
	%			1:1	$\mu\text{s cm}^{-1}$	— $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ —			— mg dm^{-3} —							— g kg^{-1} —		%	
	Sable	Limon	Argile																
C0D0	75.7	14.3	10	7.7	630.5	0	2.5	24	6.4	42.8	22.6	317.1	8.2	27	0.6	0.8	0.708	11.066	1.91
C1D1	80.4	11.1	8.6	7.9	241.5	0	0.2	5.7	16.8	71.8	93.6	177.2	14.2	20	0.1	0.9	0.836	10.942	1.89
C2D2	65.1	20.8	14.1	7.9	225	0	1.2	19.9	11.3	64.6	129.1	141	14.2	14	0.5	1	0.716	7.712	1.33
NC0D0	72	13.2	14.8	7.8	345.9	0	0.2	6.1	15.6	66.4	145.5	219.3	8.6	23.1	0.7	0.8	0.863	8.476	1.46

¹ pH: hydrogen potential, EC: electric conductivity, Al: Aluminum, Mg: magnesium, Ca: calcium, P_{ava}: available phosphorus, P_{mic}: microbial phosphorus, K: potassium, Na: sodium, NH₄: ammonium, NO₃: nitrate, Mn: manganese, Cu: cooper. TN: Total Nitrogen, TOC: Total Organic Carbon, SOM: Soil Organic Matter.

III.3. Communauté microbienne du sol

III.3.1. La densité bactérienne

Nos résultats montrent que les traitements insecticides et fongicides ont induit une diminution significative ($p < 0.001$) du pourcentage de cellules bactériennes de l'ordre de 23% pour la dose recommandée de pesticide à 50% pour la double dose recommandée par rapport au contrôle (Figure 9).

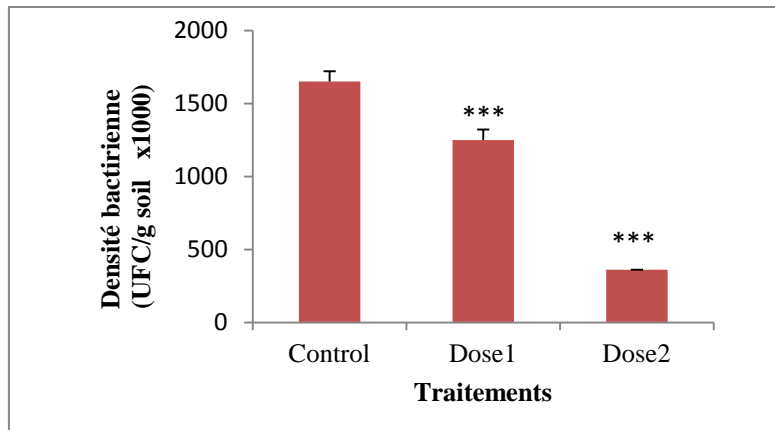


Figure 9 : Effet de différentes doses de pesticides sur la densité bactérienne

III.3.2. La densité fongique

Les fongicides ont eu des effets significatifs sur les microorganismes du sol. Dans le cas des champignons, une diminution significative de leur nombre a été observée par rapport à l'échantillon témoin. Le nombre de champignons a diminué de 56 % et de 91 % pour la dose recommandée et double dose recommandée respectivement par rapport au contrôle (Figure 10).

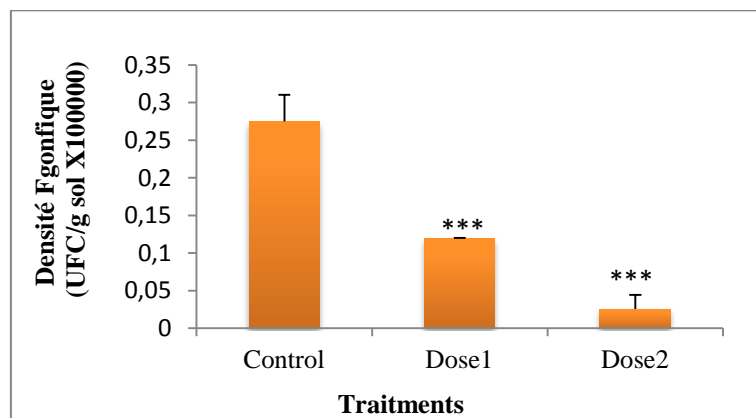


Figure 10 : Effet de différentes doses de pesticides sur la densité fongique

III.3.3. La biomasse microbienne et la microflore totale

Les résultats ont révélé une diminution significative de la biomasse microbienne sous les différentes doses appliquées de pesticides avec respectivement 47 % et 67 % à la dose recommandée et à la double dose recommandée, et pour la microflore totale une diminution de 23 % et 50 % aux deux doses appliquées (Figures 11 et 12).

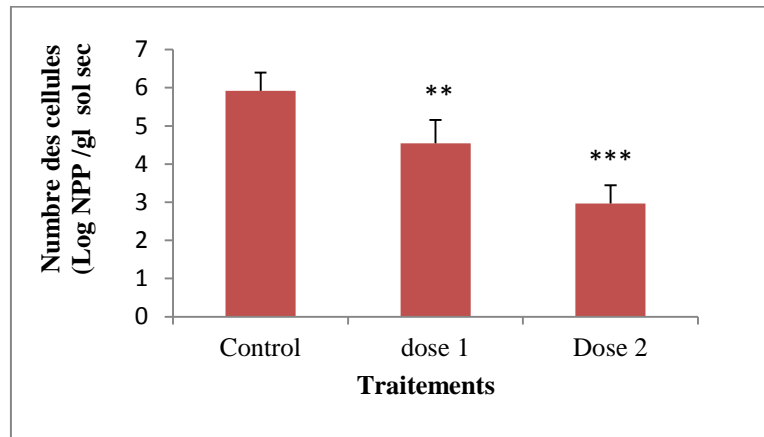


Figure 11 : Effet de différentes doses de pesticides sur la microflore totale

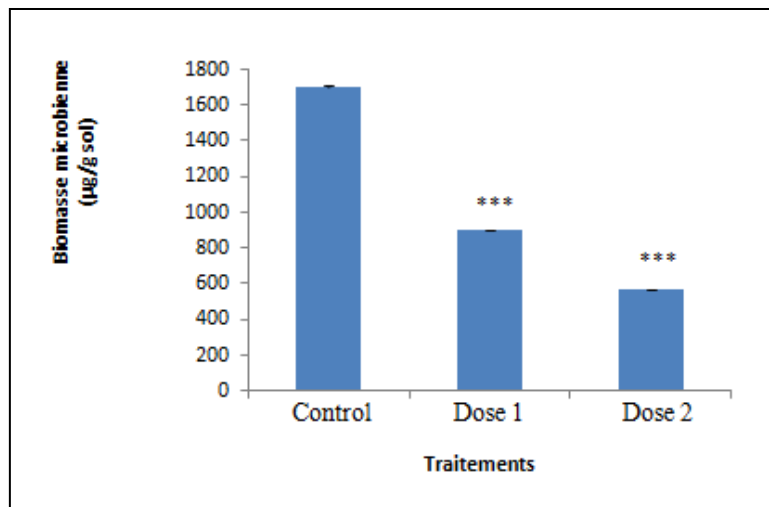


Figure12 : Effet de différentes doses de pesticides sur la biomasse microbienne

III.3.4. Discussion

Les résultats obtenus ont montré que les traitements phytosanitaires (dose agronomique DA et la double dose agronomique DDA) n'affectaient pas le pH du sol et n'avaient pas d'effet significatif sur la conductivité électrique. Cependant les cations échangeables comme Mg^{2+} et Ca^{+2} varient, de sorte que la prédominance de Ca^{+2} traduisant la capacité limitée des sols cultivés à retenir ces cations. Ce changement pourrait s'expliquer par l'interaction entre ces cations et la composition des pesticides. Il est bien connu que les sols

sableux ont une faible capacité de rétention d'eau disponible pour les plantes, une faible rétention des nutriments en raison de la faible capacité d'échange de cations et généralement une faible teneur en matière organique (Nyi *et al.*, 2017).

L'effet de l'application de pesticides sur le sol et son transport dépend de l'impact cumulé des caractéristiques du pesticide (volatilité, vitesse de dégradation, capacité d'adsorption et solubilité), des caractéristiques du sol (texture et matière organique), du mode d'application (aérien ou terrestre) et des conditions du site (topographie, météo et irrigation) (Jeong and Forster, 2003). Les sols à texture grossière, perméables et bien drainés sont moins vulnérables à la salinisation, sous le lessivage et la migration des sels en profondeur. Les sols à texture fine, peu perméables et lourds posent des problèmes d'hydromorphisme et de salinisation. D'autre part, les propriétés du sol telles que la matière organique (MO), le pH et la capacité d'échange cationique (CEC) influençant l'adsorption/désorption des fongicides. Les sols riches en matière organique ou en argile adsorbent davantage les pesticides que les sols sableux grossiers (Boškovic *et al.*, 2020 ; Wu *et al.*, 2018 ; Yuan, 2014). De plus, ces propriétés peuvent également affecter le processus d'absorption du sol (Yue *et al.*, 2017 ; Dong *et al.*, 2013; Ren *et al.*, 2011) de sorte que certains pesticides ont une longue persistance dans le sol (Gao *et al.*, 2008) , et qu'ils peuvent être absorbés par les plantes au cours de leur croissance.

Les processus de minéralisation de l'azote, tels que l'ammonification et la nitrification, sont également affectées par l'application de pesticides, le premier étant moins inhibé car il est réalisé par une grande diversité de microflores. La contamination des sols par les pesticides peut également entraîner l'inactivation de la solubilisation du phosphore (Hussain *et al.*, 2009 a,b). Jonget *al.* (2008) ont rapporté que l'application de 1 % de pesticides par pulvérisation sur le sol induit un effet néfaste avec une diminution de 50 % des organismes du sol (nombre de colonies de micro-organismes, croissance des plantes et mortalité des insectes). Les micro-organismes impliqués dans les processus de formation du sol, la transformation de la matière organique, la stabilisation des agrégats du sol et la circulation des éléments jouent un rôle important dans le maintien d'une fertilité adéquate du sol.

L'infiltration de Fongicide dans le sol peut entraîner la modification de la structure et de la diversité des communautés microbiennes du sol (Imfeld and Vuilleumier, 2012), ainsi que la déstabilisation des écosystèmes du sol en raison de la réduction de l'abondance des micro-organismes (García-Gil *et al.*, 2013 ; Mohiuddin and Mohammed, 2013).

L'abamectine est un composant important qui protège les plantes contre les nématodes parasites qui affectent le système racinaire et les insectes au cours de la phase initiale de croissance des plantes. La persistance de l'abamectine dans l'environnement est modérée. Il se dégrade facilement par les micro-organismes du sol (Khalil, 2013) et peut être influencé par de nombreux facteurs tels que les propriétés du sol, le type et la quantité de micro-organismes dans le sol, le pH du sol et la température (Ali *et al.*, 2012). La demi-vie de l'abamectine sur les cultures peut être de 50% de résidus qui peuvent être éliminés par rinçage (Bai and Ogbourne, 2016).

Campbell (2012) a indiqué que la famille des avermectines comme l'abamectine n'a aucun effet antibactérien ou antifongique. Cependant, il présente une toxicité élevée pour les invertébrés bénéfiques, de sorte que la diminution de la croissance des bactéries et des champignons dans nos échantillons étudiés ne peut pas être due à ce composé.

Le chlorothalonil (2,4,5,6-tétrachlorobenzène-1,3-dicarbonitrile, n° CAS : 1897-45-6) est un fongicide non systémique et foliaire utilisé pour contrôler les champignons imparfaits et les ascomycètes dans une gamme de fruits, légumes et cultures (Wu *et al.*, 2012). Son application a diminué la biomasse fongique et le rapport Gram positif à Gram négatif (Podio *et al.*, 2008).

Wang *et al.* (2011) ont mentionné que la demi-vie de décomposition du chlorothalonil dans le sol variait de 19 à 30 jours. Il est très efficace pour protéger les plantes contre les maladies fongiques générées par *Phytophthora infestans* et *Alternaria solani*, et pour l'inhibition de la germination des spores (Leitao *et al.*, 2014). Elle peut également induire des modifications du nombre et de la biodiversité des microorganismes du sol et conduire à l'inhibition des enzymes responsables de la respiration cellulaire (Shi *et al.*, 2011).

L'utilisation du chlorothalonil à la dose optimale n'a induit aucun changement dans la biologie du sol, mais lorsqu'il est appliqué à des doses multiples, il perturbe le microbiote du sol (Baćmaga *et al.*, 2018). Il est nécessaire d'évaluer l'accumulation de chlorothalonil et son effet sur l'activité microbienne du sol lors d'applications successives, car le fongicide est généralement appliqué de manière répétée 1 à 5 fois la dose recommandée pour la saison ou l'année de croissance (Potter *et al.*, 2001; Chaves *et al.*, 2007).

D'autre part, Chen *et al.* (2001) ont indiqué que le chlorothalonil a un impact significatif sur les taux de nitrification dans le sol et qu'il peut également avoir un effet négatif sur la population des bactéries, des champignons et d'actinobactéries (Yu *et al.*, 2006).

Résultats et discussion

Le métalaxyl [méthyl N-(2, 6-diméthylphényl)-N-(méthoxyacététhyl)-DLalaninate], un fongicide à large spectre, est largement utilisé pour protéger un large éventail de cultures, y compris les cultures horticoles, les légumes et les fruits, contre les dommages causés par les maladies fongiques de la fonte des semis, du mildiou, de la tige, du mildiou et de la pourriture des fruits (Celis *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2014). Le métalaxyl, un fongicide chiral, était largement utilisé pour lutter contre les moisissures et les oomycètes de nombreuses plantes.

