

Popular Democratic Republic of Algeria
Ministry of High Education and Scientific Research
Abbes Laghrou University- Khenchela-
Natural and life sciences Faculty
Molecular and Cellular Biology Department



N° de série :

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences de la nature et de la vie**

Filière : **Sciences Biologiques**

Spécialité : **Microbiologie appliquée**

Présenté par :

Nawel DJERIDI

Thème

**Etude bibliographique sur la biodégradation
des pesticides**

Mémoire soutenu publiquement le 19/06/ 2025 Devant le jury composé de :

Mme Hanane MELLAL

MCA, Université Abbes Laghrou Khenchela, Président

Mme Keltoum CHORFI

MAA, Université Abbes Laghrou Khenchela, Encadreur

Mme Omaima NAILI

MCA, Université Abbes Laghrou Khenchela, Examineur

Année Universitaire

2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents, mon père et ma mère, Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond respect, mon grand amour et toute ma gratitude pour les sacrifices que vous avez faites pour ma réussite, que dieu puisse vous garder et vous donne une longue vie, et j'espère être à la hauteur de votre estime et votre attentes inshallah.

À mes très chères sœurs: Amel, Hanane et Hakima.

À mes frères: Ridha, Mourad, Mohammed et Younes.

À toute ma chère famille.

À mes malades en anesthésie réanimation.

À tous ceux qui m'ont aidé et soutenu durant mon parcours.

Nawal

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier :

*Dr. **MELLAL H**, Maitre de conférences à l'Université Abbés Laghrour Khenchela qui a honoré ce travail en acceptant de présider le jury. On l'en remercie profondément.*

*Dr. **NAILI O**, Maitre de conférences à l'Université Abbés Laghrour Khenchela, nous vous sommes très reconnaissantes d'avoir accepté d'examiner ce travail et de l'enrichir par vos remarques et propositions.*

*Mon encadreur, **Mme CHORFI K** d'avoir acceptée de m'encadrer, ces modestes mots ne suffisent pas pour lui exprimer toute ma reconnaissance pour la confiance et le grand soutien, pour le temps qu'elle m'a consacrée toutes les fois que cela était nécessaire, pour ses conseils précieux qu'elle m'a prodigués tout le long de mon travail, et pour son aide.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous mes professeurs, qui m'ont appris avec patience et ont éclairé mon chemin par le savoir ; **Mme. CHORFI, Dr. MELLAL, Dr. THABET, Dr. HANOUN, Dr. LEULMI, Dr. DALLI, Dr. HAMMADI**, Que Dieu vous garde.*

Enfin, je tiens à remercier profondément tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Etude bibliographique sur la biodégradation des pesticides

Résumé

La contamination des sols et des eaux par les pesticides constitue une problématique environnementale majeure à l'échelle mondiale. Face aux effets néfastes de ces composés sur la biodiversité et la santé humaine, la biodégradation par les microorganismes naturels émerge comme une solution écologique et durable. L'identification des microorganismes impliqués dans la dégradation des pesticides est devenue un enjeu scientifique essentiel pour optimiser les stratégies de dépollution. Au cours des dernières années, de nombreuses études récentes, publiées, ont porté sur l'isolement et la caractérisation de souches microbiennes capables de biodégrader efficacement différents types de pesticides. Ces travaux ont permis de démontrer la prédominance des bactéries dans la dégradation des pesticides les plus toxiques et les plus utilisés. Les champignons et certaines enzymes microbiennes ont également été étudiés, mais restent moins représentés en raison du manque d'identification spécifique. La présence accrue d'études récentes souligne l'intérêt croissant porté à la compréhension des mécanismes microbiens de biodégradation et ouvre des perspectives prometteuses pour l'utilisation ciblée d'enzymes dans les procédés de bioremédiation.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en s'appuyant sur une analyse bibliographique approfondie afin de mettre en évidence les microorganismes dominants et de proposer de nouvelles approches pour la dépollution des milieux contaminés.

Mots clés: Pesticides, Biodégradation, Bioremédiation, Enzymes microbiennes, Microorganismes.

Overview of Research on the Biodegradation of Pesticides: A Literature-Based Approach

Abstract

Pesticide contamination of soil and water is a major environmental problem worldwide. Faced with the harmful effects of these compounds on biodiversity and human health, biodegradation by natural microorganisms is emerging as an ecological and sustainable solution. Identifying the microorganisms involved in pesticide degradation has become a key scientific issue for optimizing remediation strategies. In recent years, numerous recent published studies have focused on the isolation and characterization of microbial strains capable of efficiently biodegrading different types of pesticides. This work has demonstrated the predominance of bacteria in the degradation of the most toxic and widely used pesticides. Fungi and certain microbial enzymes have also been studied, but remain less represented due to the lack of specific identification. The increased presence of recent studies underlines the growing interest in understanding microbial biodegradation mechanisms and opens up promising prospects for the targeted use of enzymes in bioremediation processes.

This thesis is part of this dynamic by relying on an in-depth bibliographic analysis in order to highlight the dominant microorganisms and to propose new approaches for the decontamination of contaminated environments.

Keywords: Pesticides, Biodegradation, Bioremediation, Microbial Enzymes, Microorganisms.

عرض لأهم الأبحاث حول التحلل الحيوي للمبيدات : مقارنة قائمة على المصادر العلمية

ملخص

يُعد تلوث التربة والمياه بالمبيدات مشكلة بيئية رئيسية في جميع أنحاء العالم. وفي مواجهة الآثار الضارة لهذه المركبات على التنوع البيولوجي وصحة الإنسان، يبرز التحلل البيولوجي بواسطة الكائنات الحية الدقيقة الطبيعية كحل بيئي مستدام. وقد أصبح تحديد الكائنات الحية الدقيقة المشاركة في تحلل المبيدات قضية علمية رئيسية لتحسين استراتيجيات المعالجة. في السنوات الأخيرة، ركزت العديد من الدراسات المنشورة حديثاً على عزل وتوصيف السلالات الميكروبية القادرة على التحلل البيولوجي الفعال لأنواع مختلفة من المبيدات. وقد أظهر هذا العمل هيمنة البكتيريا في تحلل أكثر المبيدات سميةً وانتشاراً. كما دُرست الفطريات وبعض الإنزيمات الميكروبية، ولكن لا تزال تمثيلها أقل نظراً لعدم وجود تعريف محدد لها. ويؤكد تزايد الدراسات الحديثة الاهتمام المتزايد بفهم آليات التحلل البيولوجي الميكروبي، ويفتح آفاقاً واعدة للاستخدام المستهدف للإنزيمات في عمليات المعالجة البيولوجية. وتشكل هذه الأطروحة جزءاً من هذه الديناميكية من خلال الاعتماد على تحليل بيليوغرافي معمق من أجل تسليط الضوء على الكائنات الحية الدقيقة السائدة واقتراح أساليب جديدة لإزالة التلوث من البيئات الملوثة.

الكلمات المفتاحية : المبيدات الحشرية، التحلل البيولوجي، المعالجة البيولوجية، الإنزيمات الميكروبية، الكائنات الحية الدقيقة.

Table de matières

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des abréviations.....	iii

Revue Bibliographique

Chapitre I: Généralités sur les pesticides

<i>Introduction générale</i>	1
I. Les pesticides	4
II. Classification des pesticides	4
II.1. Selon leur toxicité	4
II.2. Selon leur cible	4
II.3. Selon leur origine	5
II.4. Selon leur mécanisme d'action	6
III. La composition des pesticides	6
VI. Consommation mondiale des pesticides	7
V. Devenir environnemental des pesticides	8
V.1. Dégradation des pesticides dans le sol	9
VI. Impacts des pesticides	10
VI.1. Sur la santé humaine	10
VI.1.1. Pesticides cancérigènes	11
VI.2. Impacts des résidus de pesticides sur la biodiversité	13
VII. Pesticides les plus répandus et leurs effets toxiques	13
VII.2. Les Organophosphorés	14
VII.3. Les Carbamates	14
VII.4. Les Pyréthroïdes	15
VII.5. Néonicotinoides	15
VIII. Suivi et gestion des pesticides	16
IX. Réglementation des pesticides en Algérie	17

Chapitre II: Biodégradation des pesticides

I. Dégradation microbienne des pesticides	20
II. Diversité microbienne	21

II.1. Voies Métaboliques	21
II.2. Remédiation enzymatique	22
II.2.1. Processus enzymatique de biotransformation des pesticides	24
II.3. Bactéries, une solution prometteuse	24
II.4. Champignons	25
II.5. Capacités de biodégradation des Actinomycètes	27
II.6. Potentiel des microalgues dans la dépollution des eaux contaminées	27
II.7. Génétique pour la dégradation des pesticides	28
II.1. Gènes codant les hydrolases	30
II.2. Gènes codant les mono- et dioxygénases	30
II.3. Gènes codant les laccases et peroxydases (chez les champignons)	30
II.4. Gènes de transport et résistance	31
Chapitre III: Synthèse des études antérieures	
I. Stratégie de recherche documentaire	33
II. Sources de données	33
III. Période couverte et critères de sélection	34
IV. Sélection des publications	34
V. Résultats et discussion	35
V.1. Analyse temporelle des publications scientifiques	35
V.2. Diversité géographique des publications sélectionnées	36
V.2.1. Pays à forte contribution scientifique	37
V.2.2. Pays à contribution modérée mais significative	38
V.2.3. Intérêt croissant dans des pays émergents ou peu représentés	38
V.3. Les classes des pesticides les plus étudiés	38
V.4. Diversité géographique des Microorganismes impliqués dans la biodégradation des pesticides	39
VI. Situation en Algérie	43
<i>Conclusion et perspectives</i>	46
<i>Références bibliographiques</i>	46

Liste des tableaux

Tableau 01: Classification des pesticides selon l'OMS	04
Tableau 02: Enzymes utilisées dans la biorestauration	23
Tableau 03: Exemples de bactéries dégradant les pesticides	25
Tableau 04: Algues ayant une fonction de biorestauration	28
Tableau 05: Gènes ayant la capacité de dégrader les pesticides	29
Tableau 06: Les microorganismes les plus cités dans les publications sélectionnées	40
Tableau 07: Répartition des microorganismes, enzymes et gènes impliqués dans la biodégradation des pesticides par pays	41

Liste des figures

Figure 01: Classification générale des pesticides	05
Figure 02: Mode d'action des pesticides.....	06
Figure 03: Utilisation des pesticides de 2016 à 2021	08
Figure 04: Devenir et transport des pesticides dans le système hydrogéologique	09
Figure 05: Modes d'entrée des pesticides et effets de l'exposition aux pesticides sur la santé humaine	11
Figure 06: L'exposition aux pesticides et le cancer du sein	12
Figure 07: Les pesticides sont une source de cancer du poumon	12
Figure 08: Processus abiotiques et biotiques influençant le devenir des pesticides	19
Figure 09: Principaux micro-organismes et leurs enzymes et gènes impliqués dans la dégradation des pesticides	20
Figure 10: Gènes et enzymes utilisés en biodégradation des pesticides.	30
Figure 11: Nombre de publications sélectionnées par année.	35
Figure 12: Répartition géographique des publications scientifiques sélectionnées.....	36
Figure 13: Répartition des publications sélectionnées par pays	37
Figure 14: Analyse du pourcentage des différentes classes des pesticides étudiés.	39
Figure 15: Relations évolutives entre les espèces intéressantes et l'ensemble des taxons identifiés.	45

Liste des abréviations

API	Appareil et procédés d'identification
ARNr16S	Gène codant la sous-unité 16S de l'ARN ribosomal
ChE	Cholinestérase
CO₂	Dioxyde de carbone
CYP	Cytochrome P450
DL50	Dose létale 50
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
EPA	Agence américaine de protection de l'environnement
EstP	L'estérase hydrolytique pyréthroïde
FAO	Food and agriculture organization
GC-MS	Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse
HPLC	Chromatographie liquide haute performance
H₂O	L'eau
IPM	Pratiques de gestion intégrée des ravageurs
ITCMI	Institut Technique des Cultures Maraichères
Lac	Laccase
LiP	Lignine peroxydases
LinA	Haloalcane déshydrochlorinases
LinB	Haloalcane déshalogénase bactérienne
LinC	2,5- dichloro-2,5-cyclohexadiène-1,4-diol déshydrogénase
MALDI-TOF-MS	Matrix Associated Lazer Desorption Ionization –Time of Flight – Mass Spectrometry
MnP	Peroxydases de manganèse
MPH	Méthyl parathion hydrolase
nAChR	Récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine
OC	Organochlorés
OP	Organophosphorés

OPAA	Organophosphorus acid anhydrolase
OPH	Organophosphate hydrolase
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCB	Polychlorobiphényles
PH	Potentiel hydrogène
POD	Peroxydase
POPs	Polluants Organiques Persistants
PytH	Carboxylestérase
PytY	Carboxylestérase pyréthroïde
SNDL	Système national de documentation en ligne
UV	Rayons ultraviolet
VP	Peroxydase polyvalente
WRF	White Rot Fungi

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, 5 000 mégahectares (38 % de la surface terrestre) de terres sur Terre sont utilisés pour le développement agricole. Cette surface peut être divisée en trois parties : une partie représente les cultures et les deux autres sont des prairies et des pâturages. Pour maintenir les cultures propres à la consommation humaine, exemptes de parasites et maximiser leur production, il est nécessaire d'appliquer des pesticides ; selon Clark et Tilman, d'ici 2030, la population mondiale devrait atteindre 8,5 milliards de personnes, ce qui entraînera une augmentation de l'utilisation de pesticides (**Clark & Tilman, 2017**).