Une dose recommandée de métalaxyl appliquée aux sols stimule les bactéries fixatrices d'azote non symbiotiques aérobies et les bactéries oxydantes de thiosulfate qui utilisent la dose recommandée de métalaxyl comme source d'énergie. Cependant la double dose recommandée a un effet significatif d'inhibition de cette bactérie.

Le Cymoxanil est un composé acétamide ayant une activité systémique contre les maladies des plantes causées par des champignons (Ziogas and Davidse, 1987). Il a une très faible activité lorsqu'il est utilisé seul, c'est pourquoi il est généralement utilisé en combinaison avec d'autres fongicides (USEPA, 1998). Dans l'environnement, le cymoxanil se dégrade rapidement dans le sol (dans des conditions de pH neutre et alcalin et dans des conditions aérobies et anaérobies, respectivement) (USEPA, 1998). Il est considéré comme un composé non persistant qui se dégrade rapidement (Álvarez-Martín *et al.*, 2016).

La famoxadone est un fongicide produit par DuPont (États-Unis), utilisé contre plusieurs maladies fongiques sur les légumes-fruits, les mildiou de la pomme de terre et de la tomate (Jordan *et al.*, 2015). C'est le pesticide le plus toxique pour les organismes environnementaux (Xu *et al.*, 2018) et leur dégradation se fait facilement dans le sol. Selon Schilder (2010), les fongicides systémiques sont moins exposés au lessivage, car ils sont absorbés et redistribués par la plante, de sorte qu'ils sont moins influencés par la pluie que les fongicides de contact (Töfolietal., 2014).

La légère diminution des cellules bactériennes a été notée pour les doses recommandées par rapport au témoin qui pourrait s'expliquer par l'application à la fois de Cymoxanyl et de métalaxyl qui stimulent la croissance des bactéries (utiliser comme une source de carbone et d'énergie), mais la diminution la plus élevée a été notée pour la double dose recommandée en raison de l'application de métalaxyl et de chlorothalonil. Aussi, les résultats ont montré une diminution significative du nombre de champignons pour les deux doses appliquées en accord avec les travaux du Xiaoqiang *et al.* (2008) qui ont rapporté que les populations de bactéries,

champignons et actinomycètes étaient significativement réduites sous application de chlorothalonil et que leur inhibition augmente pour le double dosage puis pour le dosage recommandé.

Il a été également mentionné que l'application du composé métalaxyl inhibe les champignons (Sukul *et al.*, 2008). D'autre part, nous affirmons également que la combinaison des deux composés famoxadone et cymoxanil inhibe la croissance des champignons. Nos résultats ont montré que l'accumulation de chlorothalonil, métalaxyl, famoxadone et cymoxanil inhibent les populations de champignons. Les produits phytosanitaires ont des effets négatifs sur le nombre et les fonctions des micro-organismes. La diminution de la biomasse bactérienne et fongique, la modification de l'activité respiratoire du sol, l'influence des enzymes du sol et de la diversité microbienne, ont en outre réduit les taux de renouvellement du carbone et de l'azote (Johnsen *et al.*, 2001; Mokiedje and Spiteller 2002). Cependant, la biomasse fongique est connue pour être une mauvaise source d'azote par rapport aux bactéries, de sorte qu'à des concentrations plus faibles de pesticides servent à être moins toxiques pour la santé du sol et l'inverse avec l'augmentation des concentrations.

Les changements dans les paramètres microbiens du sol, y compris la biomasse microbienne, la diversité génétique et les activités cataboliques, ont été marqués à l'élévation des pesticides tels que insecticide (Ghosh *et al.*, 2004; Pandey and Singh, 2004) et fongicides (Merrington *et al.*, 2002).

La biomasse microbienne est liée à la microflore du sol, y compris les bactéries et les champignons. Nos résultats ont montré une diminution significative de la biomasse microbienne sous les différentes doses de pesticides appliquées avec respectivement 47% et 67% à la dose recommandée et à la double dose recommandée et de 23% et 50% aux deux doses appliquées pour la microflore totale. Chen *et al.*, (2001) ont indiqué que le chlorothalonil influençait de manière significative la biomasse microbienne alors que la respiration du sol diminuait de 30 à 50 %. De plus, l'application de métalaxyl dans le sol influence également la biomasse microbienne totale du sol et l'activité microbienne, tandis qu'une dose plus élevée de métalaxyl a un effet positif sur la teneur en C de la biomasse par rapport à la dose recommandée, de sorte que la diminution de ces paramètres peut être due à l'application des deux composés de chlorothalonil et de métalaxyl.

III.4. L'enquête réalisée auprès des agriculteurs de la wilaya de Mostaganem

III.4.1. Durée d'exercice et d'utilisation des pesticides

Le pourcentage des agriculteurs qui ont moins de six ans d'exercice dans le domaine agricole constitue environ 3% d'effectifs alors que ceux exerçant plus de 6 ans est de 97 %, d'autre part les agriculteurs de < 6ans d'exercice ont un faible pourcentage d'utilisation des pesticides avec 7%, et pour les agriculteurs de > 6ans d'exercice ont un pourcentage très élevé d'utilisation des pesticides de 93% (Figure 13).

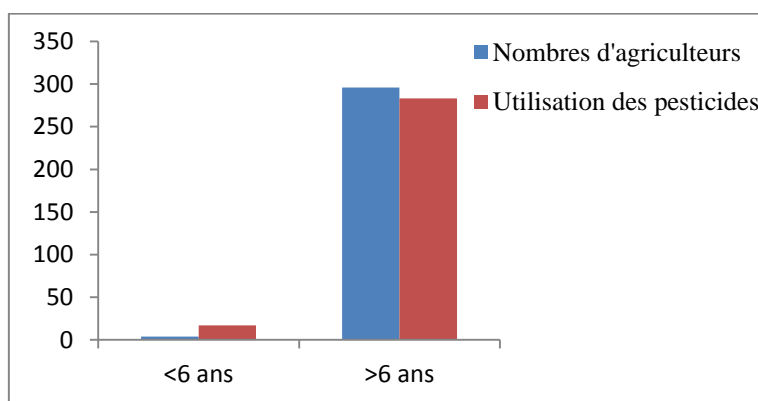


Figure 13 : Durée d'exercice et d'utilisation des pesticides

III.4.2. Différents types de traitements utilisés

Durant notre enquête, nous avons constaté que les agriculteurs enquêtés utilisent surtout les fongicides (33%), les herbicides (32%) en suite vient les insecticides avec 4%, en revanche on remarque un pourcentage important de 31% pour des pesticides utilisés non déterminé (Figure 14).

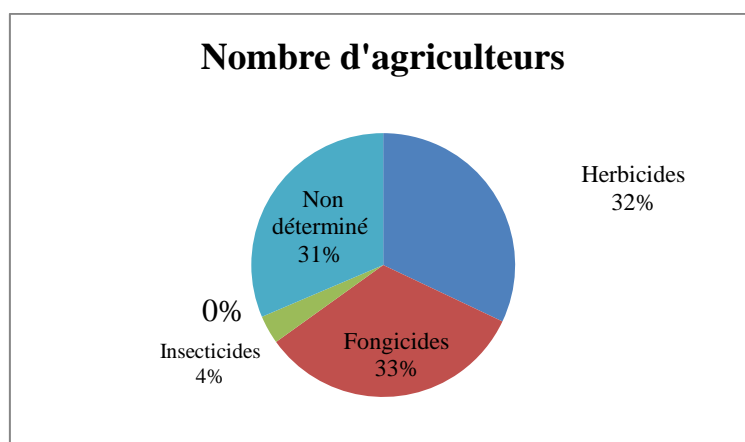


Figure 14 : Le pourcentage des pesticides les plus utilisés par les agriculteurs de la wilaya de Mostaganem

III.4.3. Les différents produits agricoles cultivés et traités avec les pesticides

D'après notre enquête, le produit agricole le plus cultivé avec utilisation de traitements phytosanitaires dans le but de protéger leurs cultures et avoir de bons rendements est la culture de pomme de terre (67%), en suite les légumes avec un pourcentage de 20% et les arbres fruitier (13%) (Figure 15).

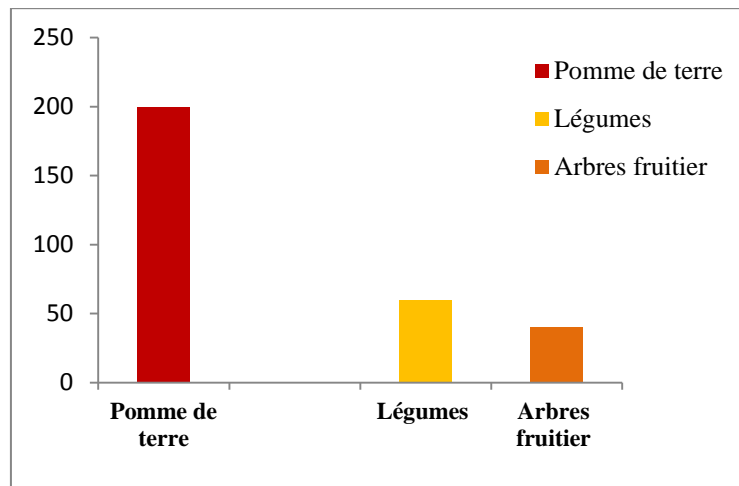


Figure 15 : Produits agricoles cultivés avec utilisation de pesticides

III.4.4. Toxicité des pesticides pour les agriculteurs, consommateurs et différents compartiments de l'environnement

La toxicité des pesticides a montré un pourcentage élevé de 58% pour l'environnement (eau, air, sol, oiseaux, abeille, petits animaux..), et de 27% pour les agriculteurs exposés aux pesticides, en suite un pourcentage de 15% pour les consommateurs de ces produits agricoles traités par les différents types de pesticides (Figure 16).

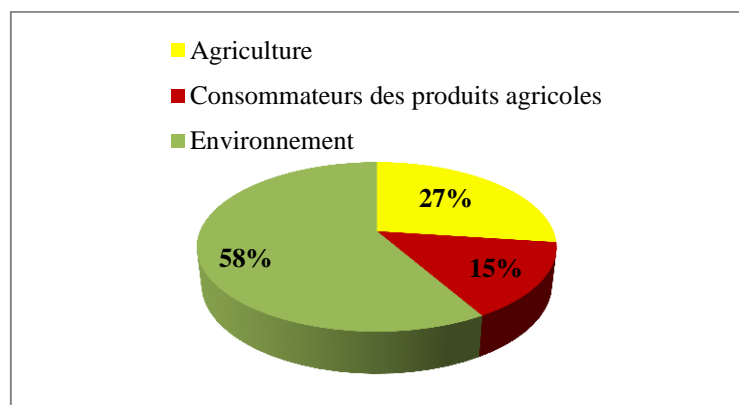


Figure 16 : Toxicité des pesticides

III.4.5. Etat sanitaire

L'utilisation de tout produit chimique peut engendrer des problèmes de santé, soit à court terme ou à long terme. En effet, nous avons enregistré différents cas de réaction suite au contact direct avec les produits phytosanitaires et surtout avec la non utilisation des moyens de protection individuelle.

Après manipulation des produits phytosanitaires plusieurs symptômes peuvent apparaître chez les agriculteurs. D'après les résultats obtenus 85% des agriculteurs n'ont déclaré aucun problème après l'utilisation des pesticides. En revanche, 15% des agriculteurs ont déclaré la survenue de plusieurs symptômes tels que le grattage des yeux avec 5%, grattage de peau avec 8%, et mal de tête avec 2% (Figure 17).

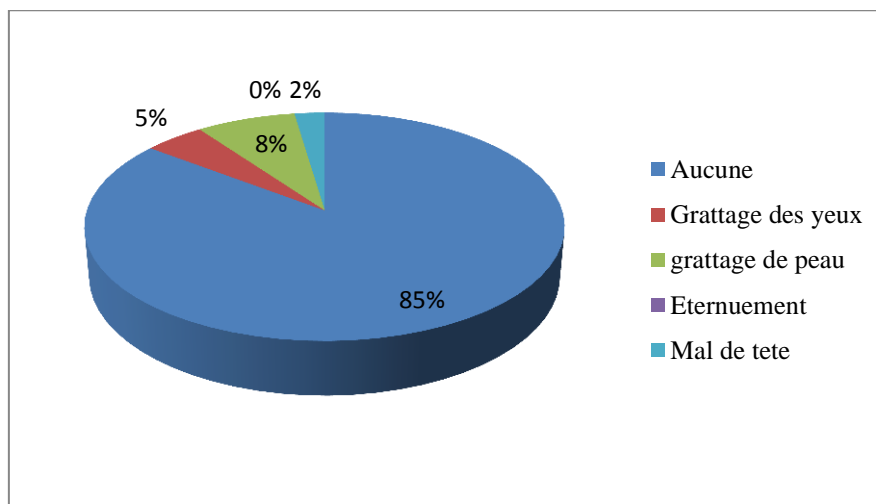


Figure 17 : Signes d'intoxication des pesticides

III.4.6. Niveau de connaissance sur les pesticides

La majorité des agriculteurs enquêtés (69%) ont une faible connaissance sur l'utilisation des pesticides car leur niveau d'études est majoritairement du cycle primaire, et un pourcentage de 31% d'agriculteurs ont de bonne connaissance (expériences du terrain, ingénieurs,...).

III.4.7. Connaissance du danger de l'utilisation des pesticides

D'après les résultats que nous avons obtenus, on remarque que 77% des agriculteurs n'ont pas de connaissance sur le danger de l'utilisation des pesticides à cause de l'absence de formation concernant l'utilisation des produits phytosanitaires, et seulement 23% des agriculteurs enquêtés ont des connaissances sur leur danger. La formations sur le danger de

l'utilisation des pesticides doit normalement être cyclique et périodique, assurée par les sociétés de distribution, la chambre d'agriculture et la direction des services agricoles (DSA).

III.4.8. Equipements de protection

L'utilisation des gants et les masques sont deux mesures de sécurité les moins utilisés par les agriculteurs (16.28%) contre 13.95% d'agriculteurs utilisateurs des moyens de protection.

Aussi, nous avons constaté que 12.79% des agriculteurs ne respectent pas le mode d'emploi des pesticides indiqué dans les étiquettes des sacs et les bouteilles. Le stockage des produits loin des enfants et des aliments est non respecté à 23.26 %, et pour la gestion des sacs et des bouteilles vides à 10.47% (Figure 18).

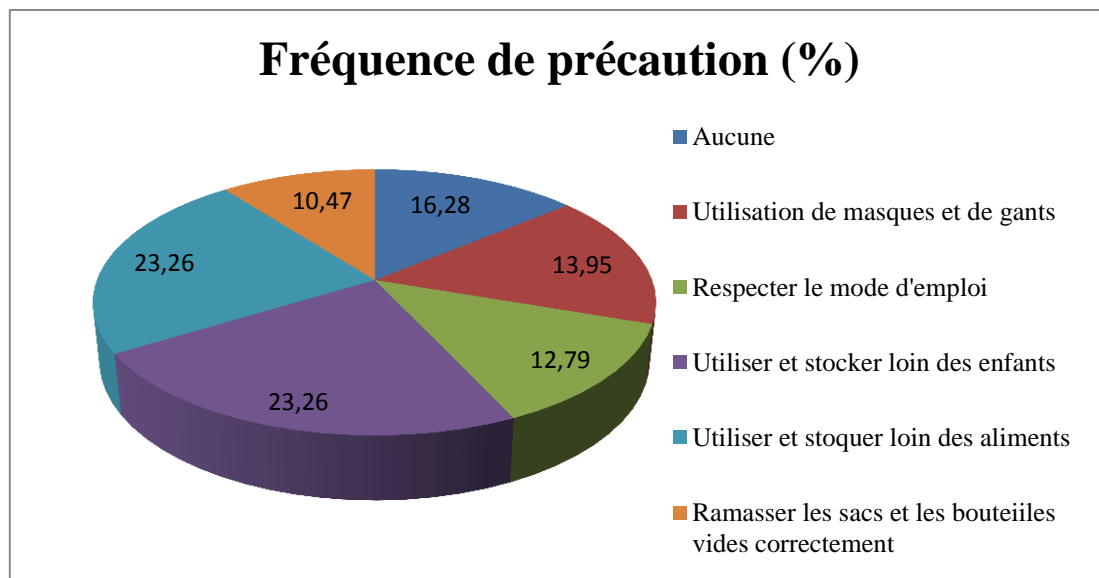


Figure 18 : Précaution lors de l'utilisation des pesticides

III.4.9. Discussion

Les agriculteurs utilisent tous les moyens pour garantir le meilleur rendement en qualité et quantité par l'utilisation des produits phytosanitaires tels que les fongicides, les herbicides, et les insecticides. Les résultats obtenus de notre enquête montrent que la majorité des agriculteurs (16.28%) n'ont pas déclaré aucun problème ou symptôme après utilisation des pesticides. Ces agriculteurs sont les plus exposés à la toxicité des pesticides dès leurs préparations pour les appliquer. Alors que [Ouchebouk and Zibani \(2015\)](#) à Tizi-Ouzou, Boumerdes et Bouira ont rapporté que le mode de préparation de la majorité des bouillies par les agriculteurs est manuelle, confirmé par notre enquête où le grattage des yeux, grattage de peau et mal est courant. D'autre part, [Bonnefoy \(2012\)](#) montre que statistiquement au cours

de la préparation de la bouillie où on a le maximum d'accidents. Dans notre enquête, la majorité des agriculteurs (16.28%) ne se protège pas par des moyens de protection individuelle, alors que pour la gestion des déchets (sacs et bouteilles vides) est anarchique à 10.47 %. [Louchahi \(2015\)](#) remarque que 50% des producteurs abandonnent les emballages dans les champs, d'autres (25% d'agriculteurs) les jettent dans les décharges ou dans les oueds, contre seulement 11% qui brûlent les déchets et 09% les enfouissent.

La plus part des agriculteurs enquêtés ne sont pas formés dans le domaine de l'utilisation des pesticides dont 77 % des agriculteurs n'ont pas de connaissance sur l'utilisation et le danger des pesticides contre seulement 23% qui connaissent le danger. [Souagnbe et al. \(2009\)](#) rapportent que l'absence de formation et d'information des producteurs ainsi que le non respect des cadres légaux relatifs à la commercialisation et l'utilisation des pesticides peuvent endommager la situation sanitaire des populations.

Conclusion et perspectives

Dans la présente étude, nous avons démontré que l'exposition des plants de pommes de terre à de fortes doses de pesticides induit la production des ROS et augmente les activités enzymatiques antioxydantes et l'accumulation de proline soluble. L'application de pesticides a induit une augmentation des composés phénoliques et flavonoïdes qui étaient corrélés à un potentiel antioxydant plus fort et à des teneurs en sucres solubles. Ces réponses biochimiques permettent le développement de stratégies efficaces pour réduire l'effet négatif des pesticides sur la production agricole, la croissance des plantes et la santé humaine.

On a également abordée, l'impact des produits phytosanitaires sur les microorganismes du sol. Les applications de pesticides à fortes doses augmentent la charge chimique du sol et induisent des effets sur les communautés microbiennes du sol et des perturbations sur la fonction des organismes du sol. L'application de deux doses de pesticides (AD, ADD) a des effets significatifs sur la réduction de la croissance bactérienne, fongique ainsi que la microflore du sol et la biomasse microbienne. Par conséquent, une diminution de la productivité du sol et l'accumulation des résidus de pesticides dans les plantes et les sols sera obtenue.

Nos résultats ont permis d'indiquer le mécanisme de réponse des plantes au stress phytosanitaire afin de comprendre l'effet de la phytotoxicité sur les cultures et dérèglement des activités microbiennes. Dans le but d'une agriculture productive, et durable de l'environnement, des études à long terme de l'impact des pesticides sur la phytotoxicité et sur la microbiologie des sols doivent être réalisées.

Retrouvez également des alternatives biologiques que chimiques et sensibiliser les agriculteurs pour l'effet néfaste de l'utilisation des pesticides dans le but de la protection de l'environnement et la santé humaine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abdullah, M.P., Nabhan, K.J., Al-Qaim, F.F., Ishak, A. and Rozali, M., 2017.** Analysis of pesticide residues in water sample: occurrence of pesticides in paddy field. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10(3), pp.1159-1166.
- **Aebi, H., 1984.** Catalase in vitro. *Methods in Enzymology* 105:121-126.
- **Ahemad, M., 2011.** A comparative analysis of Tebuconazole mediated phytotoxicity to legumes. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(6):630-637.
- **Ahire, D.V., Chaudhari, P.R., Ahire, V.D. and Patil, A.A., 2013.** Correlations of electrical conductivity and dielectric constant with physico-chemical properties of black soils. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2): 1-16.
- **Akashé, M.M., Pawade, U.V. and Nikam, A.V., 2018.** Classification of pesticides: A review. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*, 9(4) :144-150.
- **Aktar, M., Paramasivam, M., Sengupta, D., Purkait, S., Ganguly, M. and Banerjee, S., 2008.** Impact assessment of pesticide residues in fish of Ganga river around Kolkata in West Bengal. *Environmental monitoring and assessment*, 157 : 97-104.
- **Aktar, W., Sengupta, D. and Chowdhury, A., 2009.** Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary toxicology*, 2(1) : 1-12.
- **Alamdar, A., Syed, J.H., Malik, R.N., Katsoyiannis, A., Liu, J., Li, J., Zhang, G. and Jones, K.C., 2014.** Organochlorine pesticides in surface soils from obsolete pesticide dumping ground in Hyderabad City, Pakistan: contamination levels and their potential for air soil exchange. *Science of the total environment*, 470 : 733-741.
- **AL-Ani, M.A., Hmoshi, R.M., Kanaan, I.A. and Thanoon, A.A., 2019,** September. Effect of pesticides on soil microorganisms. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1294, No. 7, p. 072007). IOP Publishing.
- **Alengebawy, A., Abdelkhalek, S.T., Qureshi, S.R. and Wang, M.Q., 2021.** Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health
- **Alexandratos, N.; Bruinsma, J., 2012.** World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision, ESA Working paper, Rome, FAO.

Références bibliographiques

- **Ali, S.W., Yu, F.B., Li, L.T., Li, X.H., Gu, L.F., Jiang, J.D. and Li, S.P., 2012.** Studies revealing bioremediation potential of the strain *Burkholderia* sp. GB-01 for abamectin contaminated soils. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(1) : 39-45.
- **Álvarez-Martín, A., Sánchez-Martín, M.J., Pose-Juan, E. and Rodríguez-Cruz, M.S., 2016.** Effect of different rates of spent mushroom substrate on the dissipation and bioavailability of cymoxanil and tebuconazole in an agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 550 : 495-503.
- **Alves, P.R.L., Cardoso, E.J.B.N., Martines, A.M., Sousa, J.P., Pasini, A., 2014.** Seed dressing pesticides on springtails in two ecotoxicological laboratory tests. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 105C, 65–71. doi:10.1016/j.ecoenv.2014.04.010
- **Al-Wabel, M., El-Saeid, M.H., El-Naggar, A.H., Al-Romian, F.A., Osman, K., Elnazi, K. and Sallam, A.S., 2016.** Spatial distribution of pesticide residues in the groundwater of a condensed agricultural area. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2) : 1-10.
- **AMGOUD , H., 2015.** Influence de deux fongicides sur la germination, la croissance et la teneur en proline de quelques variétés de blé. *Memoire de Magester , Sciences Biologiques, Ecologie Végétale Appliquée Et Gestion De L'environnement ,Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou : 95.*
- **Amos-Tautua, B.M., Onigbinde, A.O. and Ere, D., 2014.** Assessment of some heavy metals and physicochemical properties in surface soils of municipal open waste dumpsite in Yenagoa, Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 8(1) : 41-47.
- **Anwar, D., Shabbir, D., Shahid M.H. , & Samreen, W., 2015.** Determinants of potato prices and its forecasting: A case study of Punjab, Pakistan.
- **Araújo, A.S.F., Lima, L.M., Santos, V.M., Schmidt, R., 2016.** Repeated application of composted tannery sludge affects differently soil microbial biomass, enzymes activity, and ammonia-oxidizing organisms. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 67,19193–19200
- **Araújo, A.S.F., Miranda, A.R.L., Oliveira, M.L.J., Santos, V.M., Nunes, L.A.P.L.,**

Références bibliographiques

- Melo, W. J., 2015.** Soil microbial properties after 5 years of consecutive amendment with composted tannery sludge. *Environ. Monit. Assess.* 187, 4153–4160.
- **Arias-Estévez , M., López-Periago, E., Martínez-Carballo, E ., Simal-Gándara, J., Mejuto , JC .,García-Río, L ., 2008.** The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwaterresources.*Agriculture, Ecosystemsand Environment*123, 247-260.
 - **Attard , E., Recous ,S., Chabbi , A., De Berranger , C .,Guillaumaud, N., Labreuche , J et al., 2011.** Soil environmental conditions rather than denitrifier abundance and diversity drive potential denitrification after changes in land uses. *Glob Chang Biol* 17:1975–1989.
 - **Backhaus, T., Faust, M., Scholze, M., Gramatica, P., Vighi, M. and Grimme, L.H., 2004.** Joint algal toxicity of phenylurea herbicides is equally predictable by concentration addition and independent action. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 23(2) : 258-264.
 - **Baćmaga, M., Wyszowska, J and Kucharski, J., 2018.** The influence of chlorothalonil on the activity of soil microorganisms and enzymes. *Ecotoxicology*, 27(9) : 1188-1202.
 - **Bai, S.H. and Ogbourne, S., 2016.** Eco-toxicological effects of the avermectin family with a focus on abamectin and ivermectin. *Chemosphere*, 154 : 204-214.
 - **Ball, B.C and Munkholm, L.J. eds., 2015.** *Visual Soil Evaluation: Realizing potential crop production with minimum environmental impact.* CABI.
 - **Bansal, O.P., 2011.** Fate of pesticides in the environment. *Journal of the Indian Chemical Society*, 88(10): 1525.
 - **Barrios, E ., 2007.** Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecol Econ* 64:269–285.
 - **Barron, M.G., Ashurova, Z.J., Kukaniev, M.A., Avloev, H.K., Khaidarov, K.K., Jamshedov, J.N., Rahmatullova, O.S., Atolikshoeva, S.S., Mamadshova, S.S. and Manzenyuk, O., 2017.** Residues of organochlorine pesticides in surface soil and raw foods from rural areas of the Republic of Tajikistan. *Environmental Pollution*, 224 : 494-502.