Les pesticides sont utilisés pour éradiquer un large éventail de parasites qui constituent une menace pour les cultures, le bétail et la productivité globale des exploitations agricoles. De plus, ils ont des applications polyvalentes, servant de régulateurs de croissance des plantes (pour stimuler ou entraver la croissance), de défoliants (induisant une chute des feuilles ou du feuillage), des dessiccants (accélérant artificiellement le séchage des tissus végétaux) et des stabilisateurs d'azote (inhibant la nitrification, la dénitrification, la volatilisation de l'ammoniac ou la production d'uréase en affectant les bactéries du sol) (**Kashyap et al., 2024**).

Les pesticides sont utilisés dans l'agriculture depuis au moins 80 ans. Le premier pesticide mis au point fut le dichloro-diphényl-trichloroéthane (DDT). Vingt ans après sa découverte, son utilisation agricole a été interdite. Depuis l'introduction du DDT, de nombreux autres types de pesticides ont été commercialisés, la plupart affirmant être sans danger (**Guerrero Ramirez et al., 2023**).

La réglementation des pesticides varie selon les pays à travers le monde, mais elle repose généralement sur trois piliers :- Évaluation scientifique des risques pour la santé humaine et l'environnement,- Autorisation de mise sur le marché - Contrôle de l'usage et des résidus.

L'Algérie dispose d'un cadre réglementaire relativement complet pour encadrer l'usage des pesticides, mais sa mise en œuvre reste confrontée à des défis tels une surveillance limitée sur le terrain, un contournement des circuits officiels et un manque de sensibilisation des utilisateurs.

L'utilisation massive de pesticides dans l'agriculture moderne a permis de répondre aux besoins croissants de production alimentaire en limitant les pertes liées aux ravageurs et aux maladies des cultures. Toutefois, cette pratique n'est pas sans conséquence. Une partie importante des pesticides appliqués n'atteint pas sa cible et s'accumule dans les compartiments environnementaux, notamment dans les sols (**Rasool et al., 2022**).

Cette contamination des sols et des eaux par des résidus de pesticides est un problème environnemental majeur, qui a des conséquences à long terme et de grande portée sur les écosystèmes et le bien-être humain. Les résidus de pesticides peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes, s'accumuler dans la chaîne alimentaire et avoir ainsi des effets néfastes sur la fertilité des sols, l'activité microbienne et la biodiversité. De plus, ces pesticides pénètrent dans les plans d'eau (rivières, lacs, nappes phréatiques) par lessivage et ruissellement et ont des effets délétères sur la vie aquatique et la santé humaine en raison de la consommation d'eau contaminée (**Kashyap et al., 2024**).

Face à cette problématique, la **biodégradation** apparaît comme un mécanisme naturel prometteur pour atténuer la pollution des sols. Elle désigne l'ensemble des processus biologiques par lesquels des organismes vivants, principalement des microorganismes, transforment ou minéralisent des substances chimiques complexes en composés plus simples, souvent moins toxiques. Ce processus repose largement sur l'activité métabolique de microorganismes tels que **les bactéries, les champignons** et, dans une moindre mesure, **les algues**. Ces organismes possèdent des systèmes enzymatiques capables de décomposer les molécules organiques complexes que représentent les pesticides (**Guerrero Ramirez et al., 2023**).

Cependant, la capacité de biodégradation varie fortement selon le type de microorganisme, la structure chimique du pesticide, les conditions environnementales (pH, température, humidité, teneur en matière organique), ainsi que les interactions entre les différentes communautés microbiennes.

Dès lors, une question centrale se pose : **quels sont les types de microorganismes les plus efficaces pour assurer la biodégradation des pesticides ?**

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé une recherche bibliographique sur les travaux antérieurs ayant la même thématique que la nôtre.

Nous aborderons tout au long de ce mémoire, les chapitres suivants :

- **Le premier chapitre** présente des généralités sur les pesticides, leur utilisation et leurs impacts.
- **Le deuxième chapitre** se concentre sur la biodégradation des pesticides par les micro-organismes.
- **Le troisième chapitre** est une synthèse des études antérieures sur le sujet.

CHAPITRE I :
Généralités sur les pesticides

I. Les pesticides

Selon la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), un pesticide est une substance ou un mélange de substances destiné à prévenir, détruire ou contrôler tout organisme nuisible, y compris les vecteurs de maladies humaines ou animales, les espèces indésirables de plantes ou d'animaux causant des dommages pendant ou interférant de toute autre manière avec la production, la transformation, le stockage, le transport ou la commercialisation de denrées alimentaires, de produits agricoles, de bois, de produits du bois ou d'aliments pour animaux, ou les substances qui peuvent être administrées aux animaux pour lutter contre les insectes, les arachnides ou d'autres organismes nuisibles dans ou sur leur corps (WHO, 2020).

II. Classification des pesticides

Les pesticides peuvent être regroupés en fonction de leur toxicité, de leur application, de leur nature chimique, des organismes ciblés ou des types de nuisibles qu'ils tuent.

II.1. Selon leur toxicité

L'OMS (Organisation mondiale de la santé) propose une classification basée sur la dose létale 50 du pesticide (DL50), qui représente la dose nécessaire pour tuer la moitié de la population testée après une durée de test standardisée. L'OMS rapporte la DL50 pour deux types d'exposition aux substances, cutanée et orale. Cette classification (**Tableau 01**) est très utile car elle donne des informations sur les risques pour la santé de tout type de pesticide.

Tableau 01: Classification des pesticides selon l'OMS (Guerrero Ramirez et al., 2023).

Classe	DL orale 50 pour le rat (mg/kg de poids corporel)	DL cutanée 50 pour le rat (mg/kg de poids corporel)
Ia: Extrêmement dangereux	<5	<50
Ib: Très dangereux	5–50	50–200
II: Modérément dangereux	50–2000	200–2000
III: Légèrement dangereux	Plus de 2000	
U: Peu Susceptible de présenter un danger aigu	5000 ou plus	

DL₅₀: dose létale pour 50% de rat en mg/kg de poids corporel vif.

II.2. Selon leur cible

Les pesticides les plus courants et leurs nuisibles ciblés sont classés en six groupes et représentés sur la **figure 01**. Ce sont les **herbicides** (tuent les mauvaises herbes), les

insecticides (tuent les insectes) et **les fongicides** (antifongiques), **les rodenticides** (tuent les rongeurs), **les larvicides**, **les nématocides** (utilisés contre les nématodes parasites des plantes), **les acaricides** (contre les acariens et les tiques), **les algicides** (toxiques pour les algues), ainsi que **les bactéricides**, **les répulsifs pour oiseaux** et **répulsifs pour mammifères** (Dixit et al., 2024).

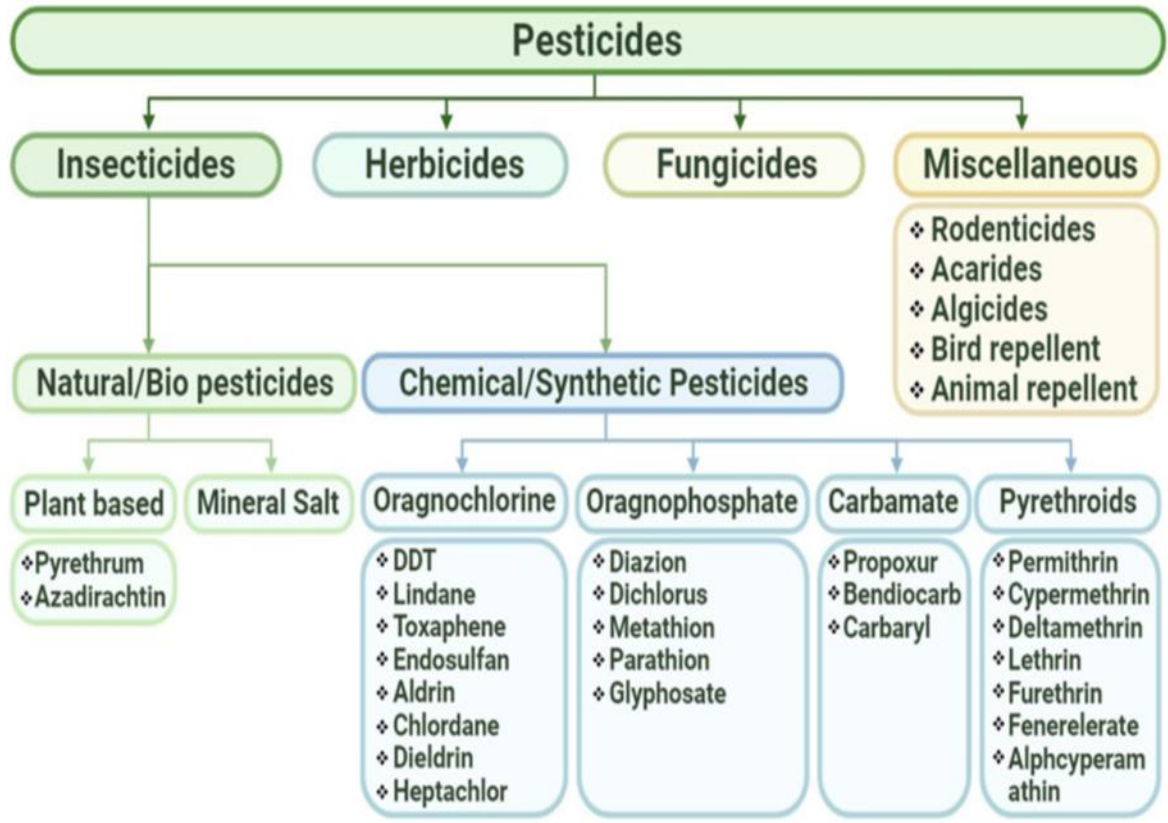


Figure 01: Classification générale des pesticides (Gupta, 2019).

II.3. Selon leur origine

Tous ces groupes de pesticides peuvent également être classés en fonction de leur origine, comme l'origine synthétique ou naturelle. (Figure 01)

Les pesticides **synthétiques** ou **chimiques** sont produits par altération chimique, tandis que les pesticides **naturels** ou **biopesticides** désignent des produits dérivés strictement de sources naturelles avec peu ou pas d'altération chimique (Kim et al., 2024 ;Vidal et al., 2024), Les biopesticides sont plus respectueux de l'environnement que les pesticides chimiques.

Les pesticides synthétiques peuvent être classés en deux groupes principaux : les pesticides **organiques** et les pesticides **inorganiques**.

Les pesticides organiques sont classés en quatre groupes différents : les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates et les pyréthroïdes (Dixit et al., 2024).

II.4. Selon leur mécanisme d'action

Les pesticides sont également classés selon leur mode d'action, qui décrit comment ils tuent ou contrôlent les nuisibles. Les inhibiteurs de l'acétylcholinestérase, qui perturbent la fonction nerveuse des insectes ; les inhibiteurs du transport d'électrons mitochondriaux, qui perturbent la production d'énergie dans les cellules ; et les régulateurs de croissance, qui entravent le développement des insectes, sont des exemples de modes d'action. Les pesticides agissent en attirant, en incitant, puis en tuant ou en repoussant les insectes. En agriculture, des nanoparticules contenant de la silice sont utilisées pour lutter contre les insectes (El-Naggaret al., 2020).

En fait, ils sont absorbés et transportés dans les lipides de la couche cuticulaire des insectes, qui sont endommagés et provoquent la mort des insectes (Sawet al., 2023). Les pesticides agissent également sur les vers et les nuisibles pour les tuer, et leur mode d'action est décrit dans la **Figure 02**.

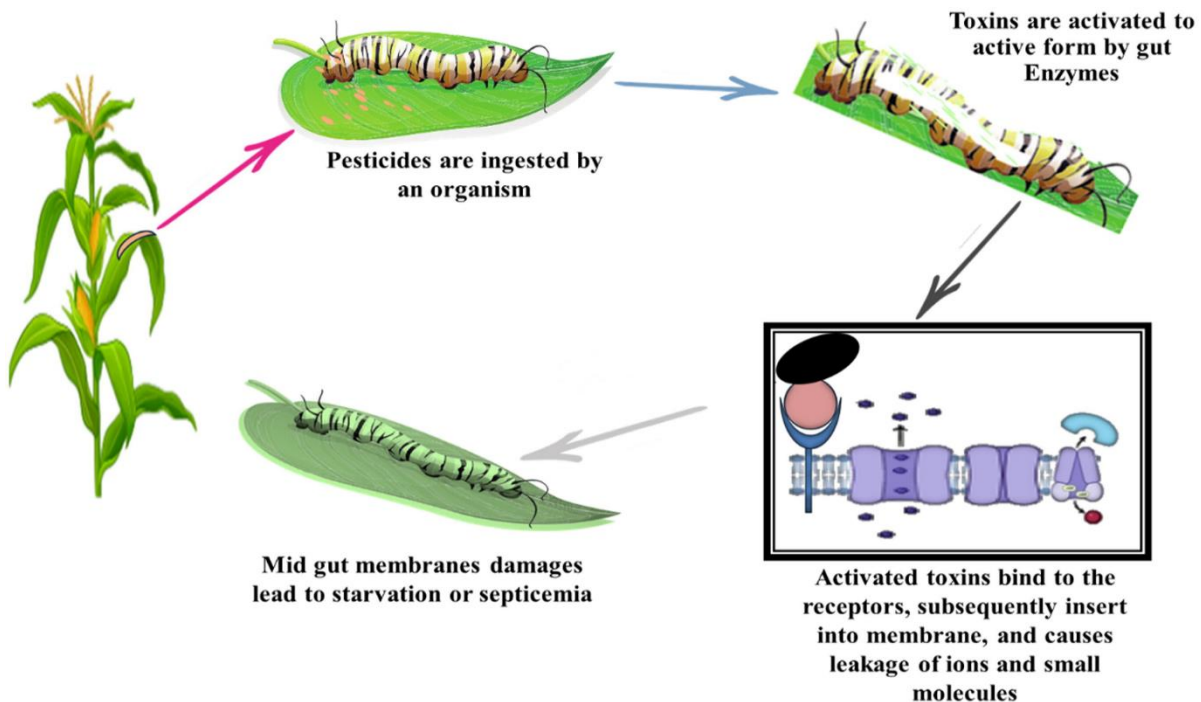


Figure 02: Mode d'action des pesticides (Rajamani & Negi, 2021).

III. La composition des pesticides

Les pesticides sont constitués de matières actives, nécessitant des ingrédients diluants ou adjuvants pour qu'ils puissent être utilisés (Inserm, 2021).

Enfin, pour éviter tout risque pour la santé humaine et animale, il est essentiel de manipuler et de stocker correctement les pesticides. La fiche signalétique du produit contient généralement des informations sur les ingrédients dangereux des pesticides (**CCHST, 2023**).

Les pesticides sont composés de 2 parties :

La 1^{ère} partie la substance active: c'est la partie biologiquement active cette substance est responsable de l'effet toxique ou répulsif qui élimine ou contrôle les nuisibles, il peut être d'origine : - **Minérale** (soufre, cuivre, zinc).

- **Organique de synthèse** (carbamates).

- **Végétale.**

- **Chimique de synthèse** (glyphosate).

La 2^{ème} partie les formulants: ce sont des préparations n'ayant pas d'activité biologique, inclus dans une préparation phytosanitaire lors de la formulation afin de conférer les propriétés nécessaires à sa mise en œuvre, leur rôle est d'améliorer la stabilité du produit, de favoriser une meilleure adhérence sur les surfaces traitées, ou d'assurer une répartition uniforme de la substance active. Les formulants comprennent :

- **Les diluants** (Matières inertes neutres argile, solvant, eau).

- **Les Adjuvants** (Mouillants, adhésifs, anti-mousses, dispersifs, stabilisants) (**Faubert, 2020**).

VI. Consommation mondiale des pesticides

Pour assurer la sécurité alimentaire de la population mondiale croissante, tous les efforts doivent être faits pour stimuler la production agricole (**Zhang et al., 2007**). Réduire les pertes de récoltes dues aux dégâts causés par les ravageurs est l'une des tâches les plus cruciales pour garantir la production agricole (**Peshin et al., 2009 ; Peshin et Zhang, 2014**).

Il convient de souligner que les cultures sont endommagées par environ 9 000 espèces d'insectes et d'acariens, 50 000 types de maladies des plantes et 8 000 espèces de mauvaises herbes dans le monde. Les insectes nuisibles étaient responsables d'environ 14 % des pertes, les maladies des plantes de 13 % et les mauvaises herbes de 13 %. On estime que les pesticides protègent environ un tiers des cultures agricoles. Il a été observé que sans pesticides, les pertes dues aux dégâts causés par les insectes sur les fruits, les légumes et les céréales pourraient atteindre respectivement 78, 54 et 32 %. Alors que, lorsque des insecticides étaient utilisés, les pertes de récoltes dues aux dommages causés par les ravageurs diminuaient de 35 à 42 % (**Ortiz-Hernández et al., 2013**).

L'utilisation des pesticides n'a cessé d'augmenter au cours des dernières décennies. Entre 2016 et 2021, leur usage a connu une croissance régulière (**Figure 03**) ; et si l'on examine les données sur une période plus longue, de 1990 à 2016, la tendance à une augmentation annuelle en tonnes est encore plus évidente (**Guerrero Ramirez et al., 2023**).

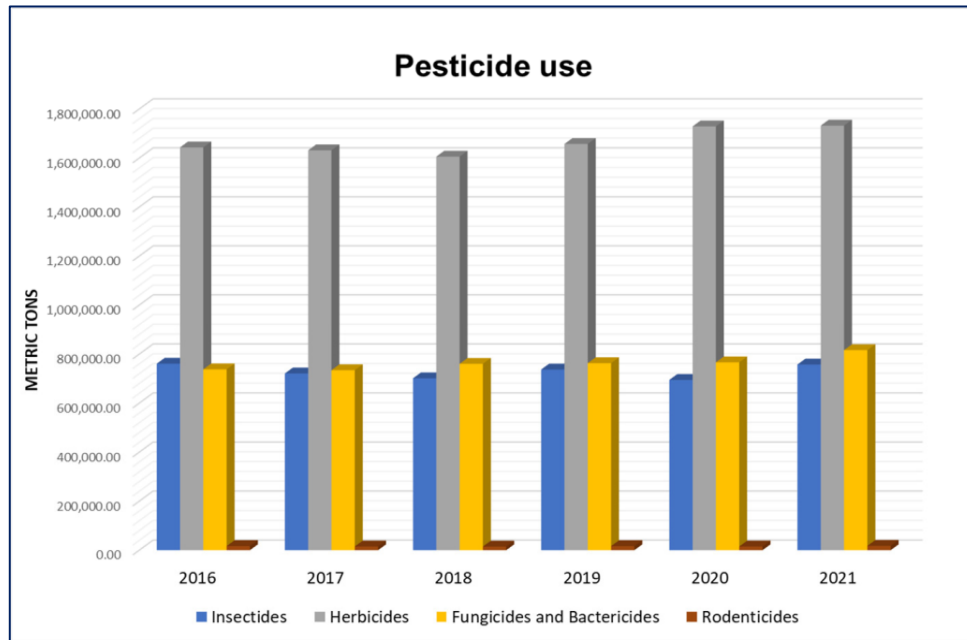


Figure 03: Utilisation des pesticides de 2016 à 2021 (**Guerrero Ramirez et al., 2023**).

V. Devenir environnemental des pesticides

Le devenir des pesticides après leur application sur les cultures dépend de plusieurs mécanismes. Dans un premier temps, les pesticides adhèrent aux feuilles, aux tiges et aux fruits des plantes traitées. Les insecticides systémiques, en raison de leur capacité à être absorbés par la plante, peuvent circuler dans le système vasculaire et atteindre différentes parties de l'organisme végétal (**Lushchak et al., 2018**).

Certains pesticides subissent des transformations métaboliques à l'intérieur des plantes, rendues possibles par l'action des enzymes végétales. Ce processus peut contribuer à réduire leur toxicité en les détoxifiant.

Les pesticides ayant une pression de vapeur élevée peuvent se volatiliser dans l'atmosphère, ce qui entraîne un déplacement hors de la zone ciblée et peut affecter des plantes non visées (**Bish et al., 2021**). La photodégradation, déclenchée par l'exposition à la lumière solaire, contribue également à la décomposition des molécules de pesticides.

Les pesticides solubles dans l'eau présentent un risque de lessivage vers le sol, ce qui peut entraîner une contamination des nappes phréatiques. Le ruissellement de surface, notamment après des pluies, peut transporter les pesticides vers les cours d'eau environnants,

aggravant la pollution hydrique. Les pesticides peuvent se retrouver dans les sédiments et les organismes aquatiques, qui présentent une bioaccumulation et une bioamplification ultérieure au niveau trophique (**Reichenberger et al., 2007**).

La persistance des pesticides varie : certains se dégradent rapidement, tandis que d'autres présentent un risque d'accumulation dans l'environnement. Leur utilisation peut également avoir des effets écologiques sur des organismes non ciblés, comme les insectes bénéfiques ou la faune aquatique.

Comprendre ces mécanismes est essentiel pour réduire l'empreinte écologique des pesticides et favoriser des pratiques agricoles plus durables et respectueuses de l'environnement. Les pesticides peuvent être absorbés par les plantes, se volatiliser, s'infiltrer dans les sols, ou être dégradés par l'activité microbienne (**Figure 04**).

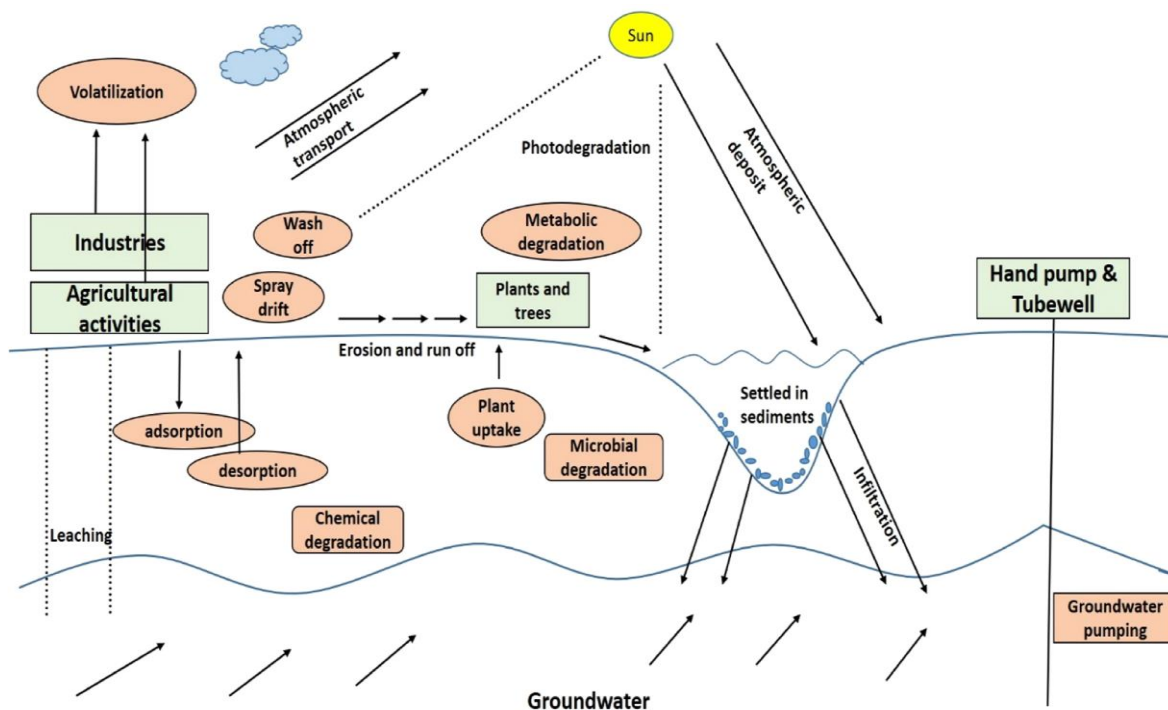


Figure 04: Devenir et transport des pesticides dans le système hydrogéologique (**Kashyap et al., 2024**).

V.1. Dégradation des pesticides dans le sol

La dégradation des pesticides se produit par de nombreux processus, notamment par action chimique et microbienne. La dégradation chimique des pesticides se produit sous forme de solutés en phase liquide ou sous forme adsorbée sur les surfaces solides. Les transformations chimiques comprennent l'hydrolyse, les réactions redox et la photolyse, parmi lesquelles l'hydrolyse domine la plupart. Les micro-organismes sont les principaux

spécialistes associés à la décomposition des pesticides dans le sol. La dégradation microbienne dans le sol est de deux types.

Dans le premier cas, il n'y a pas ou très peu de dégradation au contact des pesticides avec les microbes, mais plus tard, certains microbes s'adaptent pour utiliser les pesticides comme source d'énergie car les pesticides contiennent du carbone.

Dans un autre type, la dégradation des pesticides commence dès que les pesticides atteignent le sol. Cela se produit parce que la dégradation est catalysée par des enzymes présentes dans la population microbienne. Cependant, la présence de microbes ayant des enzymes de dégradation appropriées n'est pas une condition suffisante pour la dégradation des pesticides, mais la dégradation des pesticides dépend également d'un large éventail de facteurs environnementaux. L'adsorption par les argiles et la matière organique peut protéger les pesticides de la biodégradation en retardant leur libération dans la solution. Certaines bactéries sont capables de s'adapter aux sols contaminés par des pesticides. Ces bactéries peuvent provoquer l'hydrolyse des liaisons phosphore-oxygène, phosphore-fluor, phosphore-soufre et phosphore-carbone présentes dans la plupart des pesticides organophosphorés en raison des enzymes qu'elles contiennent. Plusieurs pesticides ne sont pas disponibles pour la dégradation microbienne, ce qui suggère que la désorption des pesticides liés en phase aqueuse est une condition préalable à la biodégradation. Les micro-organismes peuvent utiliser directement les molécules adsorbées ou favoriser la désorption d'une manière ou d'une autre pour décomposer les insecticides adsorbés (**Rasool et al., 2022**).

Les phytomicrobiomes, qui englobent divers microbes endophytes qui contribuent à la dégradation de nombreux composés, dont les pesticides, sont devenus une voie essentielle dans les processus de biodégradation des pesticides. Ces écosystèmes microbiens imprègnent chaque partie de la plante, des racines aux feuilles, créant un paysage de possibilités à multiples facettes (**Salam et al., 2024**).

VI. Impacts des pesticides

VI.1. Sur la santé humaine

L'exposition humaine aux produits agrochimiques présente de graves risques pour la santé.

Les êtres humains peuvent être exposés aux pesticides et autres produits agrochimiques par ingestion (voie orale), par contact avec la peau (voie cutanée) ou par inhalation, entraînant divers effets nocifs sur la santé.

Une méta-analyse réalisée par Xie et al. a montré que l'exposition aux pesticides augmente le risque de plusieurs types de cancers, notamment le cancer de la prostate et le lymphome non hodgkinien. Dans un article publié dans Nature Reviews Neurology, Rodrigues et al. ont souligné les effets neurologiques des pesticides, dont un risque accru de maladie de Parkinson (Xie *et al.*, 2024 ; Rodrigues *et al.*, 2022).

Selon Jain et al., l'exposition aux pesticides est également liée à une diminution de la fertilité et à des malformations congénitales. On estime qu'environ 90 % de l'exposition aux pesticides se fait par voie cutanée (Jain, *et al.*, 2023).