Références bibliographiques

- **Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973.** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39(1):205-207.
- **Batsch, D., 2011.** L'impact des pesticides sur la santé humaine. Université Henri Poincaré Nancy1. Thèse de Doctorat : 184.
- **Baumann, K., Dignac, M-F; Rumpel , C; Bardoux, G; Sarr ,A; Steffens, M et al., 2012.** Soil microbial diversity affects soil organic matter decomposition in a silty grassland soil. *Biogeochemistry* 114:201–212.
- **Beaudoin-Eagan, L.D., Thorpe, T.A .,1985.** Tyrosine and phenylalanine ammonia lyase activities during shoot initiation in tobacco callus cultures. *Plant Physiology* 78(3):438-441.
- **Belhadi, A., Mehenni, M., Reguieg, L., & Yakhlef, H., 2016.** Pratiques phytosanitaires des serristes maraichers de trois localités de l'est des Ziban et leur impact potentiel sur la sante humaine et l'environnement. *Revue Agriculture*, 1, 9–16.
- **Bérard, A., Bouchet, T., Sévenier, G., Pablo, AL., Gros, R., 2011.** Resilience of soil microbial communities impacted by severe drought and high temperature in the context of Mediterranean heat waves. *Eur J Soil Biol* 47:333–342.
- **Bernardes, M.F.F., Pazin, M., Pereira, L.C. and Dorta, D.J., 2015.** Impact of pesticides on environmental and human health. *Toxicology studies-cells, drugs and environment* : 195 233.
- **Bernhards, U., 1998.** La pomme de terre solanumtu berosum L. monographie. Institut National Agronomique, Paris-Grignon.
- **Berni, R., Luyckx, M., Xu, X., Legay, S., Sergeant, K., Hausman, J.F., Lutts, S., Cai, G., Guerriero, G., 2019.** Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: Impact on the cell wall and secondary metabolism. *Environmental and Experimental Botany* 161:98-106.
- **Bettiol, W., Ghini, R., 2011.** Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2011, 11. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/212807>. Article ID 212807.
- **Bhatnagar-Mathur, P., et al., 2008.** Transgenic approaches for abiotic stress tolerance in plants: retrospect and prospects. *Plant Cell Rep.* 27, 411–424.

Références bibliographiques

- **Boithias, L., 2012.** Modélisation des transferts de pesticides à l'échelle des bassins versants en période de crue (Doctoral dissertation).
- **Bonnefoy, N., 2012.** Rapport d'information au nom de la mission commune d'information sur les pesticides et leur impact sur la santé et l'environnement. Sénat, session ordinaire de 2012-2013, 42.
- **Bošković, N., Brandstätter-Scherr, K., Sedláček, P., Bílková, Z., Bielská, L. and Hofman, J., 2020.** Adsorption of epoxiconazole and tebuconazole in twenty different agricultural soils in relation to their properties. *Chemosphere*, 261:127637.
- **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 : 144
- **Brander, S.M., Gabler, M.K., Fowler, N.L., Connon, R.E. and Schlenk, D., 2016.** Pyrethroid pesticides as endocrine disruptors: molecular mechanisms in vertebrates with a focus on fishes. *Environmental science & technology*, 50(17) : 8977-8992.
- **Bright, J., Desikan, R., Hancock, J.T., Weir, I.S. and Neill, S.J., 2006.** ABA-induced NO generation and stomatal closure in Arabidopsis are dependent on H₂O₂ synthesis. *The Plant Journal*, 45(1): 113-122.
- **BRooKEs, P.C., Powlson, D.S. and Jenkinson, D.S., 1984.** Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil biology and biochemistry*, 16(2) : 169-175.
- **Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P. and Pulleman, M., 2018.** Soil quality A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120 : 105-125.
- **Calvet, R., 2003.** Le sol, propriétés et fonctions. Tome 1 ; Constituants et structures, phénomènes aux interfaces. Ed France Agricole. INRA, Paris-Grignon : 27-267.
- **Calvet R., Barriuso E., Bedos C., Benoit P., Charnay, M.P et Coquet, Y., 2005.** Les pesticides dans le sol, conséquences agronomiques et environnementales. Edition France Agricole, Paris : 637.
- **Calvet, R., 2000.** Le sol propriétés et fonctions, constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Tome 1. Edition France Agricole. Paris (France) : 83-90

Références bibliographiques

- **Campbell, R.E. and Rouss, J.O., 1961.** Terracing Economics of Iowa Soils. *J. Soil and Water Cons*, 41(1): 49-52.
- **Campbell, W.C., 2012.** Ivermectin and Abamectin. Springer Science & Business Media.
- **Celis, R., Gámiz, B., Adelino, M.A., Cornejo, J. and Hermosín, M.C., 2015.** Effect of formulation and repeated applications on the enantioselectivity of metalaxyl dissipation and leaching in soil. *Pest management science*, 71(11) : 1572-1581.
- **Carvalho, F.P., 2017.** Pesticides, environment, and food safety. *Food and energy security*, 6(2): 48-60.
- **Celis, R., Gámiz, B., Adelino, M.A., Cornejo, J., Hermosín, M.C., 2015.** Effect of formulation and repeated applications on the enantioselectivity of metalaxyl dissipation and leaching in soil. *Pest Manag. Sci.* 71, 1572–1581
- **Chamayou, H. and Legros J.P., 1989.** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol :593 « Presses universitaires de France
- **Chang-lian, P.E.N.G., Zhi-Ying, O.U., Nan, L.I.U. and Gui-zhu, L.I.N., 2005.** Response to high temperature in flag leaves of super high-yielding rice Pei'ai 64S/E32 and Liangyoupeijiu. *Rice Science*, 12(3): 179.
- **Chaves, A., Shea, D. and Cope, W.G., 2007.** Environmental fate of chlorothalonil in a Costa Rican banana plantation. *Chemosphere*, 69(7) : 1166-1174.
- **Chen, S.K., Edwards, C.A. and Subler, S., 2001.** Effects of the fungicides benomyl, captan and chlorothalonil on soil microbial activity and nitrogen dynamics in laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(14) :1971-1980.
- **Cheng, Y., Shi, Z.P., Jiang, L.B., Ge, L.Q., Wu, J.C. and Jahn, G.C., 2012.** Possible connection between imidacloprid-induced changes in rice gene transcription profiles and susceptibility to the brown plant hopper *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae). *Pesticide biochemistry and physiology*, 102(3) : 213-219.
- **Cherian, S., & Oliveira, M. M., 2005.** Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*, 39(24), 9377-9390.
- **Colman, B.P., Schimel, J.P., 2013.** Drivers of microbial respiration and net N mineralization at the continental scale. *Soil Biol Biochem* 60:65–76.

Références bibliographiques

- **Condrón, L.M., Goh, K.M. and Newman, R.H., 1985.** Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, 36(2) : 199-207.
- **Connell, D.W., Connell, D.W., Vowles, P.D., Warne, M.S.J. and Hawker, D.W., 2005.** Basic concepts of environmental chemistry: 480-480. CRC/Taylor & Francis.
- **Craig, K., 2018.** A review of the chemistry, pesticide use, and environmental fate of sulfur dioxide, as used in California. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 246 : 33–64
- **Cycoń, M., Piotrowska-Seget, Z., 2016.** Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils. *Rev. Front. Microbiol.* 7, 1–26.
- **Damalas, C.A. and Eleftherohorinos, I.G., 2011.** Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International journal of environmental research and public health*, 8(5) : 1402-1419.
- **Dang, V.D., Kroll, K.J., Supowit, S.D., Halden, R.U. and Denslow, N.D., 2016.** Tissue distribution of organochlorine pesticides in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) from laboratory exposure and a contaminated lake. *Environmental pollution*, 216 : 877-883.
- **Dang, V.D., Kroll, K.J., Supowit, S.D., Halden, R.U., Denslow, N.D., 2016.** Tissue distribution of organochlorine pesticides in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) from laboratory exposure and a contaminated lake. *Environ. Pollut.* 216, 877e883.
- **Das, S., Hageman, K.J., Taylor, M., Michelsen-Heath, S. and Stewart, I., 2020.** Fate of the organophosphate insecticide, chlorpyrifos, in leaves, soil, and air following application. *Chemosphere*, 243 :125194.
- **de Jong, F.M., de Snoo, G.R. and van de Zande, J.C., 2008.** Estimated nationwide effects of pesticide spray drift on terrestrial habitats in the Netherlands. *Journal of Environmental Management*, 86(4) : 721-730.
- **De, A., Bose, R., Kumar, A. and Mozumdar, S., 2014.** Targeted delivery of pesticides using biodegradable polymeric nanoparticles : 5-6. New Delhi: Springer India.

Références bibliographiques

- **Defoer, T., Budelman, A., Toulimin, C. and Carter, S.E., 2000.** Managing soil fertility in the tropics, Royal Tropical Institute.
- **Dhanamanjuri, W., Thoudam, R. and Dutta, B.K., 2013.** Effect of some pesticides (fungicides) on the germination and growth of seeds/seedlings of some crop plants (ieCicer arietinum and Zea mays). Middle East J Sci Res, 17(5): 627-632.
- **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 : 225
- **DONG, D.M., LAN, X.H., GUO, Z.Y and HUA, X.Y., 2013.** Sorption Kinetics of Organochlorine Pesticides on Three Types of Solids in Natural Waters. Chemical Journal of Chinese Universities.
- **Doran, J.W and Zeiss, M.R., 2000.** Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Applied soil ecology, 15(1) : 3-11.
- **Dosnon-Olette, R., Couderchet, M., El Arfaoui, A., Sayen, S. and Eullaffroy, P., 2010.** Influence of initial pesticide concentrations and plant population density on dimethomorph toxicity and removal by two duckweed species. Science of the total environment, 408(10) : 2254-2259.
- **Doumbouya, M., 2015.** Diagnostic des sol et recommandations potassiques pour la culture de pomme de terre en sol minéral. Mémoire de Master. Université Laval. Canada : 77.
- **Duan, L., Wang, W.K. and Sun, Y., 2013.** Ammonium nitrogen adsorption-desorption characteristics and its hysteresis of typical soils from Guanzhong Basin, China. Asian journal of chemistry, 25(7) : 3850.
- **Duan, L., Zhang, N., Wang, Y., Zhang, C., Zhu, L. and Chen, W., 2008.** Release of hexachlorocyclohexanes from historically and freshly contaminated soils in China: Implications for fate and regulation. Environmental pollution, 156(3) : 753-759.
- **Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F., 1956** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry 28:350–356.
- **Dufour, V., 2017.** Identification des sources en pesticides en contexte urbain et développements d'échantillonneurs passifs de type pocis identification des sources en

Références bibliographiques

pesticides en contexte urbain et développements d'échantillonneurs passifs de type pocis. Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux.

- **Đurišić-Mladenović, N., Škrbić, B. and Cvejanov, J., 2010.** Organochlorine Pesticides in Soil and Sediment from an Urban Zone of Novi Sad, Serbia. In *Survival and Sustainability* : 1469-1481. Springer, Berlin, Heidelberg.
- **Egbuna, C. and Sawicka, B. eds., 2019.** Natural remedies for pest, disease and weed control. Academic Press.
- **FAOstat., 2020** : Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture. Culture ; La pomme de terre. <http://www.fao.org/statistics/fr/.com>. Consulté le:28.02.2020.
- **Farahy, O., Laghfiri, M., Bouriou, M. and Aleya, L., 2021.** Overview of pesticide use in Moroccan apple orchards and its effects on the environment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 19, p.100223.
- **Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L.P., Elsner, M., 2013.** Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. *Science* : 341, 752-758.
- **Fernández, J.M., Plaza, C., García-Gil, J.C., Polo, A., 2009.** Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge. *Appl. Soil Ecol.* 42, 18–24.
- **Fontana, A.R., Lana, N.B., Martinez, L.D. and Altamirano, J.C., 2010.** Ultrasound assisted leaching-dispersive solid-phase extraction followed by liquid-liquid microextraction for the determination of polybrominated diphenyl ethers in sediment samples by gas chromatography-tandem mass spectrometry. *Talanta*, 82(1) : 359-366.
- **Foreman, J., Demidchik, V., Bothwell, J.H., Mylona, P., Miedema, H., Torres, M.A., Linstead, P., Costa, S., Brownlee, C., Jones, J.D. and Davies, J.M., 2003.** Reactive oxygen species produced by NADPH oxidase regulate plant cell growth. *Nature*, 422(6930): 442-446.
- **Fourounjian, P., Fakhoorian, T. and Cao, X.H., 2020.** Importance of duckweeds in basic research and their industrial applications. In *The Duckweed Genomes* : 1-17. Springer, Cham.

Références bibliographiques

- **Gafar, M., HabebAlla, M., Elhag, A., Elfaki, J., 2018** .Residual effect of folimat 800 (organophosphate) and Icaros pesticides on soil fertility and carrot growth. Noble International Journal of Scientific Research 2(2):5-10.
- **Gamet-Payrastre, L ., 2011**. Effets physiopathologiques des mélanges de pesticides. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 46, 82–85. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2011.02.003>
- **Gao, F., Jia, J. and Wang, X., 2008**. Occurrence and ordination of dichlorodiphenyltrichloroethane and hexachlorocyclohexane in agricultural soils from Guangzhou, China. Archives of environmental contamination and toxicology, 54(2) : 155-166.
- **García-Gil, J.C., Kobza, J., Soler-Rovira, P. and Javoreková, S., 2013**. Soil microbial and enzyme activities response to pollution near an aluminium smelter. Clean–Soil, Air, Water, 41(5) : 485-492.
- **Garg, N. and Manchanda, G., 2009**. ROS generation in plants: boon or bane?. Plant Biosystems, 143(1): 81-96.
- **Gavrilescu, M., 2005**. Fate of pesticides in the environment and its bioremediation. Engineering in life sciences, 5(6) : 497-526.
- **Geng, Y., Ma, J., Zhou, R., Jia, R., Li, C. and Ma, X., 2017**. Assessment of insecticide risk to human health in groundwater in Northern China by using the China-PEARL model. Pest management science, 73(10) : 2063-2070.
- **Geny, B., Charles, A.L., Lejay, A and Meyer, A., 2019**. Pollution et stress oxydant. Revue Française d'Allergologie, 59(3) : 174-176.
- **Ghasemi, S., Kumleh, H.H and Kordrostami, M., 2019**. Changes in the expression of some genes involved in the biosynthesis of secondary metabolites in Cuminumcyminum L. under UV stress. Protoplasma, 256(1): 279-290.
- **Ghaste, M., Hayden, N.C., Osterholt, M.J., Young, J., Young, B. and Widhalm, J.R., 2020**. Evaluation of a Stable Isotope-Based Direct Quantification Method for Dicamba Analysis from Air and Water Using Single-Quadrupole LC–MS. Molecules, 25(16) : 3649.