Les effets toxiques peuvent varier des symptômes bénins comme des irritations cutanées ou des réactions allergiques, jusqu'à des symptômes graves tels que forts maux de tête, nausées, étourdissements, etc. En outre, une telle exposition peut affaiblir le système immunitaire, augmentant la vulnérabilité aux maladies auto-immunes et aux infections. Une exposition prolongée peut entraîner des troubles chroniques, allant de la cancérogenèse à d'autres maladies graves (Kashyap *et al.*, 2024). (Figure 05).

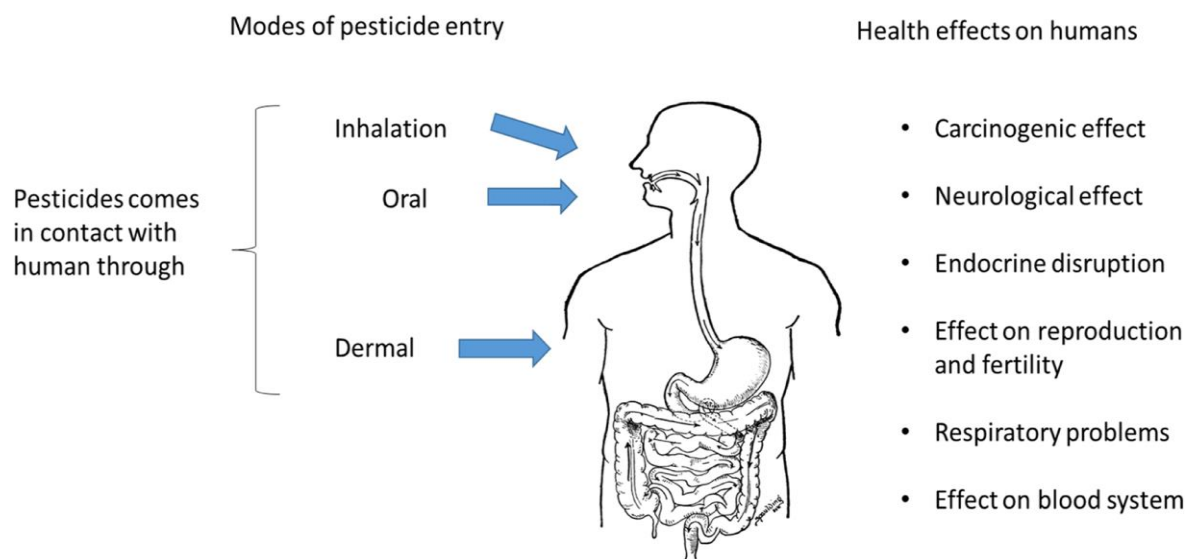


Figure 05 : Modes d'entrée des pesticides et effets de l'exposition aux pesticides sur la santé humaine (Kashyap *et al.*, 2024).

VI.1.1. Pesticides cancérogènes

De nombreuses études sur modèles animaux ont montré que certains pesticides, notamment les organochlorés et les sulfates, peuvent provoquer des cancers. D'autres, comme le chlordane, le lindane et le DDT (organochloré), sont particulièrement associés à l'apparition de tumeurs (Oirdi *et al.*, 2024).

Les pesticides organophosphorés, en interaction avec l'œstrogène, pourraient transformer des cellules mammaires saines en cellules cancéreuses. Ce mécanisme, observé *in vitro* et chez l'animal, implique une instabilité génétique, l'activation d'oncogènes et l'inactivation de gènes suppresseurs de tumeurs, augmentant ainsi le risque de cancer du sein chez les femmes.

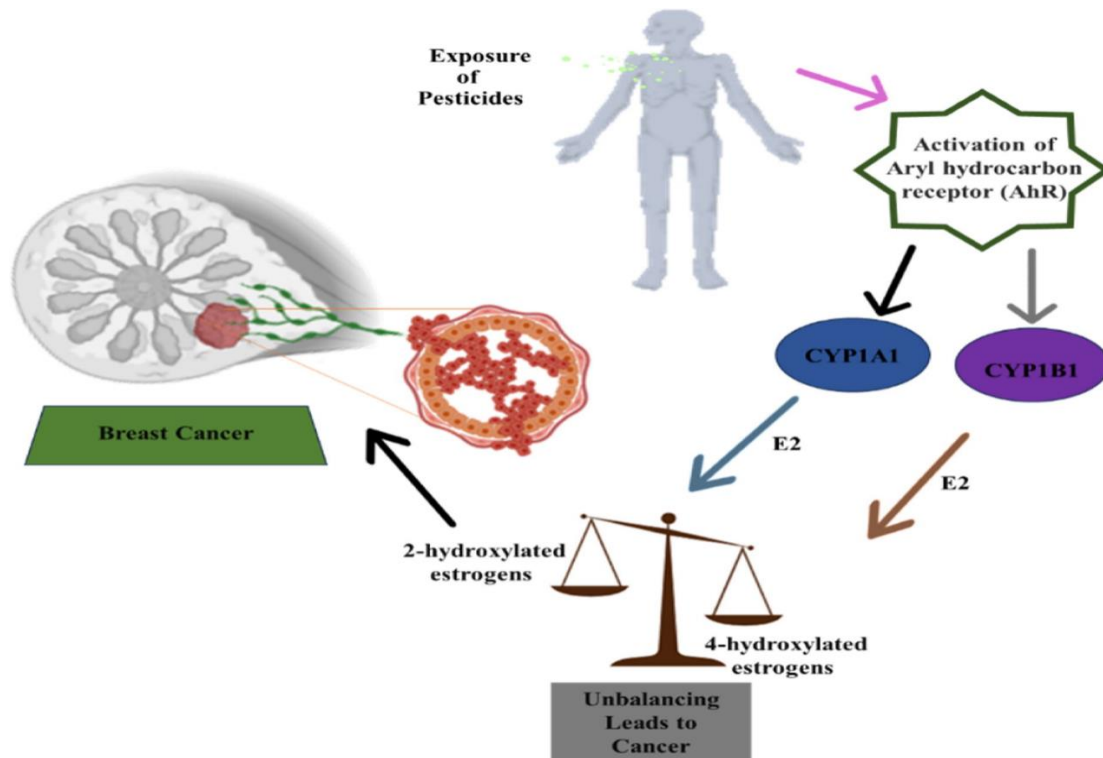


Figure 06 : L'exposition aux pesticides et le cancer du sein (L'Héritier *et al.*, 2014).

Les pesticides ont également été associés à une dilatation des canaux mammaires, favorisant le développement du carcinome canalaire, tandis que l'œstradiol est lié aux carcinomes lobulaires (Nair & Sujatha, 2012).

Ces substances, ainsi que l'esérine et les œstrogènes, provoquent aussi des tumeurs dans les canaux mammaires et les poumons, qui peuvent ensuite se propager aux reins après 240 jours. D'autres sources de cancer du poumon sont également répertoriées sur la **Figure 07** (Bonner *et al.*, 2017).

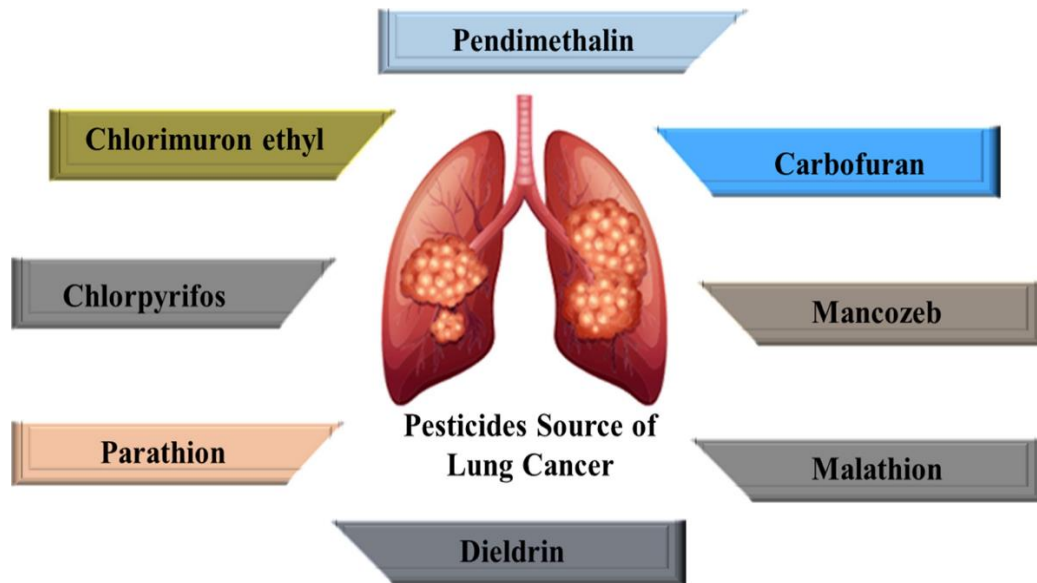


Figure 07: Les pesticides sont une source de cancer du poumon (Bonner *et al.*, 2017).

VI.2. Impacts des résidus de pesticides sur la biodiversité

Les résidus de pesticides étant stables dans l'environnement, ils ont souvent un comportement persistant et présentent des effets dangereux sur les organismes non ciblés et non nuisibles. Ces produits chimiques sont hautement toxiques pour les organismes (mammifères, amphibiens, oiseaux, poissons et insectes) en cas d'exposition (Kashyap *et al.*, 2024).

Certains pesticides persistent obstinément dans le sol, exerçant une influence sur le réseau complexe du microbiome du sol. D'autres, caractérisés par leur mobilité, s'infiltrent dans le sol et peuvent finalement contaminer les sources d'eau souterraine. À long terme, l'application effrénée de pesticides dans le sol est corrélée à une diminution de la diversité et de l'abondance bactériennes. Les pesticides ne se limitent pas au sol ; leurs effets se répercutent sur les autres écosystèmes (Salam *et al.*, 2024).

VII. Pesticides les plus répandus et leurs effets toxiques

Les organochlorés (OC), les organophosphorés (OP), les carbamates et les pyréthroides synthétiques (SP) sont hautement bioaccumulables et montrent donc une bioamplification dans la chaîne alimentaire et plus tard dans le réseau trophique. La toxicité biologique ainsi causée par ces substances est très préoccupante (Tanabe *et al.*, 1997).

VII.1. Les Organochlorés

Connus pour leur persistance à long terme dans l'environnement, les organochlorés sont aujourd'hui moins couramment utilisés en raison de leur potentiel de bioaccumulation et de leurs impacts écologiques néfastes.

Ils font partie des premiers pesticides à avoir été fabriqués et sont largement utilisés en agriculture. Ils sont définis comme un composé organique ayant au moins un atome de chlore lié de manière covalente qui influence le comportement chimique de la molécule. Les pesticides organochlorés sont considérés comme la classe de pesticides la plus nocive en raison de certains de leurs produits chimiques actifs qui peuvent rester dans l'environnement pendant plus de 30 ans. Par conséquent, leur détection et leur élimination sont importantes et comprennent la mise en œuvre de plusieurs techniques de détection pour limiter les effets néfastes de la contamination par ces pesticides sur l'environnement et la chaîne d'approvisionnement alimentaire (**Dixit et al., 2024**).

De nombreux troubles aigus et chroniques sont causés par les OC. Les symptômes d'une intoxication aiguë sont une irritation cutanée, des tremblements, des étourdissements, des maux de tête, des problèmes respiratoires, des nausées et des convulsions. Les maladies chroniques comprennent le cancer, les malformations congénitales, les lésions neurologiques, le dysfonctionnement du système immunitaire, les maladies respiratoires et la maladie de Parkinson (**Kashyap et al., 2024**).

Exemples: la dieldrine, l'endosulfan, l'endrine, l'heptachlore, hexachlorobenzène, lindane (γ -hexachlorocyclohexane), dicofol, mirex, képone et pentachlorophénol.

VII.2. Les Organophosphorés

Les pesticides organophosphorés (OP) sont des pesticides dérivés de l'acide phosphorique qui sont classés comme pesticides à large spectre. Actuellement, les composés organophosphorés constituent l'une des plus grandes familles de substances chimiques utilisées pour lutter contre les ravageurs et améliorer les rendements agricoles à travers le monde. Cependant, en raison de leur toxicité élevée, de leur persistance dans l'environnement et de leurs effets indésirables, certains composés, tels que le parathion et le méthyl parathion, ont été classés comme extrêmement dangereux par des organismes internationaux, comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'EPA (Agence américaine de protection de l'environnement). Leur interdiction dans de nombreux pays souligne ces préoccupations croissantes (**Pailan et al., 2020**).

L'OP inhibe la synthèse d'une enzyme appelée cholinestérase (ChE). Les signes d'exposition comprennent des nausées, des migraines, des contractions musculaires, des frissons, une salivation abondante et des yeux larmoyants, des difficultés respiratoires dues à une paralysie du diaphragme, des convulsions et, à des doses élevées, la mort (**Kashyap et al., 2024**).

Exemples: Le parathion, le malathion, le dichlorvos, le diazinon et le glyphosate sont quelques-uns des OP les plus souvent utilisés dans le secteur agricole.

VII.3. Les Carbamates

Les carbamates sont des insecticides fabriqués à partir d'acide carbamique. Leur structure est comparable à celle des organophosphorés. Ils diffèrent cependant de leur origine. Les organophosphorés sont des dérivés de l'acide phosphorique, tandis que les carbamates sont des dérivés de l'acide carbamique. Les pesticides à base de carbamates fonctionnent de la même manière que les pesticides organophosphorés, dans la mesure où ils interfèrent avec la transmission des signaux nerveux, provoquant la mort du ravageur par empoisonnement. Ils sont également utilisés comme poisons gastriques et de contact. Cet insecticide peut être facilement décomposé dans l'environnement naturel tout en causant une pollution minimale (**Rasool et al., 2022**).

L'enzyme acétylcholinestérase (ChE) est temporairement désactivée par les carbamates, ce qui entraîne un empoisonnement par inhibition de la ChE. Les symptômes comprennent des vomissements, une diarrhée, un épuisement, des convulsions, des difficultés respiratoires, etc (**Kashyap et al., 2024**).

Exemples: Certains des pesticides à base de carbamate couramment utilisés sont le carbofuran, l'aminocarbe et le carbaryl.

VII.4. Les Pyréthroïdes

Les pyréthroïdes sont des substances organiques extraites des fleurs de pyrèthre⁵. Les acides pyéthroïques sont responsables des effets insecticides des pyréthrines. Les pyréthroïdes perturbent les canaux sodiques, provoquant une paralysie de l'organisme. Les pyréthroïdes synthétiques, qui sont fabriqués en imitant la structure des pyréthrines naturelles, font également partie de ce groupe de pesticides. Ils sont plus fiables et plus efficaces que les pyréthrines naturelles. Les insecticides contenant des pyréthroïdes synthétiques sont extrêmement toxiques pour les insectes et les poissons, mais beaucoup moins pour les mammifères et les oiseaux. La majorité des pesticides synthétiques ne sont pas persistants et se décomposent facilement lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ils sont considérés comme les pesticides les plus sûrs pour une utilisation alimentaire (**Rasool et al., 2022**).

Exemples: La perméthrine, la cyperméthrine, la deltaméthrine, la léthrine, la furéthrine, le fénévalérate et l'alphacyperaméthrine sont les pyréthroïdes synthétiques les plus largement utilisés.

VII.5. Néonicotinoïdes

Les néonicotinoïdes forment un groupe d'insecticides synthétiques particulièrement efficaces, dotés d'un large spectre d'activités insecticides. Ils sont largement utilisés à l'échelle mondiale, aussi bien en milieu rural qu'urbain. Cependant, l'utilisation extensive des néonicotinoïdes a conduit à leur accumulation et à leur bioamplification dans l'environnement en raison de leur longue demi-vie. Cela a entraîné l'apparition de polluants toxiques et dangereux,

Les néonicotinoïdes se lient aux récepteurs nicotiques de l'acétylcholine (nAChR) neuronaux. **Ce mécanisme** leur permet d'activer efficacement les nAChR des insectes tout en ayant un impact minimal sur les nAChR des vertébrés. Cela réduit le risque de toxicité et les rend plus sûrs pour les espèces non ciblées. Représentant des risques significatifs pour les humains et les animaux non ciblés. Toutefois, la présence de néonicotinoïdes dans l'environnement peut encore augmenter les risques de toxicité et d'exposition. Malgré leur faible affinité pour les nAChR des mammifères, des préoccupations subsistent en raison de l'abondance, de la diversité et de la présence généralisée de ces récepteurs, ainsi que de leurs diverses fonctions. Ces facteurs soulèvent des inquiétudes quant à l'impact potentiel de ces pesticides sur les espèces non ciblées (**Randhawa , 2024**).

Exemples: l'acétamipride, le dinotéfurane, la clothianidine, l'imidaclopride, le sulfoxaflor, le nitenpyram, le thiaméthoxame et le thiaclopride.

VIII. Suivi et gestion des pesticides

Une approche globale et rigoureuse est la nécessité du moment pour traiter les problèmes et les conséquences associés à la pollution par les pesticides dans les agroécosystèmes. Des techniques de surveillance efficaces, notamment des méthodes analytiques avancées, telles que la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) et la chromatographie liquide haute performance (HPLC), sont essentielles pour identifier et mesurer avec précision des traces de pesticides et de leurs résidus dans les composants environnementaux (sol, eau et produits agricoles). La gestion de la pollution par les pesticides peut être mise en œuvre efficacement en adoptant des pratiques de gestion intégrée des ravageurs (IPM). L'IPM est largement reconnue comme une approche durable de la lutte antiparasitaire car elle combine la lutte chimique, biologique et culturelle avec l'utilisation prudente des pesticides en dernier recours. Cette stratégie encourage l'utilisation de substituts écologiquement acceptables, notamment les biopesticides, les

phéromones et les agents de lutte biologique, tout en réduisant simultanément la dépendance aux pesticides chimiques.

Les techniques de phytoremédiation et de bioremédiation peuvent également jouer un rôle essentiel dans la réduction de la pollution par les pesticides. Ces techniques peuvent exploiter de manière efficace et efficiente le potentiel des plantes appropriées et des micro-organismes associés pour éliminer ou dégrader les pesticides des sols et des eaux contaminés.

D'autres améliorations dans les techniques de lutte contre les ravageurs dans l'agriculture peuvent être obtenues en développant et en utilisant des pesticides biodégradables et respectueux de l'environnement, ainsi qu'en recherchant des formulations sophistiquées ayant un impact environnemental moindre (**Kashyap et al., 2024**).

IX. Réglementation des pesticides en Algérie

Les pays européens ont progressivement instauré un contrôle des produits phytosanitaires en fonction de sa politique de développement et de la disponibilité des ressources. Afin d'être commercialisé, chaque produit phytosanitaire doit obtenir une autorisation. L'Algérie a réalisé une évolution en la protection phytosanitaire, grâce à la promulgation de la loi n°87-17 du 01.08.1987, qui dicte des mesures pour la fabrication, l'étiquetage, l'entreposage, la distribution, la commercialisation et l'utilisation des produits phytosanitaires (**Ayad-Mokhtari, 2012**).

L'homologation des produits phytosanitaires a été instituée en Algérie par les décrets exécutifs qui fixent les mesures applicables lors de l'importation et l'exportation des produits phytosanitaires à usage agricole. Parmi ces règles, on peut mentionner :

- La Loi n° 87-17 du 1er août 1987 relative à la protection phytosanitaire,
- Décret exécutif n° 95-405 du 2 décembre 1995 relatif au contrôle des produits phytosanitaires à usage agricole.
- Décret exécutif n° 10-69 du 15 Safar 1431 correspondant au 31 janvier 2010 fixant les mesures applicables lors de l'importation et l'exportation des produits phytosanitaires à usage agricole.

Avant leur commercialisation ou leur usage en Algérie, les pesticides doivent obligatoirement être homologués par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, à travers:

- Le Comité National d'Homologation des Produits Phytosanitaires, qui évalue la toxicité, l'efficacité, les impacts environnementaux et les résidus des produits.

Chapitre I: Généralités sur les pesticides

- Une analyse scientifique et réglementaire du produit, incluant des essais de laboratoire et sur le terrain.

CHAPITRE II :
Biodégradation des pesticides

Certains pesticides présentent une grande résistance à la dégradation, ce qui en fait des polluants persistants dans l'environnement. De plus, la majorité d'entre eux représente un risque pour la santé. En raison de la stabilité chimique de ces composés, il est nécessaire d'adopter de nouvelles stratégies pour les éliminer efficacement, telles que la biodégradation (Sviridov *et al.*, 2021). Comme l'ont justement souligné Matsumura *et al.*, l'une des approches les plus respectueuses de l'environnement consiste à utiliser des micro-organismes capables de dégrader ces composés contaminants présents dans les sols et les milieux aquatiques (Matsumura, 1982).

I. Dégradation microbienne des pesticides

La biodégradation aussi appelée bioremédiation, principalement assurée par l'action des microorganismes et de leurs enzymes, est le principal mécanisme de décomposition des pesticides dans la nature. Le taux de biodégradation varie considérablement en fonction des systèmes et des conditions environnementales, une biodégradation efficace est cruciale.

Le métabolisme microbien (biotique) des pesticides aboutit généralement à l'un des deux résultats suivants schématisés sur la **figure 08**:

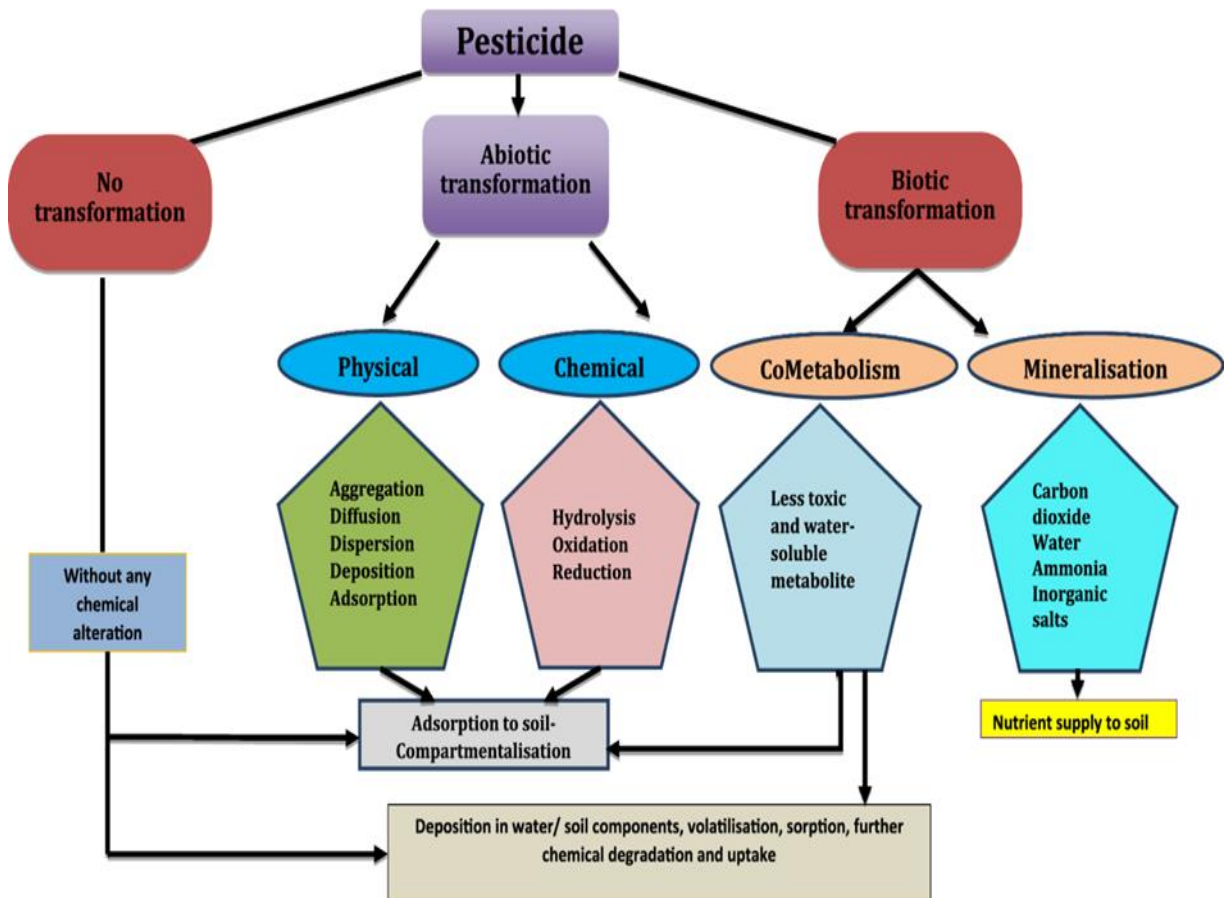


Figure 08: Processus abiotiques et biotiques influençant le devenir des pesticides (Bose *et al.*, 2021).

- Co-métabolisme : le pesticide est transformé en un métabolite moins toxique et plus hydrosoluble, sans fournir d'énergie directe aux micro-organismes.

- La Minéralisation : dégradation complète en substances inorganiques simples (CO₂, eau, ammoniac, sels), qui peuvent enrichir le sol en nutriments.

Les micro-organismes possèdent une grande capacité d'adaptation aux changements de leur environnement, notamment par mutation ou induction. Ils peuvent utiliser divers types de métabolismes pour transformer ces composés xénobiotiques, qu'ils peuvent ensuite exploiter comme source de carbone, d'azote, de phosphore ou d'énergie (**Guerrero Ramirez et al., 2023**).

Il convient de souligner que la biodégradation des pesticides est bien moins coûteuse que les méthodes traditionnelles, ce qui la rend économiquement avantageuse pour les entreprises souhaitant la mettre en œuvre. De plus, les sous-produits générés sont peu ou pas nocifs pour l'environnement (**Tang & Hou, 2018**).

II. Diversité microbienne

Actuellement, plusieurs types de micro-organismes sont à l'étude pour leur capacité à dégrader les pesticides, notamment les bactéries, les champignons et les algues ainsi que les enzymes et gènes impliqués (**Figure 09**).

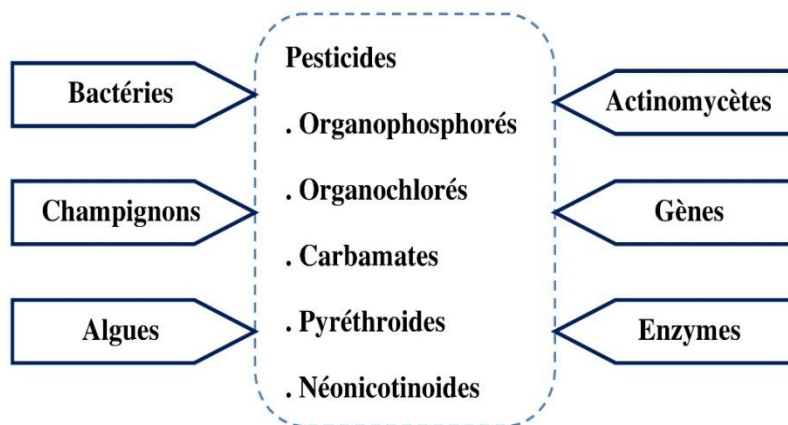


Figure 09 : Principaux micro-organismes et leurs enzymes et gènes impliqués dans la dégradation des pesticides

II.1. Voies Métaboliques

Les voies métaboliques jouent un rôle fondamental dans la biodégradation des pesticides. Les microorganismes utilisent différents mécanismes pour décomposer ces

substances en composés moins toxiques. Ces voies incluent notamment le métabolisme énergétique mitochondrial, le métabolisme des acides gras et des lipides, le métabolisme des acides aminés, ainsi que des réactions oxydatives, hydrolytiques et de méthylation.