Références bibliographiques

- **Ghedira, K., 2005.** Les flavonoïdes: structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. *Phytothérapie*, 3(4) : 162-169.
- **Ghosh, A.K., Bhattacharyya, P., Pal, R., 2004.** Effect of arsenic contamination on microbial biomass and its activities in arsenic contaminated soils of Gangetic West Bengal, India. *Environ. Int.* 304, 91_499.
- **Gill, S.S. and Tuteja, N., 2010.** Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry*, 48(12): 909-930. (Yusuf et al., 2011 ; Gill and Tuteja, 2010)
- **Glover-Amengor, M., Tetteh, F.M., 2008.** Effect of pesticide application rate on yield of vegetables and soil microbial communities. *West African Journal of Applied Ecology* 12(1). DOI:[10.4314/wajae.v12i1.45749](https://doi.org/10.4314/wajae.v12i1.45749)
- **Gobat, J.M., Aragno, M. and Matthey, W., 2010.** Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.
- **Goh, W. L., Yiu, P. H., Wong, S. C., & Rajan, A., 2011.** Safe use of chlorpyrifos for insect pest management in leaf mustard (*Brassica juncea* L. Coss). *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9, 1064-1066.
- **Gonzales-Quiñones V, Stockdale EA, Banning NC, Hoyle FC, Sawada Y, Wherrett AD, et al., 2011.** Soil microbial biomass - Interpretation and consideration for soil monitoring. *SoilRes* 49:287–304.
- **Grange, d., jean-philippe, c., sabine, h., & isabelle, g., 2008.** Les pesticides : considérations sanitaires. Observatoire régional de santé d'Ile-de-France : 06
- **Gregory, AS., Watts, CW., Griffiths, BS., Hallett ,PD., Kuan, HL.,Whitmore, AP. , 2009.** The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma* 153:172–185.
- **Griebler, C., Avramov, M., 2015.** Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Sci.* 955 34, 355–367. <https://doi.org/10.1086/679903>
- **Griebler, C., Malard, F., Lefébure, T., 2014.** Current developments in groundwater ecology— from biodiversity to ecosystem function and services. *Curr. Opin. Biotech.* 27, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.018>

Références bibliographiques

- **Guenet, B., Lenhart, K., Leloup, J., Giusti-Miller, S., Pouteau, V., Mora, P et al., 2012.** The impact of long-term CO₂ enrichment and moisture levels on soil microbial community structure and enzyme activities. *Geoderma* **170**:331–336.
- **Gugala, M., Zarzecka, K., Sikorska, A., Dołęga, H., 2013.** Changes in sugar content in cultivars potato tubers depending on the weed control methods. *Progress in Plant Protection* **53**:271–275. (In Polish)
- **Haines-Young, R., Potschin, M., 2008.** England's Terrestrial Ecosystem Services and the Rationale for an Ecosystem Approach. Full Technical Report to Defra. Department for Environment Food and Rural Affairs. (Defra) : 89.
- **Halliwell, B., Gutteridge, JMC., 2015.** Free Radicals in Biology & Medicine. Fifth edition. Oxford University Press.
- **Han, D.M., Tong, X.X., Jin, M.G., Hepburn, E., Tong, C.S. and Song, X.F., 2012.** Evaluation of organic contamination in urban groundwater surrounding a municipal landfill, Zhoukou, China. *Environmental monitoring and assessment*, **185**(4) :3413-3444.
- **Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., Close, D., 2013.** Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* **376** (1-2), 347–361.
- **Heath, R.L., Packer, L: 1968.** Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **125**(1):189-198.
- **Hedley, M.J., Stewart, J.W.B and Chauhan, B., 1982.** Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, **46**(5) : 970-976.
- **Helander, M., Saloniemi, I. and Saikkonen, K., 2012.** Glyphosate in northern ecosystems. *Trends in plant science*, **17**(10): 569-574.
- **Hemaprabha, G et al., 2013.** Évaluation du potentiel de tolérance à la sécheresse des génotypes d'élite et des descendants de sucrecane (*Saccharum* sp. hybrides). *Sugar Technol.* **15** (1), 9 16.

Références bibliographiques

- **Hernández, L.E., Sobrino-Plata, J., Montero-Palmero, M.B., Carrasco-Gil, S., Flores-Cáceres, M.L., Ortega-Villasante, C. and Escobar, C., 2015.** Contribution of glutathione to the control of cellular redox homeostasis under toxic metal and metalloid stress. *Journal of Experimental Botany*, 66(10) : 2901-2911.
- **Hillel, D., 2004.** Introduction to Environmental Soil Physics : 494
- **Hu, G.P., Zhao, Y., Song, F.Q., Liu, B., Vasseur, L., Douglas, C., You, M.S., 2014.** Isolation, identification and cyfluthrin-degrading potential of a novel *Lysinibacillus sphaericus* strain, FLQ-11-1. *Res. Microbiol.* 165, 110–118.
- **Huang, Y., Xu, Y., Li, J., Xu, W., Zhang, G., Cheng, Z., Liu, J., Wang, Y., Tian, C., 2013.** Organochlorine pesticides in the atmosphere and surface water from the equatorial Indian Ocean: enantiomeric signatures, sources, and fate. *Environ. Sci. Technol.* 47 (23), 13395e13403. IARC, 2012.
- **Hussain, S., Siddique, T., Arshad, M; Saleem, M., 2009b.** Bioremediation and phytoremediation of pesticides: recent advances. *Crit Rev Environ Sci Technol* 39:843–907
- **Hussain, S., Siddique, T., Saleem, M., Arshad, M., Khalid, A., 2009a.** Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. *Adv Agron* 102:159–200
- **Hussain, S., Siddique, T., Saleem, M., Arshad, M. and Khalid, A., 2009.** Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. *Advances in agronomy*, 102 :159-200.
- **Imfeld, G., Vuilleumier , S., 2012.** Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: a critical review. *Eur J Soil Biol* 49:22–30 interfaces. Tome 1. Edition France Agricole. Paris (France), 83-90
- **Jain, S.A., Jagtap, M.S. and Patel, K.P., 2014.** Physico-Chemical Characterization of farmland Soil used in some villages of Lunawada Taluka, Dist: Mahisagar (Gujarat) India. *Int. J. of Sci. and Res. Publi*, 4(3)1-5.
- **Jenkinson, D.S., 1966.** Studies on the decomposition of plant material in soil. *J Soil Sci* 17:280–302.

Références bibliographiques

- **Jeong, H and Forster, L., 2003.** Empirical Investigation of Agricultural Externalities: Effects of Pesticide Use and Tillage System on Surface Water. Department of agricultural, Environmental and Development Economics. The Ohio State University. Ohio State University. Working Paper.
- **Jiménez_Valverde, A., Sendra, A., Garay, P., Reboleira, A.S.P.S., 2017.** Energy and speleogenesis: Key determinants of terrestrial species richness in caves. *Ecol. Evol.* 7, 10207-10215. <https://doi.org/10.1002/ece3.3558>
- **Johnsen, K., Jacobsen, CS., Torsvik, V., 2001.** Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils—a review. *Biol Fertil Soils* 33:443–453
- **Jordan, D.B., Livingston, R.S., Bisaha J.J., Duncan, K.E., Pember, S.O, Picollelli MA., Schwartz, R.S., Sternberg, J.A., Tang, X.S., 2015.** Mode of action of famoxadone. *Pest Manag Sci* 55:105-118
- **Jozefaciuk, G. and Czachor, H., 2014.** Impact of organic matter, iron oxides, alumina, silica and drying on mechanical and water stability of artificial soil aggregates. Assessment of new method to study water stability. *Geoderma*, 221:1-10.
- **Kaňa, R., Špundová, M., Ilík, P., Lazár, D., Klem, K., Tomek, P., ...& Prášil, O., 2004.** Effect of herbicide clomazone on photosynthetic processes in primary barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 78(3), 161-170.
- **Kanj, F., 2018.** Outils et méthodes pour une politique territoriale de gestion raisonnée des pratiques agricoles: cas d'application dans la région de la Béqaa au Liban (Doctoral dissertation, Université Paul Valéry-Montpellier III).
- **Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schumann, G., 1997.** Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation (A guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4–10.
- **Karuppanapandian, T., Moon, J.C., Kim, C., Manoharan, K. and Kim, W., 2011.** Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6): 709-725.
- **Kaya, A., Doganlar, Z.B., 2016.** Exogenous jasmonic acid induces stress tolerance in tobacco (*Nicotiana glauca*) exposed to imazapic. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 124:470-479.

Références bibliographiques

- **Kekane, S.S., Chavan, R.P., Shinde, D.N., Patil, C.L. and Sagar, S.S., 2015.** A review on physico-chemical properties of soil. *International Journal of Chemical Studies*, 3(4): 29-32.
- **Khalil, M.S., 2013.** Abamectin and azadirachtin as eco-friendly promising biorational tools in integrated nematodes management programs. *J. plant pathol. microbiol*, 4(174) : 10-4172.
- **Kheddam-benajal, N., 24 Mai 2012.** Enquête sur la gestion des pesticides en Algérie et recherche d'une méthode de lutte alternative contre *Meloidogyne incognita* (Nematoda:Meloidogynidae).Mémoire magister , Science Agronomique .ecologie des Communautés Biologiques . Ecol.Nat .Supr.Agr.El Harrach. Algérie :81.
- **Kim, K.H., Kabir, E. and Jahan, S.A., 2017.** Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of the total environment*, 575 : 525-535.
- **Knapik, L.F. and Ramsdorf, W., 2020.** Ecotoxicity of malathion pesticide and its genotoxic effects over the biomarker comet assay in *Daphnia magna*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5) : 1-9.
- **Kőrösi, L., Boudérias, S., Csepregi, K., Bognár, B., Teszlák, P., Scarpellini, A., Castelli, A., Hideg, É. and Jakab, G., 2019.** Nanostructured TiO₂-induced photocatalytic stress enhances the antioxidant capacity and phenolic content in the leaves of *Vitisvinifera* on a genotype-dependent manner. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 190:137-145.
- **Kováčik, J., Klejdus, B., Bačkor, M., Repčák, M., 2007.** Phenylalanine ammonia-lyase activity and phenolic compounds accumulation in nitrogen-deficient *Matricaria chamomilla* leaf rosettes. *Plant Science* 172(2):393-399.
- **Krishnakumar, S., Rajalakshmi, A.G., Balaganesh, B., Manikandan, P., Vinoth, C. and Rajendran, V., 2014.** Impact of biochar on soil health. *International Journal of Advanced Research*, 2(4): 933-950.
- **Kuan, HL ., Fenwick, C., Glover, LA.,Griffiths, BS.,Ritz, K., 2006.** Functional resilience of microbial communities from perturbed upland grassland soils to further persistent or transient stresses. *Soil Biol Biochem* 38:2300–2306.
- **Kunwar, A.,Priyadarsini,KI., 2011.** Review.FreeRadical Stress and Importance of

Références bibliographiques

Antioxydants in human Health. Journal Medical & Allied Sciences.,1:53-60.

- **Labite, H., Holden, N.M., Richards, K.G., Kramers, G., Premrov, A., Coxon, C.E. and Cummins, E., 2013.** Comparison of pesticide leaching potential to groundwater under EU FOCUS and site specific conditions. Science of the total environment, 463 : 432-441.
- **Lamichhane, J.R., 2017.** Pesticide use and risk reduction in European farming systems with IPM: An introduction to the special issue. Crop Prot, 97 : 1-6.
- **Lawanira, N., KELOME, N. C.K., 2017.** Effets des pratiques agricoles sur la pollution des eaux de surface en république du Bénin. Iarhyss journal, Bénin issn 1112-3680, n°30 : 173-190.
- **Le Guillou, C., Angers, D.A., Maron, P-A., Leterme, P., Menasseri-Aubry, S., 2012.** Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition. Soil Biol Biochem **50**:126-133.
- **Leitao, S., Cerejeira, M.J., Van den Brink, P.J., Sousa, J.P., 2014.** Effects of azoxystrobin, chlorothalonil, and ethoprophos on the reproduction of three terrestrial invertebrates using a natural Mediterranean soil. Appl Soil Ecol 76:124–131
- **Li, Z., 2018.** Health risk characterization of maximum legal exposures for persistent organic pollutant (POP) pesticides in residential soil: an analysis. J. Environ. Manag. 205, 163–173.
- **Lichiheb, N., Bedos, C., Personne, E. and Barriuso, E., 2015.** Synthèse des connaissances sur le transfert des pesticides vers l'atmosphère par volatilisation depuis les plantes. 2268 3798.
- **Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., 2001.** Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, F4-3.
- **Louchahi, M., 2015.** Enquête sur les conditions d'utilisation des pesticides en agriculture dans la région centre de l'algérois et la perception des agriculteurs des risques associés à leur utilisation. (en ligne). Diplôme de magistère, école nationale supérieure d'agronomie, Algérie : 04.

Références bibliographiques

- **Lozowicka, B., Abzeitova, E., Sagitov, A., Kaczynski, P., Toleubayev, K. and Li, A., 2015.** Studies of pesticide residues in tomatoes and cucumbers from Kazakhstan and the associated health risks. *Environmental monitoring and assessment*, 187(10) :1-19.
- **Luo, C., Huang, Y., Huang, D., Liu, M., Xiong, W., Guo, Q. and Yang, T., 2018.** Migration and Transformation Characteristics of Niclosamide in a Soil–Plant System. *ACS omega*, 3(2) : 2312-2321.
- **Lupwayi, N.Z., Brandt, S.A., Harker, K.N., O'Donovan, J.T., Clayton, G.W., Turkington, T.K., .,2010.** Contrasting soil microbial responses to fertilizers and herbicides in a canola–barley rotation. *Soil Biol Biochem* 42:1997–2004.
- **Mahapatra, K., De, S., Banerjee, S. and Roy, S., 2019.** Pesticide mediated oxidative stress induces genotoxicity and disrupts chromatin structure in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seedlings. *Journal of hazardous materials*, 369 : 362-374.
- **Mahdavi, V., Farimani, M.M., Fathi, F. and Ghassempour, A., 2015.** A targeted metabolomics approach toward understanding metabolic variations in rice under pesticide stress. *Analytical biochemistry*, 478: 65-72.
- **Majeed, A and Muhammad, Z ., 2018.** Potato production in pakistan: challenges and prospective management strategies-a review. *Pakistan Journal of Botany*, 50(5): 2077-2084.
- **Marie, L., Sylvain, P., Benoit, G., Maurice, M. and Gwenaël, I., 2017.** Degradation and transport of the chiral herbicide s-metolachlor at the catchment scale: Combining observation scales and analytical approaches. *Environmental Science & Technology*, 51(22) :13231-13240.
- **Martens, R., 1995.** Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biol Fertil Soils* 19:87–99.
- **Mattila ,P., hellström, J.,2007.** Phenolic acids in potatoes, vegetables, and some of their products. *Journal of Food Composition and Analysis*. Vol. 20, 152-160.
- **Megateli, S., Dosnon-Olette, R., Trotel-Aziz, P., Geffard, A., Semsari, S. and Couderchet, M., 2013.** Simultaneous effects of two fungicides (copper and

Références bibliographiques

dimethomorph) on their phytoremediation using *Lemna minor*. *Ecotoxicology*, 22(4) : 683-692.

- **Merrington, G., Rogers, S.L., Zwieten, L.V., 2002.** The potential impact of long-term copper fungicide usage on soil microbial biomass and microbial activity in an avocado orchard. *Austr. J. Soil Res.* 40, 749_759.
- **Midoune, A., 2015.** Recherches sur *Rhizoctonia solani* J.G.Kühn, agent de rhizoctone brun de la pomme de terre. Caractérisation morphologique, identification des groupes d'anastomose et comportement variétal. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach. Alger. Algérie : 85.
- **Miller, R. Wand Donahuer, R.L., 2001.** Soils in our environment, Seventh edition. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. In, Tale, K.S. and Ingole, S., 2015. A review on role of physico-chemical properties in soil quality. *Chemical Science Review and Letters*, 4(13) : 57-66.
- **Ministère de l'agriculture et du développement rural (MADR) ., 2018 .** Statistiques Agricoles. <http://madrp.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/>. Consulté le 11/05/2022 à 20:50h.
- **Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. and Van Breusegem, F., 2004.** Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in plant science*, 9(10): 490-498.
- **Mohiuddin , M., Mohammed, MK ., 2013.** Influence of fungicide (carbendazim) and herbicides (2, 4-D and metribuzin) on non-target beneficial soil microorganisms of Rhizospheric soil of tomato crop. *J Environ Sci Toxicol. Food Technol* 5(1):2319–2399
- **Mokiedje, A., Spiteller, M ; 2002.** Effects of the phenylamide fungicides, mefenoxam and metalaxyl, on the microbiological properties of a sandy loam and a sandy clay soil. *Biol Fertil Soils* 35:393–398
- **Mora-Naranjo, N., Meima, J.A., Haarstrick, A. and Hempel, D.C., 2004.** Modelling and experimental investigation of environmental influences on the acetate and methane formation in solid waste. *Waste Management*, 24(8) : 763-773.
- **Morel, C., Tiessen, H., Moir, J.O. and Stewart, J.W.B., 1994.** Phosphorus transformations and availability under cropping and fertilization assessed by isotopic

Références bibliographiques

exchange. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5) : 1439-1445.

- **Muggler, C.C., Pape, T. and Buurman, P., 1997.** Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. *Soil Science*, 162(3) : 219-228.
- **Munaretto, J.S., Ferronato, G., Ribeiro, L.C., Martins, M.L., Adaime, M.B., Zanella, R., 2013.** Development of a multiresidue method for the determination of endocrine disrupters in fish fillet using gas chromatographytriple quadrupole tandem mass spectrometry. *Talanta* 116, 827e834.
- **Murphy, J.A.M.E.S. and Riley, J.P., 1962.** A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27 : 31-36.
- **Nakano, Y., Asada, K., 1981.** Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology* 22(5):867-880.
- **Nayana, S. and Malode, S.N., 2012.** Municipal solid waste management: a survey and physicochemical analysis of contaminated soil from Sukali Compost and landfill depot, Batkuli Road, Amravati. *Global Journal of bio-Science Biotechnology*, 1(2).
- **Neira, J., Ortiz, M., Morales, L. and Acevedo, E., 2015.** Oxygen diffusion in soils: understanding the factors and processes needed for modeling. *Chilean journal of agricultural research*, 75 : 35-44.
- **Noctor, G., Mhamdi, A., Chaouch, S., Han, Y.I., Neukermans, J., Marquez-Garcia, B.E.L.E.N., Queval, G. and Foyer, C.H., 2012.** Glutathione in plants: an integrated overview. *Plant, cell & environment*, 35(2): 454-484.
- **Noctor, G., Reichheld, J.P. and Foyer, C.H., 2018,** August. ROS-related redox regulation and signaling in plants. In *Seminars in Cell & Developmental Biology* (Vol. 80: 3-12). Academic Press.
- **Nyi, T., Varughese, P., bin Hj Bujang, M. I., Ra, K., Irianta, B., Sengxua,P., ... Soda, W., 2017.** ASEAN guidelines on soil and nutrientmanagement. Bangkok, Thailand: Association of Southeast AsianNations (ASEAN).
- **Olsvik, P.A., Larsen, A.K., Berntssen, M.H., Goksøyr, A., Karlsen, O.A., Yadetie, F., Sanden, M. and Kristensen, T., 2019.** Effects of agricultural pesticides in

Références bibliographiques

aquafeeds on wild fish feeding on leftover pellets near fish farms. *Frontiers in genetics* : 794.

- **Ou, J., Li, H., Ou, X., Yang, Z., Chen, M., Liu, K., Teng, Y. and Xing, B., 2020.** Degradation, adsorption and leaching of phenazine-1-carboxamide in agricultural soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 205 : 111374.
- **Ouchebbouk, D., Zibani, A., 2015.** Contribution à l'étude de l'utilisation des pesticides dans quelques vergers des régions de Tizi-Ouzou, Boumerdes, Bouira. Diplôme en master en agronomie, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou : 44
- **Palma, P., Palma, V.L., Matos, C., Fernandes, R.M., Bohn, A., Soares, A.M.V.M. and Barbosa, I.R., 2009.** Assessment of the pesticides atrazine, endosulfan sulphate and chlorpyrifos for juvenoid-related endocrine activity using *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 76(3) : 335-340.
- **Pandey, S., Singh, D.K., 2004.** Total bacterial and fungal population after chlorpyrifos and quinalphos treatments in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) soils. *Chemosphere* 55, 283_290
- **Parween, T., Jan, S., Mahmooduzzafar, S., Fatma, T., Siddiqui, Z.H., 2016** .Selective effect of pesticides on plant - A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56(1):160-179.
- **Parween, T.A.L.A.T., Jan, S., Fatma, T., 2012.** Evaluation of oxidative stress in *Vignaradiata* L. in response to chlorpyrifos. *International Journal of Environmental Science and Technology* 9(4):605-612.
- **Patnaik, L., Raut, D., Behera, L., Nayak, A., Misha, S. and Swain, S., 2013.** Physico chemical and heavy metal characterization of soil from industrial belt of Cuttack, Orissa. *Asian j. exp. biol. Sci*, 4(2) : 219-225.
- **Paudel, S. and Sah, J.P., 2003.** Physiochemical characteristics of soil in tropical sal (*Shorea robusta* Gaertn.) forests in eastern Nepal. *Himalayan Journal of Sciences*, 1(2) : 107-110.
- **Péron J Y., 2006.** Références productions légumières, 2ème édition. *synthèse Agricole* : 538-547.

Références bibliographiques

- **Philippot, L., Spor, A., Hénault, C., Bru, D., Bizouard, F., Jones, C.M. et al., 2013.** Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *ISME J* 7:1609–1619.
- **Podio, N.S., Guzmán, C.A., Meriles, J.M., 2008.** Microbial community structure in a silty clay loam soil after fumigation with three broad spectrum fungicides. *J. Environ. Sci. Health B43*, 333–340.
- **Polese, J.M., 2006.** La culture des pommes de terre. Edition Atémis : 44.
- **Potter, T.L., Wauchop, R.D., Culbreath, A.K., 2001.** Accumulation and decay of chlorothalonil and selected metabolites in surface soil following foliar application to peanuts. *Environ. Sci. Technol.* 35, 2634–2639.
- **Pourcel, L., Routaboul, J.M., Cheynier, V., Lepiniec, L., Debeaujon, I., 2007.** Flavonoid oxidation in plants: from biochemical properties to physiological functions. *Trends in Plant Science* 12(1):29-36.
- **Prasertsup, P. and Ariyakanon, N., 2011.** Removal of chlorpyrifos by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) and duckweed (*Lemna minor* L.). *International journal of phytoremediation*, 13(4) : 383-395.
- **Qian, S., Zhu, H., Xiong, B., Zheng, G., Zhang, J. and Xu, W., 2017.** Adsorption and desorption characteristics of endosulfan in two typical agricultural soils in Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12) : 11493-11503.
- **Qin, F., Gao, Y.X., Guo, B.Y., Xu, P., Li, J.Z. and Wang, H.L., 2014.** Environmental behavior of benalaxyl and furalaxyl enantiomers in agricultural soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 49(10) : 738-746.
- **Qu, C., Qi, S., Yang, D., Huang, H., Zhang, J., Chen, W., Yohannes, H.K., Sandy, E.H., Yang, J., Xing, X., 2015.** Risk assessment and influence factors of organochlorine pesticides (OCPs) in agricultural soils of the hill region: a case study from Ningde, southeast China. *J. Geochem. Explor.* 149, 43e51.
- **Quan, G., Yin, C., Chen, T. and Yan, J., 2015.** Degradation of herbicide mesotrione in three soils with differing physicochemical properties from China. *Journal of environmental quality*, 44(5) : 1631-1637.

Références bibliographiques

- **Quan, L.J., Zhang, B., Shi, W.W. and Li, H.Y., 2008.** Hydrogen peroxide in plants: a versatile molecule of the reactive oxygen species network. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(1): 2-18.
- **Radwan, D.E.M., 2012.** Salicylic acid induced alleviation of oxidative stress caused by clethodim in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 102(2):182-188.
- **Rani, V. and Yadav, U.C.S., 2015.** *Free Radicals in Human Health and*. New Delhi: Springer.
- **Ren, W., Wang, M. and Zhou, Q., 2011.** Effect of soil pH and organic matter on desorption hysteresis of chlorimuron-ethyl in two typical Chinese soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11(4) : 552-561.
- **Rosales, M.A., Ruiz, J.M., Hernández, J., Soriano, T., Castilla, N., Romero, L., 2006.** Antioxidant content and ascorbate metabolism in cherry tomato exocarp in relation to temperature and solar radiation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86(10):1545-1551.
- **Rosas-Medina, M., Maciá-Vicente, J.G. and Piepenbring, M., 2020.** Diversity of fungi in soils with different degrees of degradation in Germany and Panama. *Mycobiology*, 48(1) :20-28.
- **Sanches, A.L.M., Vieira, B.H., Reghini, M.V., Moreira, R.A., Freitas, E.C., Espíndola, E.L.G., Daam, M.A., 2017.** Single and mixture toxicity of abamectin and difenoconazole to adult zebrafish (*Danio rerio*). *Chemosphere* 188, 582–587. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.09.027
- **Sancho, E., Villarroel, M.J. and Ferrando, M.D., 2016.** Assessment of chronic effects of tebuconazole on survival, reproduction and growth of *Daphnia magna* after different exposure times. *Ecotoxicology and environmental safety*, 124 : 10-17.
- **Schilder, A., 2010.** Fungicides properties and weather conditions. *Plant & Pest Advisory* : 1-3.
- **Schroder, P., Collins, CJ, 2002.** Enzymes de conjugaison impliquées dans le métabolisme xénobiotique de xénobiotiques organiques dans les plantes. *Int. J. Phytoremediation* 4, 247 e 265.

Références bibliographiques

- **Sedlak, J., Lindsay, R.H., 1968.** Estimation of total, protein-bound, and nonprotein sulfhydryl groups in tissue with Ellman's reagent. *Analytical Biochemistry* 25:192-205.
- **Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M.A., Tung, S.A., Hafeez, A. and Souliyanonh, B., 2017.** Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11) :10056-10067.
- **Shahzad, B., Tanveer, M., Che, Z., Rehman, A., Cheema, S.A., Sharma, A., Song, H., ur Rehman, S. and Zhaorong, D., 2018.** Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147 : 935-944.
- **Shakir, S.K., Irfan, S., Akhtar, B., Ur Rehman, S., Daud, M.K., Taimur, N., Azizullah, A., 2018.** Pesticide-induced oxidative stress and antioxidant responses in tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings. *Ecotoxicology* 27(7):919-935.
- **Shakir, S.K., Kanwal, M., Murad, W., ur Rehman, Z., ur Rehman, S., Daud, M.K. and Azizullah, A., 2016.** Effect of some commonly used pesticides on seed germination, biomass production and photosynthetic pigments in tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology*, 25(2): 329-341.
- **Sharma, A., Bhardwaj, R., Kumar, V. and Thukral, A.K., 2016.** GC-MS studies reveal stimulated pesticide detoxification by brassinolide application in *Brassica juncea* L. plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14) :14518-14525.
- **Sharma, A., Bhardwaj, R., Kumar, V., & Thukral, A. K., 2016a.** GC-MS studies reveal stimulated pesticide detoxification by brassinolide application in *Brassica juncea*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 14518-14525.
- **Sharma, A., Kumar, V., Kanwar, M.K., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2017.** Ameliorating imidacloprid induced oxidative stress by 24-epibrassinolide in *Brassica juncea* L. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64(4): 509-517.