Comprendre ces mécanismes est essentiel pour deux raisons : (**Guerrero Ramirez et al., 2023**)

1. Mettre au point des stratégies efficaces et sûres d'utilisation des pesticides et de biorémediation des sols et des eaux contaminés.

2. Mieux cerner les enzymes impliquées dans ces processus pourrait permettre, via le génie métabolique ou les techniques d'ADN recombinant, d'exploiter directement ces biomolécules sans nécessairement dépendre des microorganismes entiers.

Bien que les bactéries soient les plus étudiées, les champignons présentent une diversité métabolique supérieure, notamment grâce à leurs enzymes cytochrome P450. Cette diversité leur permet d'agir efficacement dans divers environnements, même en conditions difficiles, et de jouer un rôle central dans les cycles biogéochimiques. Leur capacité à dégrader des composés complexes et à contribuer à la décomposition de la matière organique en fait des candidats prometteurs pour la biodégradation des pesticides dans les sols et les eaux (**Ichinose, 2012**).

II.2. Remédiation enzymatique

Les enzymes sont au cœur de la biologie de nombreux pesticides. L'utilisation d'enzymes pour transformer ou dégrader les pesticides est une technique de traitement innovante permettant d'éliminer ces produits chimiques des environnements pollués. La dégradation d'un pesticide par voie enzymatique pourrait s'avérer plus efficace que les méthodes chimiques existantes. Les enzymes sont également impliquées dans la dégradation des composés pesticides, à la fois dans l'organisme cible, par des mécanismes de détoxification intrinsèques et une résistance métabolique évoluée, et dans l'environnement plus large, via la biodégradation par les micro-organismes du sol et de l'eau (**Scott et al., 2008**).

La dégradation à médiation enzymatique utilise des enzymes extraites d'organismes tels que les bactéries, champignons et algues ;trois systèmes enzymatiques sont principalement impliqués : les hydrolases, les estérases (également hydrolases), les oxydases à fonctions mixtes. Ces enzymes, en tant que biocatalyseurs, accélèrent les réactions chimiques et facilitent la conversion des substrats en produits souhaités en réduisant l'énergie d'activation (**Ramakrishnan et al., 2011**).

Chapitre II : Biodégradation des pesticides

Les champignons et les bactéries produisent des enzymes extracellulaires qui décomposent les polluants dans le sol. Par exemple, la laccase, la lignine peroxydase et la manganèse peroxydase libérées par les champignons détoxifient les composés phénoliques chlorés. En outre, les oxydoréductases et les hydrolases, provenant de différents microorganismes, jouent un rôle clé dans la dégradation par l'oxydoréduction et l'hydrolyse (Kai Chia et al., 2024).

Les enzymes impliquées dans le métabolisme des pesticides ainsi que leurs microorganismes producteurs figurent sur le tableau 02.

Tableau 02 : Enzymes utilisées dans la biorestauration (Bhandari & Sharma, 2021).

Enzymes	Microorganismes	Polluant
Hydrolase de carbamate	<i>Achromobacter</i> sp. <i>Pseudomonas</i> sp.	Carbofurane, carbaryl
Laccase	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	Effluents d'usine de blanchiment
LiP, MnP	<i>Coriolopsis polyzona</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Trametes versicolor</i>	PCB
Carboxylestérases	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PAI	Malathion et Parathion
Laccase	<i>Trametes versicolor</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i>	PCB
Atrazine déchlorinase, Triazine hydrolase	<i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>ErythropolisNocardioides</i> sp. C190	Herbicides à base de triazine
Phytase	<i>Aspergillus niger</i> NCIM 563	Organophosphoré

Les enzymes bactériennes sont particulièrement privilégiées par rapport à celles des plantes ou des animaux pour plusieurs raisons : leur production est moins coûteuse, les approvisionnements sont fiables et constants, et elles ne contiennent pas de substances potentiellement nocives comme les composés phénoliques ou les inhibiteurs d'enzymes. De plus, ces enzymes offrent une large spécificité de substrat et leur utilisation dans des systèmes de remédiation, comme les billes de substances toxiques, est aisée (Maqbool et al., 2016).

II.2.1. Processus enzymatique de biotransformation des pesticides

Les pesticides subissent une biotransformation enzymatique pour devenir moins toxiques. Ce processus comporte deux phases (**Kai Chia et al., 2024**) :

✚ **Phase I:** Réactions chimiques qui ajoutent des groupes polaires (hydroxyle, carboxyle, époxyde) au pesticide, augmentant sa solubilité et facilitant sa dégradation, impliquant une enzyme qui catalyse une réaction d'oxydation, souvent réalisée par le cytochrome P450.

✚ **Phase II:** Réactions de conjugaison où les sous-produits de la phase I se combinent avec des molécules endogènes (glutathion, acides aminés, phosphate, sulfate, sucres), formant des composés plus solubles et moins toxiques.

II.3. Bactéries, une solution prometteuse

Les bactéries présentent des systèmes moins complexes que les organismes eucaryotes tels que les champignons et les plantes. Leur régulation génétique, mieux comprise, est plus facile à manipuler pour des applications biotechnologiques et environnementales.

Divers genres de bactéries possèdent les capacités métaboliques nécessaires pour dégrader les pesticides. Dans ce processus, les molécules de pesticides peuvent être utilisées soit comme **source de nutriments**, soit comme **donneurs d'électrons**. Le taux de dégradation dépend de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques, tels que : la température, la disponibilité en eau et en nutriments, la présence d'autres micro-organismes, ainsi que les perturbations physiques du sol liées aux pratiques agricoles.

Au final, le processus de biodégradation bactérienne permet de **transformer une substance fortement toxique en un produit moins toxique, voire inoffensif** pour l'environnement (**Maqbool et al., 2016**).

Les **bactéries oxydantes**, comme les espèces de *Pseudomonas* et *Rhodococcus*, sont capables de dégrader une large gamme de pesticides organochlorés grâce à leurs enzymes oxydoréductases. Par exemple, *Pseudomonas putida* et *Pseudomonas fluorescens* sont capables de dégrader des pesticides comme le lindane, un organochloré, en les transformant en produits plus simples et moins toxiques (**Kohl et al., 2018**).

Une souche bactérienne, *Flavobacterium sp.*, reclassée par la suite en *Sphingobium fuliginis*, s'est révélée capable de dégrader et d'utiliser le diazinon et le parathion comme seule source de carbone. En outre, cette souche peut dégrader le chlorpyrifos par un mécanisme cométabolique. Par la suite, d'autres espèces bactériennes, notamment *Bacillus sp.*,

Pseudomonas sp., *Xanthomonas*, *Arthrobacter sp.* et *Pseudomonas diminuta*, ont été identifiées pour leurs capacités à dégrader ces composés OP (Maqbool *et al.*, 2016).

Une liste de bactéries capables de dégrader les pesticides est présentée dans le **Tableau 3**.

Tableau 03 : Exemples de bactéries dégradant les pesticides (Guerrero Ramirez *et al.*, 2023).

Pesticides	Espèces bactériennes	Exemple de taux de biodégradation
Pesticides extrêmement dangereux	<i>Enterobacter cloacae</i> <i>Micrococcus arborescens</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Brachybacterium sp.</i> <i>Salsuginibacillus kocurii</i> <i>Flavobacterium sp.</i> <i>Ochrobactrum sp.</i> <i>Agrobacterium sp.</i> <i>Fischerella sp.</i> <i>Serratia sp.</i> , <i>Bacillus sp.</i> <i>Bacillus cereus</i> <i>Pseudomonas sp.</i> <i>Burkholderia zhejiangensis</i> <i>Nodularia linckia</i> <i>Nostoc muscorum</i> <i>Oscillatoria animalis</i> <i>Phormidium foveolarum</i> <i>Burkholderia cenocepacia</i> <i>Pseudomonas putida</i> <i>Citrobacter freundii</i> <i>Stenotrophomonas sp.</i> <i>Flavobacterium sp.</i> <i>Proteus vulgaris</i> <i>Acinetobacter sp.</i> <i>Klebsiella sp.</i> , <i>Proteus sp.</i> <i>Microcystis novacekii</i> <i>Alcaligenes sp.</i> <i>Serratia marcescens</i>	Aldicarb (85%) Terbufos (42%) Methyl parathion (7–90%)
Pesticides très dangereux	<i>Photobacterium ganghwense</i> <i>Novosphingobium sp.</i> <i>Pseudomonas stutzeri</i> <i>Lysinibacillus sphaericus</i> <i>Brevibacterium aureum</i> <i>Cupriavidus sp.</i> , <i>Bacillus sp.</i> <i>Chryseobacterium sp.</i> <i>Burkholderia cepacia</i>	Cyfluthrin (80%) Carbofuran (97.5%) Tefluthrin

II.4. Champignons

En raison de leur croissance mycélienne, les champignons sont plus fréquemment utilisés pour la bioremédiation des sols que pour celle des milieux aquatiques. Ils possèdent en

effet la capacité de produire en grande quantité des enzymes extracellulaires essentielles à la dégradation des polluants (**Gouma *et al.*, 2014**). Toutefois, il est important de souligner que certaines conditions environnementales doivent être réunies pour assurer une dégradation efficace des composés xénobiotiques dans le sol, telles que le pH, la présence de minéraux et le taux d'humidité (**Maqbool *et al.*, 2016**).

Parmi les champignons les plus efficaces, on retrouve les Basidiomycètes, qui comptent parmi les principaux agents de bioremédiation des sols. Ils se distinguent par leur fort pouvoir de dégradation, principalement grâce à la production d'enzymes ligninolytiques extracellulaires. Ces enzymes permettent de transformer des composés toxiques complexes en molécules simples, utilisables comme sources d'énergie et de nutriments (**Ellouze & Sayadi, 2016**).

Les champignons biotransforment les pesticides en apportant des modifications structurelles mineures à leurs molécules, les rendant ainsi non toxiques. Cette biotransformation permet aux produits chimiques de devenir vulnérables à une dégradation supplémentaire par d'autres microorganismes dans le sol. De plus, les champignons et les bactéries sont considérés comme des microorganismes supérieurs dans ce processus, en raison de leur capacité à libérer des enzymes extracellulaires. Notamment, il a été suggéré que les champignons de la moisissure blanche favorisent l'activité des microbes biodégradables, surtout contre des composés que les bactéries ne décomposent pas facilement. Cette capacité résulte de la production massive d'enzymes extracellulaires qui agissent sur une grande variété de composés organiques, dont certaines sont impliquées dans la dégradation de la lignine, telles que les peroxydases de manganèse, les peroxydases de lignine, les laccases et les oxydases (**Dwivedi & Tomer, 2021**).

Les champignons de la moisissure blanche (**WRF** : White Rot Fungi) tels que *Phanerochaete chrysosporium* et *Trametes versicolor* sont des organismes remarquablement efficaces, largement utilisés pour la décomposition de divers polluants tenaces, tels que les polluants organiques persistants (POP), comme le lindane, l'atrazine, le métalaxyl, le DDT, la dieldrine, l'aldrine, le mirex, le chlordane et le diuron. Cette capacité à dégrader une large gamme de pesticides souligne l'importance des champignons dans les processus de dépollution (**Kai Chia *et al.*, 2024**).

Des recherches ont montré que les champignons tels que *Penicillium miczynskii*, *Aspergillus sydowii* et *Trichoderma sp.* présentent une bonne croissance en présence de pesticides, indiquant ainsi leur potentiel à être utilisés comme agents de bioremédiation. D'autres espèces, telles que *Fusarium oxysporum*, *Lentinula edodes*, *Lecanicillium*

saksenaet Penicillium brevicompactum présentent également un fort potentiel pour la dégradation de produits chimiques organiques, élargissant ainsi les possibilités d'application des champignons dans la bioremédiation (**Kai Chia et al., 2024**).

II.5. Capacités de biodégradation des Actinomycètes

Les actinomycètes possèdent une aptitude reconnue à métaboliser les composés xénobiotiques dans les sols et les eaux. Leur remarquable adaptabilité leur permet de prospérer dans des conditions environnementales variées, y compris en milieux acides ou alcalins – un atout décisif puisque la biodisponibilité des polluants dépend souvent de ces paramètres chimiques.

Parmi ces microorganismes, le genre *Streptomyces* (bactéries saprophytes ubiquitaires dans les sols et les eaux) est l'un des plus étudiés pour son potentiel en bioremédiation (**Kaur et al., 2021**).

Streptomyces peut utiliser divers pesticides comme source de carbone, en les minéralisant complètement pour les rendre non toxiques. Il peut utiliser plusieurs outils métaboliques pour réaliser des processus de bioremédiation, dont l'un est la production d'enzymes telles que les hydrolases, les glucosyltransférases, les xylanases, les laccases et les protéinases (**Briceño et al., 2018**).

L'utilisation de mélanges bactériens (plusieurs genres et espèces) améliore l'efficacité de la dépollution. Les actinomycètes, par exemple, dégradent des familles variées de pesticides (organochlorés, organophosphorés, pyréthrinoïdes, urées) (**Ibrahim et al., 2020**).

Selon Alvarez, les genres les plus performants incluent : *Frankia*, *Janibacter*, *Kocuria*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Pseudonocardia* et *Streptomyces* (**Dwivedi & Tomer, 2021**).

II.6. Potentiel des microalgues dans la dépollution des eaux contaminées

Contrairement aux champignons et aux bactéries, les microalgues présentent l'avantage de pouvoir être cultivées exclusivement en milieu aqueux. Elles ont la capacité à se développer dans des eaux de mauvaise qualité, là où d'autres microorganismes subiraient un stress inhibant leur croissance. Grâce à leur remarquable versatilité métabolique, les algues constituent d'excellents agents de bioremédiation pour les eaux contaminées d'origine industrielle, domestique ou agricole (**García-Galán et al., 2020**).

Elles peuvent en effet :

✚ **Dégrader les pesticides**, les métaux lourds et la matière organique ;

✚ **Transformer l'azote polluant** en une forme assimilable, réduisant ainsi les excès dans l'environnement ;

✚ **Séquestrer le carbone** tout en produisant de l'oxygène (O₂).

Lorsque leur métabolisme est entravé, les algues peuvent établir des **interactions symbiotiques** avec des microorganismes hétérotrophes, optimisant ainsi la biodégradation des pesticides (Ansari et al., 2024).

Tableau 04 : Algues ayant une fonction de biorestauration (Guerrero Ramirez et al., 2023).

Algues	Pesticide ciblé
<i>Chlorococcum humicola</i> <i>Gracilaria verrucosa</i>	2,4-D
<i>Chlorella vulgaris</i> <i>Scenedesmus bijugatus</i>	Methyl Parathion
<i>Chlorococcum</i> sp.	DDT
<i>Selenastrum capricornutum</i> <i>Synechococcus elongatus</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Chlorella</i> sp.	Atrazine (60–80%)
<i>Oscillatoria limnetica</i> <i>Skeletonema costatum</i> <i>Emiliana huxleyi</i> <i>Isochrysis galbana</i>	Glyphosate
<i>Chlorella</i> sp. <i>Scenedesmus</i> sp.	Chlorpyrifos
<i>Chlorella vulgaris</i>	Carbofuran (100%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Dimethoate (100%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Metolachlor (100%)

II.7. Génétique pour la dégradation des pesticides

Pour élucider les mécanismes génétiques sous-tendant la biodégradation des pesticides, des études se sont concentrées sur le rôle des gènes cataboliques et l'utilisation des biotechnologies, notamment le génie génétique. À ce jour, seuls les gènes impliqués dans la dégradation des pesticides chez un nombre limité de microorganismes ont été caractérisés. Bien que la majorité de ces gènes soient chromosomiques, certains sont portés par des plasmides ou des transposons, soulignant l'importance des éléments génétiques mobiles dans l'évolution des voies métaboliques (Ortiz-Hernández et al., 2013).

Les progrès récents en métagénomique et en séquençage génomique complet ont révolutionné la recherche de gènes de dégradation, permettant d'explorer le potentiel des

microorganismes cultivables et non cultivables. Ces approches ont révélé que des éléments mobiles (plasmides, transposons) codent souvent des enzymes clés dans la détoxification de pesticides.

L'isolement de souches dégradantes, couplé à la caractérisation des gènes et des enzymes impliqués, ainsi qu'aux techniques modernes d'analyse des acides nucléiques environnementaux, offre des perspectives inédites pour comprendre les processus moléculaires menant à une biodégradation accélérée des polluants (**Hussainet al., 2009**).

Plusieurs enzymes microbiennes capables d'hydrolyser les pesticides ont été identifiées. Parmi elles, l'organophosphorus hydrolase (OPH), codée par le gène *opd*, joue un rôle clé. Ce gène a été détecté chez des souches bactériennes capables d'utiliser les pesticides organophosphorés comme source de carbone, isolées dans diverses régions géographiques. Bien que les plasmides porteurs de *opd* présentent une grande diversité génétique, la région codante de ce gène reste hautement conservée (**Yan et al., 2007**).

Dans les différents isolats de micro-organismes capables de dégrader les pesticides, plusieurs gènes ont été décrits, dans le **tableau 05** sont présentés les plus étudiés.

Tableau 05: Gènes ayant la capacité de dégrader les pesticides (**Singh & Walker, 2006**).

Gene	Organism		
Bacteria		Fungi	
<i>Opd</i>	<i>Pseudomonas diminuta</i>	A-opd	<i>Aspargillus niger</i>
<i>opaA</i>	<i>Alteromonas spp.</i>	P-opd	<i>Penicillium lilacinum</i>
<i>opdA</i>	<i>Agrobacterium radiobacter</i>		
<i>adpB</i>	<i>Nocardia sp.</i>		
<i>pepA</i>	<i>Escherichia coli</i>		
<i>hocA</i>	<i>Pseudomonas monteilli</i>		
<i>pehA</i>	<i>Burkholderia caryophilli</i>		
<i>Phn</i>	<i>Bacillus cereus</i>		
ophB	<i>Burkholderia sp. JBA3.</i>		
ophC2	<i>Stenotrophomonas sp. SMSP-1.</i>		
OpdB	<i>Lactobacillus brevis.</i>		
Imh	<i>Arthrobacter sp. scl-2.</i>		
Mpd	<i>Ochrobactrum sp. Yw28,</i> <i>Rhizobium radiobacter</i>		
Oph	<i>Arthrobacter sp</i>		
Mph	<i>Arthrobacter sp. L1 (2006).</i>		
MpdB	<i>Burkholderia cepacia</i>		
opdE	<i>Enterobacter sp.</i>		

Ces gènes peuvent être intrinsèques (présents naturellement) ou acquis via des plasmides, transposons ou autres mécanismes de transfert horizontal de gènes : (Ortiz-Hernández *et al.*, 2013).

II.7.1. Gènes codant les hydrolases

✚ *opd* (**organophosphorus degrading**): dégrade les organophosphorés (exemple: parathion, malathion).

✚ *mpd* (**methyl parathion degrading**): code une phosphoesterase spécifique du methyl parathion.

✚ *pnbA*: hydrolase bactérienne intervenant dans la dégradation d'esters d'acide p-nitrobenzoïque (composés liés à certains pesticides).

II.7.2. Gènes codant les mono- et dioxygénases

✚ *linA*, *linB*, *linC*: impliqués dans la dégradation du **lindane** (un organochloré).

✚ *p450* (famille des cytochromes P450): enzymes oxydantes très présentes chez les champignons, capables de dégrader divers pesticides via hydroxylation ou déhalogénéation.

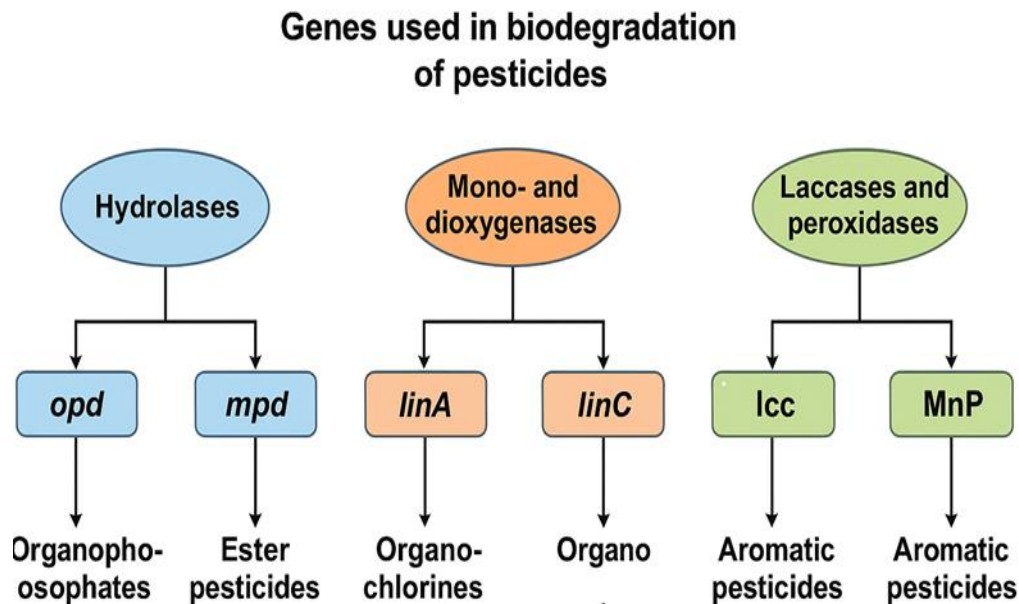


Figure 10 : Gènes et enzymes utilisés en biodégradation des pesticides (Ortiz-Hernández *et al.*, 2013).

II.7.3. Gènes codant les laccases et peroxydases (chez les champignons)

✚ *lcc* (**laccase genes**) : oxydent les pesticides aromatiques complexes.

✚ *MnP*, *LiP*: peroxydases impliquées dans la dégradation des lignines et de nombreux xénobiotiques.

II.7.4. Gènes de transport et résistance

✚ *merA*, *merB*: pour les métaux lourds mais parfois co-localisés avec des gènes de dégradation de pesticides.

✚ *abc transporters*: contribuent à l'efflux des sous-produits toxiques issus de la biodégradation.

CHAPITRE III :

Synthèse des études antérieures

L'objectif de cette revue de littérature est d'examiner les micro-organismes ayant démontré une capacité efficace à dégrader les pesticides identifiés par l'Organisation mondiale de la santé comme prioritaires en raison de leurs effets potentiels sur la santé humaine. L'analyse portera également sur les voies métaboliques mobilisées par ces micro-organismes dans le processus de biodégradation, ainsi que sur les bases génétiques impliquées dans ces mécanismes. Enfin, cette revue proposera un état des lieux des avancées actuelles et des perspectives d'application des micro-organismes en tant qu'outils de bioremédiation ciblant spécifiquement les pesticides utilisés en agriculture.

I. Stratégie de recherche documentaire

Dans le cadre de cette revue de littérature, une stratégie de recherche systématique et méthodologiquement rigoureuse a été élaborée afin d'identifier, d'analyser et de synthétiser les publications scientifiques pertinentes portant sur « la biodégradation des pesticides par les micro-organismes ». Cette démarche visait à explorer les avancées récentes dans le domaine de la bioremédiation microbienne appliquée aux composés phytosanitaires, en mettant particulièrement l'accent sur les enzymes impliquées et les voies métaboliques associées.

Pour ce faire, une sélection ciblée de mots-clés et d'expressions a été réalisée, incluant notamment: « *biodégradation des pesticides* », « *bioremédiation microbienne* », « *enzymes de dégradation des pesticides* », « *pesticides et micro-organismes* », et « *bioremédiation environnementale* ». L'usage d'opérateurs booléens (tels que *OR*, *AND*, et *NOT*) a permis d'affiner et d'élargir la recherche afin de couvrir un spectre thématique aussi exhaustif que possible. Cette combinaison a favorisé l'identification d'un corpus varié et représentatif des publications disponibles dans ce domaine d'étude.

II. Sources de données

La recherche documentaire a été menée à l'aide de plusieurs bases de données scientifiques internationales, reconnues pour leur couverture multidisciplinaire et leur fiabilité, notamment:

✚ **SNDL (Système National de Documentation en Ligne)** pour les ressources académiques algériennes,

✚ **Springer Nature,**

✚ **PubMed,**

✚ **Science Direct,**

✚ **Google Scholar,**

✚ **ResearchGate,**

Ces bases ont été sélectionnées pour leur complémentarité et leur capacité à fournir des articles scientifiques à fort impact, issus de revues à comité de lecture.

III. Période couverte et critères de sélection

La période de publication ciblée s'étend de **2018 à 2025**, afin de garantir une représentativité des tendances actuelles tout en incluant les évolutions les plus récentes du domaine. Cette fenêtre temporelle permet également d'examiner les dynamiques scientifiques sur le moyen terme, incluant l'émergence de nouvelles approches biotechnologiques et génétiques en matière de bioremédiation.

Les publications prises en compte dans cette analyse ont été rédigées en anglais, langue prédominante de la recherche scientifique internationale. Lorsque nécessaire, les textes ont été traduits à l'aide de Google Translate pour en faciliter l'exploitation et l'intégration dans la synthèse, tout en veillant à préserver l'exactitude des informations techniques.

Enfin, une sélection rigoureuse des documents a été opérée sur la base de critères d'inclusion et d'exclusion précis, portant notamment sur :

- La pertinence du contenu par rapport au thème principal,
- La qualité méthodologique des études,
- La disponibilité des données expérimentales,
- Et l'impact scientifique des sources.

Cette méthodologie de recherche documentaire permet ainsi de garantir la fiabilité, la qualité et la pertinence des données mobilisées pour l'analyse bibliométrique et la discussion scientifique menée dans ce travail.

IV. Sélection des publications

Au total, **167** articles scientifiques et ouvrages spécialisés ont été initialement recensés à partir des bases de données consultées. Un processus de tri rigoureux a ensuite été appliqué pour évaluer la pertinence de chaque document au regard des objectifs de la présente étude.

130 publications ont été exclues pour plusieurs raisons :

✚ Inadéquation du contenu avec la problématique ciblée (exemple: absence de lien direct avec la biodégradation des pesticides),

✚ Focalisation exclusive sur la biodégradation en milieu aquatique, alors que l'étude porte prioritairement sur les sols,

✚ Ou encore ancienneté des données ne répondant pas aux critères d'actualité scientifique fixés (antérieures à 2018).

À l'issue de ce processus de sélection, 37 articles et ouvrages publiés entre 2018 et 2024 ont été retenus pour l'analyse approfondie.