Références bibliographiques

- **Sharma, A., Kumar, V., Kanwar, M.K., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2017a.** Ameliorating imidacloprid induced oxidative stress by 24-epibrassinolide in Brassica juncea L. *Russian Journal of Plant Physiology*, 64(4): 509-517.
- **Sharma, A., Kumar, V., Kumar, R., Shahzad, B., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2018.** Brassinosteroid-mediated pesticide detoxification in plants: A mini-review. *Cogent Food & Agriculture*, 4(1):1436212.
- **Sharma, A., Kumar, V., Kumar, R., Shahzad, B., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2018.** Brassinosteroid-mediated pesticide detoxification in plants: A mini-review. *Cogent Food & Agriculture*, 4(1): 1436212.
- **Sharma, A., Kumar, V., Singh, R., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2016.** Effect of seed pre-soaking with 24-epibrassinolide on growth and photosynthetic parameters of Brassica juncea L. in imidacloprid soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133 :195-201.
- **Sharma, A., Kumar, V., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2016.** Epibrassinolide imidacloprid interaction enhances non-enzymatic antioxidants in Brassica juncea L. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(1): 70-75.
- **Sharma, A., Kumar, V., Yuan, H., Kanwar, M.K., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., Zheng, B., 2018b.** Jasmonic acid seed treatment stimulates insecticide detoxification in Brassica juncea L. *Frontiers in Plant Science* 9:1609.
- **Sharma, A., Thakur, S., Kumar, V., Kanwar, M.K., Kesavan, A.K., Thukral, A.K., Bhardwaj, R., Alam, P. and Ahmad, P., 2016.** Pre-sowing seed treatment with 24-epibrassinolide ameliorates pesticide stress in Brassica juncea L. through the modulation of stress markers. *Frontiers in plant science*, 7 : 1569.
- **Sharma, A., Thakur, S., Kumar, V., Kesavan, A.K., Thukral, A.K. and Bhardwaj, R., 2017b.** 24-epibrassinolide stimulates imidacloprid detoxification by modulating the gene expression of Brassica juncea L. *BMC plant biology*, 17(1): 1-10.
- **Sharma, A., Yuan, H., Kumar, V., Ramakrishnan, M., Kohli, S.K., Kaur, R., Thukral, A.K., Bhardwaj, R. and Zheng, B., 2019.** Castasterone attenuates insecticide induced phytotoxicity in mustard. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 179: 50-61.

Références bibliographiques

- **Sharma, I., Bhardwaj, R. and Pati, P.K., 2015.** Exogenous application of 28 homobrassinolide modulates the dynamics of salt and pesticides induced stress responses in an elite rice variety Pusa Basmati-1. *Journal of plant growth regulation*, 34(3) : 509-518.
- **Sharma, P .,2016.** Cypermethrin pesticides impacts on morphological characters of *Solanum melongena* L. *Plant Archives* 16(2):941-945.
- **Shi , XZ., Guo, RJ., Takagi, K., Miao, ZQ., Li, SD., 2011.** Chlorothalonil degradation by *Ochrobactrum lupini* strain TP-D1 and identification of its metabolites. *World J Microb Biot* 27(8):1755–1764
- **Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K., Nakamura, T., 1992.** Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40(6):945-948.
- **Si, Y., Zhang, J., Wang, S., Zhang, L. and Zhou, D., 2006.** Influence of organic amendment on the adsorption and leaching of ethametsulfuron-methyl in acidic soils in China. *Geoderma*, 130(1-2) : 66-76.
- **Sijm, D.T., Rikken, M.G.J., Rorije, E., Traas, T.P., Mclachlan, M.S. and Peijnenburg, W.J.G.M., 2007.** Transport, accumulation and transformation processes. In *Risk assessment of chemicals* :73-158. Springer, Dordrecht.
- **Sila ,S and Sopialena., 2016.** Efektifitas beberapa fungisida terhadap perkembangan penyakit dan produksi tanaman cabai (*Capsicum frutescens*). *J. Agrifor* XV 117–130.
- **Šimanský, V. and Bajčan, D., 2014.** Stability of soil aggregates and their ability of carbon sequestration. *Soil and Water Research*, 9(3) : 111-118.
- **Šimanský, V., 2016.** Effects of biochar and biochar with nitrogen on soil organic matter and soil structure in Haplic Luvisol. *Acta fytotechnica et zootechnica*, 19 : 129-138.
- **Šimanský, V., Bajčan, D. and Ducsay, L., 2013.** The effect of organic matter on aggregation under different soil management practices in a vineyard in an extremely humid year. *Catena*, 101 : 108-113.
- **Singh, D.K., 2012.** *Pesticide chemistry and toxicology* (Vol. 1). Bentham Science Publishers.

Références bibliographiques

- **Singh, D.P. and Rathore, M.S., 2013.** Available nutrient status and their relationship with soil properties of Aravalli mountain ranges and Malwa Plateau of Pratapgarh, Rajasthan, India. *African Journal of Agricultural Research*, 8(41) : 5096-5103.
- **Singh, J.S. and Gupta, V.K., 2018.** Soil microbial biomass: a key soil driver in management of ecosystem functioning. *Science of the Total Environment*, 634 : 497-500.
- **Singh, R.P., Sarkar, A., Sengupta, C., Singh, P., Miranda, A.R.L., Nunes, L.A.P.L., Araujo, A.S.F., Melo, W.J., 2015.** Effect of utilization of organic waste as agricultural amendment on soil microbial biomass. *Ann. Res. Rev. Biol.* 7 (3), 155–162.
- **Singh, R.P., Singh, P., Ibrahim, M.H., Hashim, R., 2011b.** Land Application of sewage sludge: Physicochemical and Microbial response. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 214, 41–61.
- **Singleton, V.L., Rossi, J.A.(1965).** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16(3):144-158.
- **Solanki, H.A. and Chavda, N.H., 2012.** 12. Physico-chemical analysis with reference to seasonal changes in soils of victoria park reserve forest, bhavnagar (gujarat) by ha solanki and nh chavda. *Life sciences Leaflets*, 30 :62-to.
- **Soltner, D., 1999.** Les grandes productions végétales. Collection sciences et technique agricoles, 20^{ème} édition, Angers, 472 : Ed.CSTA.
- **Soltner, D., 2005.** Les grandes productions végétales, phytotechnie spéciale céréales plantes sarclées-prairies. Collection sciences et techniques agricoles, 20^{ème} édition : 472.
- **Soni, R. and Verma, S.K., 2018.** Acute toxicity and behavioural responses in *Clarias batrachus* (Linnaeus) exposed to herbicide pretilachlor. *Heliyon*, 4(12) : e01090.
- **Souagnbe S.P., Yandia A., Achelekek J., brevalut t., Vaissayre M. et Ngartoubam I.T., 2009.** Pratique phytosanitaires paysannes dans les savanes d’Afrique central, In *Savanes africaines en développement : innove pour dure*, 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun : 1-13.

Références bibliographiques

- **Sposito, G., 1989.** Soil particle surface. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press: New York : 136-141.
- **Su, W.; Hao, H.; Xu, H.; Lu, C.; Wu, R.; Xue, F.** Degradation of Mesotrione Affected by Environmental Conditions. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **2016**, 98, 212–217. [[CrossRef](#)]
- **Sukul, P., Majumder, A., & Spiteller, M., 2008.** Microbial population and their activities in soil as influenced by metalaxyl residues. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17(1), 103–110
- **Sumithra, S., Ankalaiah, C., Rao, D. and Yamuna, R.T., 2013.** A case study on physicochemical characteristics of soil around industrial and agricultural area of Yerraguntla, Kadapa district, AP, India. *Int. J. Geo. Earth and Environ. Sci.*, 3(2) : 28-34.
- **Tadeo, J.L. ed., 2019.** Analysis of pesticides in food and environmental samples. CRC Press.
- **Tale, K.S. and Ingole, S., 2015.** A review on role of physico-chemical properties in soil quality. *Chemical Science Review and Letters*, 4(13) : 57-66.
- **Tariq, S.R. and Nisar, L., 2018.** Reductive transformation of profenofos with nanoscale Fe/Ni particles. *Environmental monitoring and assessment*, 190(3) :1-10.
- **Tcaciuc, A.P., Borrelli, R., Zaninetta, L.M. and Gschwend, P.M., 2018.** Passive sampling of DDT, DDE and DDD in sediments: Accounting for degradation processes with reaction diffusion modeling. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(1) : 220-231.
- **Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H. and Volkweiss, S.J., 1995.** Análises de solo, plantas e outros materiais (Vol. 5, p. 174). Porto Alegre: Ufrgs.
- **Töfoli, J.G., Domingues, R.J., de Melo, P.C.T. and Ferrari, J.T., 2014.** Effect of simulated rain on the efficiency of fungicides in potato late blight and early blight control. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(6) : 2977-2989.
- **Torri, S.I., Corrêa, R.S., Renella, G., 2014.** Soil Carbon Sequestration Resulting from Biosolids Application. *Appl. Environ. Soil Sci.* vol 2014, Article ID 821768, 9

pages doi: 10.1155/2014/821768.

- **Touzout, N., Mehallah, H., Moralent, R., Moulay, M. and Nemmiche, S., 2021.** Phytotoxic evaluation of neonicotinoid imidacloprid and cadmium alone and in combination on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Ecotoxicology*, 30(6) :1126-1137.
- **Touzout, N., Mehallah, H., Moralent, R., Nemmiche, S. and Benkhelifa, M., 2021.** Co contamination of deltamethrin and cadmium induce oxidative stress in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(6) : 1-10.
- **Tsakiris, I.N., Toutoudaki, M., Kokkinakis, M., Paraskevi, M., Tsatsakis, A.M., 2011.** A Risk Assessment Study of Greek Population Dietary Chronic Exposure to Pesticide Residues in Fruits, Vegetables and Olive Oil. *Pesticides-Formulations, Effects, Fate*. InTech.
- **USEPA United States Environmental Protection Agency(1998).** Cymoxanil pesticide fact sheet. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC_129106_21-Apr-98.pdf.
- **Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson O.S., 1987.** Microbial biomass measurements in forest soils : determination of Kc values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 689-686.
- **Velikova, V., Yordanov, I., Edreva, A .,2000.** Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science* 151(1):59-66.
- **Vieira, C.E.D. and dos Reis Martinez, C.B., 2018.** The pyrethroid λ -cyhalothrin induces biochemical, genotoxic, and physiological alterations in the teleost *Prochilodus lineatus*. *Chemosphere*, 210 : 958-967.
- **Vreugdenhil, D., Bradshaw, J; Gebhardt, C., Govers, F., Taylor, MA., Mackerroun, KL., Ross, HA., 2007.** *Potato biology and biotechnology*. Elsevier: 856.
- **Wagg, C., Schlaeppli, K., Banerjee, S., Kuramae, E.E. and van der Heijden, M.G., 2019.** Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning. *Nature communications*, 10(1): 1-10.

Références bibliographiques

- **Wagh, G.S., Chavhan, D.M. and Sayyed, M.R.G., 2013.** Physicochemical Analysis of Soils from Eastern Part of Pune City. *Universal Journal of Environmental Research & Technology*, 3(1).
- **Wang, G., Liang, B., Li, F., Li, S., 2011.** Recent advances in the biodegradation of chlorothalonil. *Curr Microbiol* 63:450
- **Wang, G., Han, Y., Li, X., Andaloro, J., Chen, P., Hoffmann, W.C., Han, X., Chen, S. and Lan, Y., 2020.** Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. *Science of the Total Environment*, 737 : 139793.
- **Wang, M.Y., Zhang, Q., Cong, L.J., Yin, W., Wang, M.H., 2014.** En antio selective degradation of metalaxyl in cucumber, cabbage, spinach and pakchoi. *Chemosphere* 95, 241 246.
- **Wanwimolruk, S., Phopin, K., Boonpangrak, S. and Prachayasittikul, V., 2016.** Food safety in Thailand 4: Comparison of pesticide residues found in three commonly consumed vegetables purchased from local markets and supermarkets in Thailand. *PeerJ*, 4 : e2432.
- **Winarsi, H., 2007.** *Natural Antioxidants and FreeRadicals*. 3ed. Yogyakarta: Kanisius
- **Wu, D., Yun, Y., Jiang, L. and Wu, C., 2018.** Influence of dissolved organic matter on sorption and desorption of MCPA in ferralsol. *Science of the Total Environment*, 616 : 1449-1456.
- **Wu, J.C., Qiu, H.M., Yang, G.Q., Liu, J.L., Liu, G.J., Wilkins, R.M., 2004** Effective duration of pesticide-induced susceptibility of rice to brown plant hopper (*Nilaparvatalugens* Stål, Homoptera: Delphacidae), and physiological and biochemical changes in rice plants following pesticide application. *International Journal of Pest Management* 50(1):55-62.
- **Wu, L., Chládková, B., Lechtenfeld, O.J., Lian, S., Schindelka, J., Herrmann, H. and Richnow, H.H., 2018.** Characterizing chemical transformation of organophosphorus compounds by ¹³C and ²H stable isotope analysis. *Science of the Total Environment*, 615 : 20-28.

Références bibliographiques

- **Wu, X., Cheng, L., Cao, Z. and Yu, Y., 2012.** Accumulation of chlorothalonil successively applied to soil and its effect on microbial activity in soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 81 : 65-69.
- **Xia, X. J., Zhang, Y., Wu, J. X., Wang, J. T., Zhou, Y. H., Shi, K., ... & Yu, J. Q., 2009.** Brassinosteroids promote metabolism of pesticides in cucumber. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(18), 8406-8413.
- **Xia, X.J., Huang, Y.Y., Wang, L., Huang, L.F., Yu, Y.L., Zhou, Y.H. and Yu, J.Q., 2006.** Pesticides-induced depression of photosynthesis was alleviated by 24-epibrassinolide pretreatment in *Cucumis sativus* L. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 86(1): 42-48.
- **Xiaoqiang, C.H.U., Hua, F.A.N.G., Xuedong, P.A.N., Xiao, W.A.N.G., Min, S.H.A.N., Bo, F.E.N.G. and Yunlong, Y.U., 2008.** Degradation of chlorpyrifos alone and in combination with chlorothalonil and their effects on soil microbial populations. *Journal of Environmental Sciences*, 20(4) : 464-469.
- **Xu, GF., Jia ,XH.,Wu, XH., Xu, J., Liu ,XG.,Pan, XL., Li ,RA., Li ,XH., Dong, FS.,2018.** Enantio selective monitoring of chiral fungicide famoxadone enantiomers in tomato, apple, and grape by chiral liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *J Sep Sci* 41:3871–3880
- **Xue, D and Huang, X., 2013.** The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties. *Chemosphere*, 93(4) : 583-589.
- **Yelli, F., Prasetyo, J., Maryono, T. and Fransiska, M., 2022,** April. Effect of Oxathiapiproline-Famoxadone fungicide and *Trichoderma* sp. on Control of Downy Mildew and the Growth of Maize. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1018, No. 1: 012041). IOP Publishing.
- **Yu, YL., Shan, M., Fang, H., Wang, X., Chu, XQ., 2006** Responses of soil microorganisms and enzymes to repeated applications of chlorothalonil. *J Agric Food Chem* 54(26):10070–10075
- **Yuan, G.L., Qin, J.X., Li, J., Lang, X.X. and Wang, G.H., 2014.** Persistent organic pollutants in soil near the Changwengluozha glacier of the Central Tibetan Plateau,

Références bibliographiques

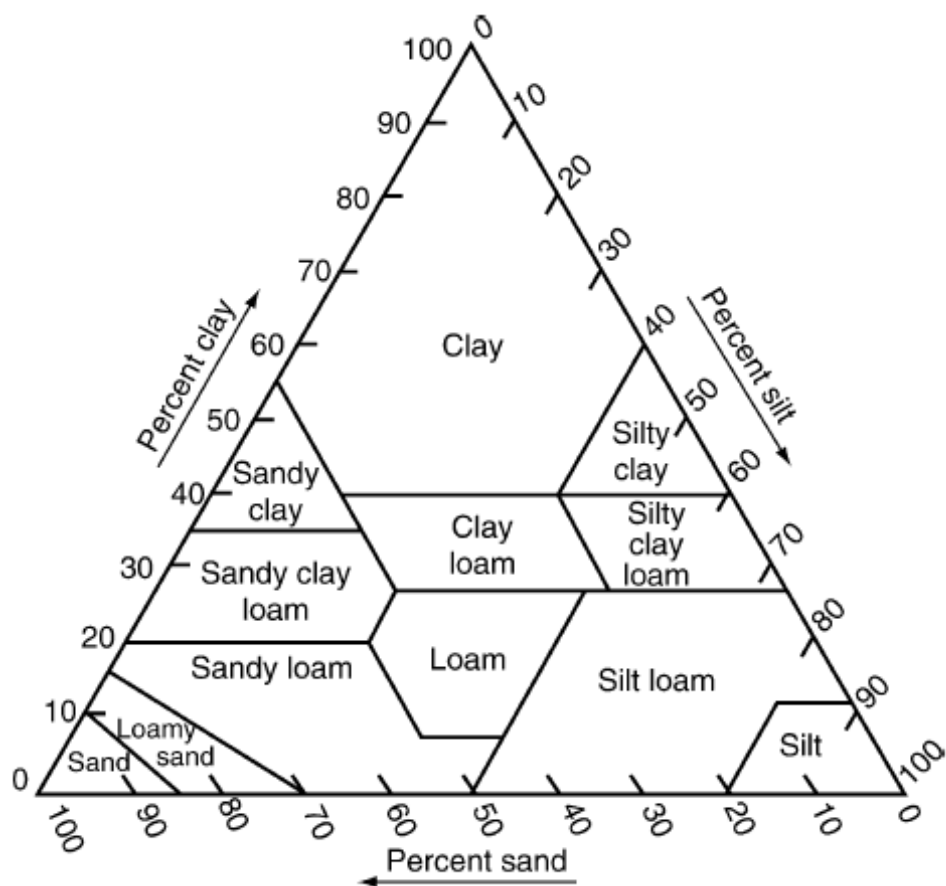
China: their sorption to clays and implication. *Science of the total environment*, 472 : 309-315.

- **Yue, L., Ge, C., Feng, D., Yu, H., Deng, H. and Fu, B., 2017.** Adsorption–desorption behavior of atrazine on agricultural soils in China. *Journal of Environmental Sciences*, 57 :180-189.
- **Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S. and Ahmad, A., 2011.** Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86(1): 1-17.
- **Zarzecka, K., Gugala, M., Sikorska, A., Baranowska, A., Niewe, M., Dolega, H., 2019.** The effect of herbicides and biostimulants on polyphenol content of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers and leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 18:102-106.
- **Zhang, Q., Xia, Z., Wu, M., Wang, L. and Yang, H., 2017.** Human health risk assessment of DDTs and HCHs through dietary exposure in Nanjing, China. *Chemosphere*, 177 : 211 216.
- **Zhang, W., 2018.** Global pesticide use: Profile, trend, cost/benefit and more. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 8(1): 1.
- **Zhang, W.J., van der Werf, W. and Pang, Y., 2011.** A simulation model for vegetable-insect pest-insect nucleopolyhedrovirus epidemic system. *Journal of Environmental Entomology*, 33(3) : 283-301.
- **Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W .,1999.** The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry* 64(4):555-559.
- **Zhou, R., Zhu, L., Yang, K., Chang, Y., 2006.** Distribution of organochlorine pesticide in surface water and sediment from Qiantang River, East China. *J. Hazard Mater.* A137, 68e78.
- **Zhou, Y., Xia, X., Yu, G., Wang, J., Wu, J., Wang, M., ...& Gan, J.,2015.** Brassinosteroids play a critical role in the regulation of pesticide metabolism in crop plants. *Scientific Reports*, 5, 9018. doi:10.1038/sre : 09018.

Références bibliographiques

- **Zhu, S., Niu, L., Aamir, M., Zhou, Y., Xu, C. and Liu, W., 2017.** Spatial and seasonal variations in air-soil exchange, enantiomeric signatures and associated health risks of hexachlorocyclohexanes (HCHs) in a megacity Hangzhou in the Yangtze River Delta region, China. *Science of the Total Environment*, 599 : 264-272.
- **Ziogas , BN., Davidse, LC .,1987.** Studies on the mechanism of action of cymoxanil in *Phytophthora infestans*. *Pestic Biochem Physiol* 29(2):89–96.
[https://doi.org/10.1016/0048-3575\(87\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0048-3575(87)90066-6)

Annexes



Annexe 1 : Triangle de texture proposé par l'USDA (IUSS Working Group WRB, 2006).

Annexe 2 : Préparation des extraits

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. 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 ajouté au milieu à raison de 0.05g/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).

Résumé

Les pesticides sont utilisés en agriculture pour protéger les cultures contre les organismes nuisibles. Ils peuvent également avoir des effets nocifs sur l'environnement, y compris le sol. Ce travail vise à évaluer les effets de l'application des pesticides à dose standard et doubles dans des conditions de terrain sur les réponses morphologiques biochimiques des plants de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L). Ainsi que leurs effets sur la croissance de la microflore du sol (bactéries et champignons) et les propriétés physiques et chimiques du sol. Nos résultats ont montré un effet significatif de l'application de pesticides sur les propriétés biochimiques et antioxydantes de la plante. Des teneurs plus élevées en composés phénoliques et de flavonoïdes ont été observés chez les plantes traitées avec des doses standard et doubles. L'accumulation de malondialdéhyde augmente la peroxydation lipidique en raison de la production excessive d'espèces réactives de l'oxygène. Une augmentation significative des activités de la catalase, de l'ascorbate peroxydase et de la phénylalanine a été enregistrée au stade final de croissance lorsque les plantes ont été traitées avec des doses recommandées et des doses doubles de pesticides par rapport au témoin, ainsi qu'une augmentation du niveau de proline au dernier stade de croissance sous l'application d'une double dose. En revanche, l'application des deux doses a entraîné une diminution de la quantité de chlorophylle et de caroténoïdes au premier stade de croissance et une diminution du taux de thiols aux deux stades de croissance. Les résultats obtenus ont montré que l'application des deux doses de pesticides conduisait à une réduction significative des densités bactériennes de l'ordre de 23% et 50% et de 56% et 91% pour les densités fongiques. Enfin, les résultats ont montré également que le traitement avec des pesticides à des doses élevées à celles recommandées provoquent des perturbations oxydatives chez les plants de pomme de terre et entraînent également une augmentation de la capacité des enzymes antioxydantes, ainsi qu'ils agissent sur la microflore du sol dont le dérèglement de son activité.

Mots clés : pesticides ; *Solanum tuberosum* L; stress oxydatif ; activité biologique; microflore du sol.

Abstract

Pesticides are used in agriculture to protect crops against pests. They can also have harmful effects on the environment, including the soil. This work aims to evaluate the effects of standard and double dose pesticide application under field conditions on the biochemical morphological responses of potato plants (*Solanum tuberosum* L). As well as their effects on the growth of soil microflora (bacteria and fungi) and the physical and chemical properties of the soil. Our results showed a significant effect of pesticide application on the biochemical and antioxidant properties of the plant. Higher contents of phenolic compounds and flavonoids were observed in plants treated with standard and double doses. Malondialdehyde accumulation increases lipid peroxidation due to excessive production of reactive oxygen species. A significant increase in the activities of catalase, ascorbate peroxidase and phenylalanine were recorded at the final stage of growth when the plants were treated with recommended doses and double doses of pesticides compared to the control, as well as an increase in the level of proline in the final stage of growth under the application of a double dose. On the other hand, the application of the two doses led to a decrease in the quantity of chlorophyll and carotenoids for the initial stage of growth and a decrease in the rate of thiols for both stages of growth. The results obtained showed that the application of the two doses of pesticides led to a significant reduction in bacterial densities of around 23% and 50% and 56% and 91% for fungal densities. Finally, the results also showed that the treatment with pesticides for doses higher than those recommended cause oxidative disturbances in potato plants and also lead to an increase in the capacity of antioxidant enzymes, as well as they act on the soil microflora including the disruption of its activity.

Keywords: pesticides; *Solanum tuberosum* L; oxidative stress; biological activity; soil microflora.

المخلص

تستخدم المبيدات في الزراعة لحماية المحاصيل من الكائنات الحية الضارة، حيث يمكن أن يكون لها آثار جانبية على البيئة، بما في ذلك التربة. يهدف هذا العمل إلى تقييم آثار استعمال المبيدات بجرعات موصى بها وجرعات مزدوجة على الاستجابة المورفولوجية الكيميائية والحيوية لنباتات البطاطس وكذلك تأثيرها على نمو الكائنات الدقيقة في التربة (البكتيريا والفطريات) والخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة. أظهرت النتائج تأثيراً هاماً لتطبيق هذه المبيدات على الخواص الكيميائية الحيوية ومضادات الأكسدة للنبات، حيث تم تسجيل مستويات عالية من مركبات الفينول والفلافونويد في النباتات المعالجة بالجرعات القياسية والمزدوجة في مرحلتها النمو. كما يزيد تراكم مالونديالدهيد من خلال أكسدة الدهون بسبب الإنتاج المفرط لأنواع التفاعلات الأوكسجينية. كما تم تسجيل زيادة هامة في أنشطة الكاتالاز، أسكوربات بيروكسيداز وفينيل ألانين في المرحلة النهائية من النمو عند النباتات المعالجة بجرعات موصى بها وجرعات مزدوجة من المبيدات مقارنة بالشاهد، وتزايد أيضاً في مستوى البرولين في المرحلة الأخيرة من النمو في ظل تطبيق الجرعة المزدوجة. من جهة أخرى أدى تطبيق كلتا الجرعتين إلى تخفيض كمية الكلوروفيل والكاروتينات في المرحلة الأولى للنمو وانخفاض في مستوى الثيول في كلتا مرحلتها النمو. أبدت النتائج المتحصل عليها أن استعمال كلتا الجرعتين من المبيدات أدى إلى انخفاض كبير في الكثافة البكتيرية بنسبة 23% و 50% والفطرية بنسبة 56% و 91%. في الأخير أظهرت النتائج أن العلاج بالمبيدات بجرعات أعلى من الموصى بها تسببت في اضطرابات تأكسدية في نباتات البطاطس كما أدت إلى زيادة قدرة الإنزيمات المضادة للأكسدة وكذلك تأثيرها على الكائنات الحية الدقيقة لتربة البطاطس بما في ذلك تعطيل نشاطها.

الكلمات المفتاحية: المبيدات؛ البطاطس؛ الأكسدة؛ النشاط البيولوجي؛ الكتلة الحيوية الدقيقة للتربة.