V. Résultats et discussion

V.1. Analyse temporelle des publications scientifiques

Le graphique de la **figure 11** illustre l'évolution du nombre de publications sélectionnées par année sur la période de 2018 à 2024. Cette représentation met en évidence plusieurs points clés :

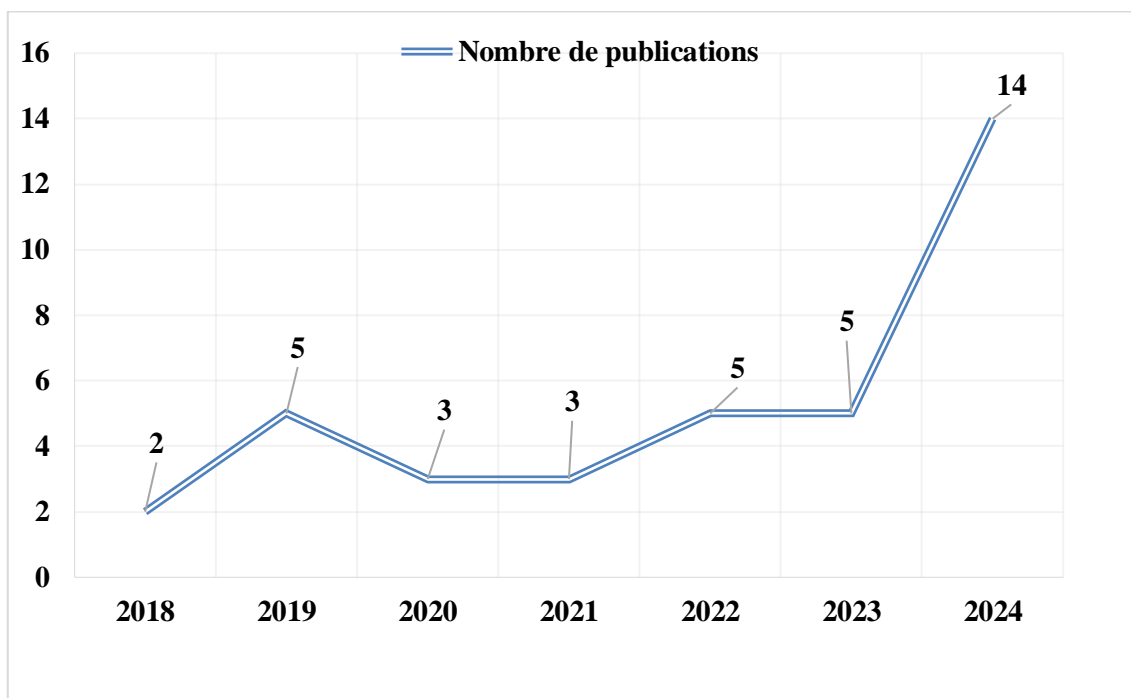


Figure 11: Nombre de publications sélectionnées par année.

Période 2018 - 2021: une activité modérée mais constante

Entre 2018 et 2021, la production scientifique reste relativement stable, avec une légère hausse en 2019 (5 publications), suivie d'un léger repli en 2020 et 2021 (3 publications). Cette tendance pourrait s'expliquer par une prise de conscience progressive des enjeux liés aux pesticides, mais encore limitée par des contraintes de financement ou de priorisation des politiques scientifiques.

Période 2022 - 2023: un regain d'intérêt

Les années 2022 et 2023 marquent une remontée, avoisinant 10 publications. Cela peut refléter l'effet de programmes de recherche internationaux promouvant des solutions durables, ainsi que la montée en puissance des technologies de séquençage et de bioremédiation microbienne.

Année 2024: un bond significatif

En 2024, la courbe enregistre une augmentation spectaculaire, atteignant 14 publications. Ce pic suggère une forte mobilisation de la recherche scientifique, possiblement stimulée par :

- La multiplication des conférences internationales sur la pollution agricole.
- L'introduction de politiques environnementales plus strictes incitant à innover dans les méthodes de dépollution.
- La reconnaissance accrue du rôle des micro-organismes et enzymes dans la remédiation des pesticides.

V.2. Diversité géographique des publications sélectionnées

Le résultat de la répartition des 37 publications retenus pour cette étude par pays est illustré sur une carte (**Figure 12**). Cette carte met en évidence 17 pays différents, chaque pays est représenté par une couleur distincte afin de souligner sa contribution à la recherche dans ce domaine.

Les travaux retenus, issus de 17 pays différents, offrent un aperçu représentatif et multidisciplinaire des avancées récentes dans le domaine de la biodégradation microbienne des pesticides. La diversité géographique des publications retenues témoigne également de l'intérêt croissant à l'échelle internationale pour cette thématique.

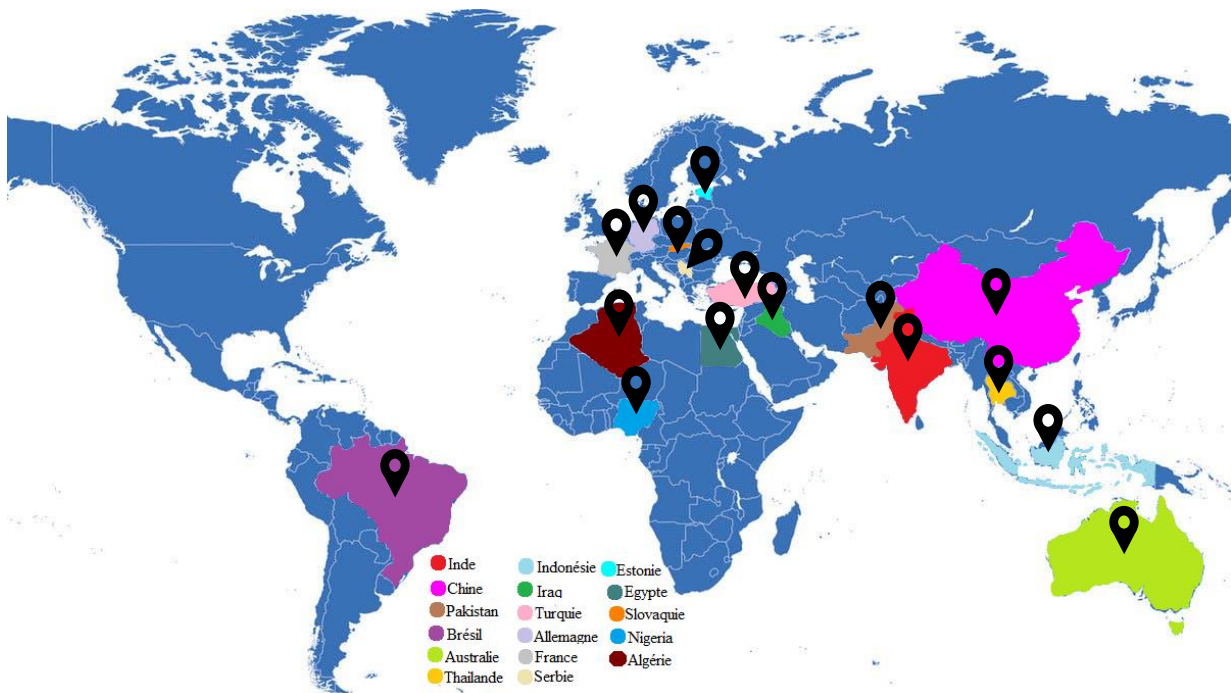


Figure 12: Répartition géographique des publications scientifiques sélectionnées.

La carte montre une distribution étendue des publications scientifiques liées à la biodégradation des pesticides, reflétant à la fois des priorités environnementales, des capacités de recherche, et des enjeux agricoles propres à chaque région.

On constate une forte représentation de l'Asie, avec des pays comme l'Inde, la Chine, le Pakistan et la Thaïlande, traduisant une dynamique de recherche soutenue dans des zones à forte activité agricole. L'Afrique est représentée notamment par l'Algérie, l'Égypte et le Nigeria, tandis que l'Europe contribue par le biais de l'Allemagne, la France, la Slovaquie, l'Estonie et la Serbie. Des contributions notables proviennent également de l'Amérique latine (Brésil) et de l'Océanie (Australie).

La répartition inégale du nombre de publications par pays est représentée sur la figure 13 et nous a permis de classer ces pays en trois groupes:

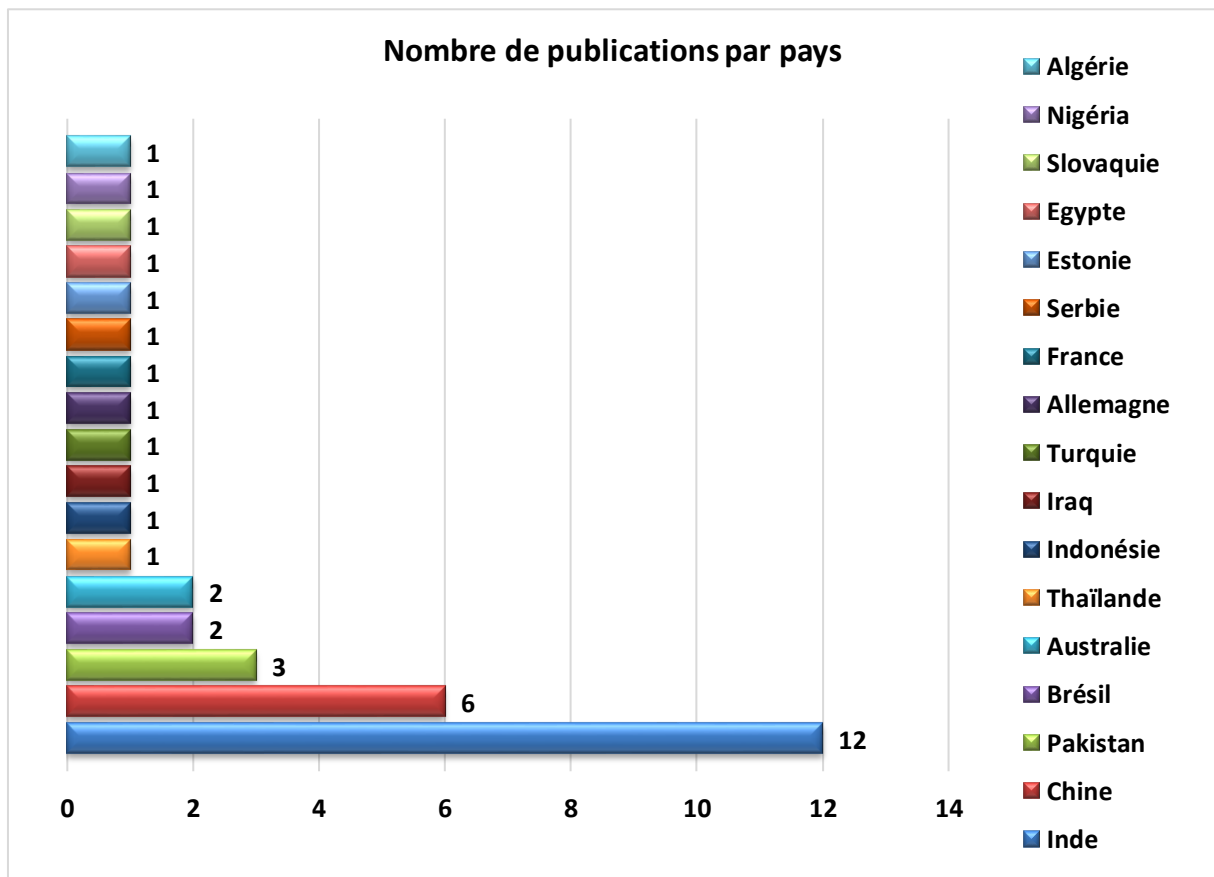


Figure 13: Répartition des publications sélectionnées par pays.

1. Pays à forte contribution scientifique

Inde, Chine, Pakistan:

Ces pays dominent la production scientifique pour plusieurs raisons :

- Utilisation intensive de pesticides en agriculture, menaçant la santé humaine et les écosystèmes.

- Soutien gouvernemental croissant pour les solutions écologiques comme la bioremédiation.
- Instituts de recherche actifs dans la microbiologie, l'agriculture et les biotechnologies.
- Présence de problèmes aigus de pollution des sols et de l'eau liés à l'agriculture industrielle (**Sharma *et al.*, 2019**).

2. Pays à contribution modérée mais significative

Brésil, Australie, Thaïlande:

Ce sont des pays fortement agricoles, confrontés à la gestion durable des sols. Le Brésil, par exemple, est l'un des plus grands consommateurs mondiaux de pesticides. Une part croissante de la recherche scientifique dans ses pays porte sur l'utilisation de microorganismes indigènes (**Soares & de Souza Porto, 2009**).

La contribution modérée de ses pays est le résultat des défis environnementaux croissants dus à la pollution agricole, la montée en puissance de la recherche appliquée pour résoudre les problèmes locaux et le soutien d'organisations internationales pour le développement de solutions écologiques (**Llewellyn *et al.*, 2016**).

3. Intérêt croissant dans des pays émergents ou peu représentés

Allemagne, France, Turquie, Slovaquie, Serbie, Algérie, Indonésie, Estonie Nigeria, Égypte, Irak :

L'émergence de publications dans ces pays reflète un intérêt croissant pour les pratiques durables et l'application de solutions biologiques dans la gestion des terres agricoles (**Abate *et al.*, 2000 ; Kristoffersen *et al.*, 2008**).

V.3. Les classes des pesticides les plus étudiés

La Figure 14 présente la répartition des différentes classes de pesticides étudiées dans les publications sélectionnées. Les données révèlent une dominance marquée des organophosphorés (62,1%), reflétant leur large utilisation ainsi que leur niveau élevé de toxicité et les risques importants qu'ils représentent pour la santé et l'environnement. Les pesticides les plus étudiés en deuxième et troisième position sont respectivement les pyréthroïdes (27,0 %) et organochlorés (18,9 %) probablement à cause de leur persistance modérée dans l'environnement. Les classes les moins étudiées sont les carbamates (10,8 %), et les néonicotinoïdes (2,7 %)

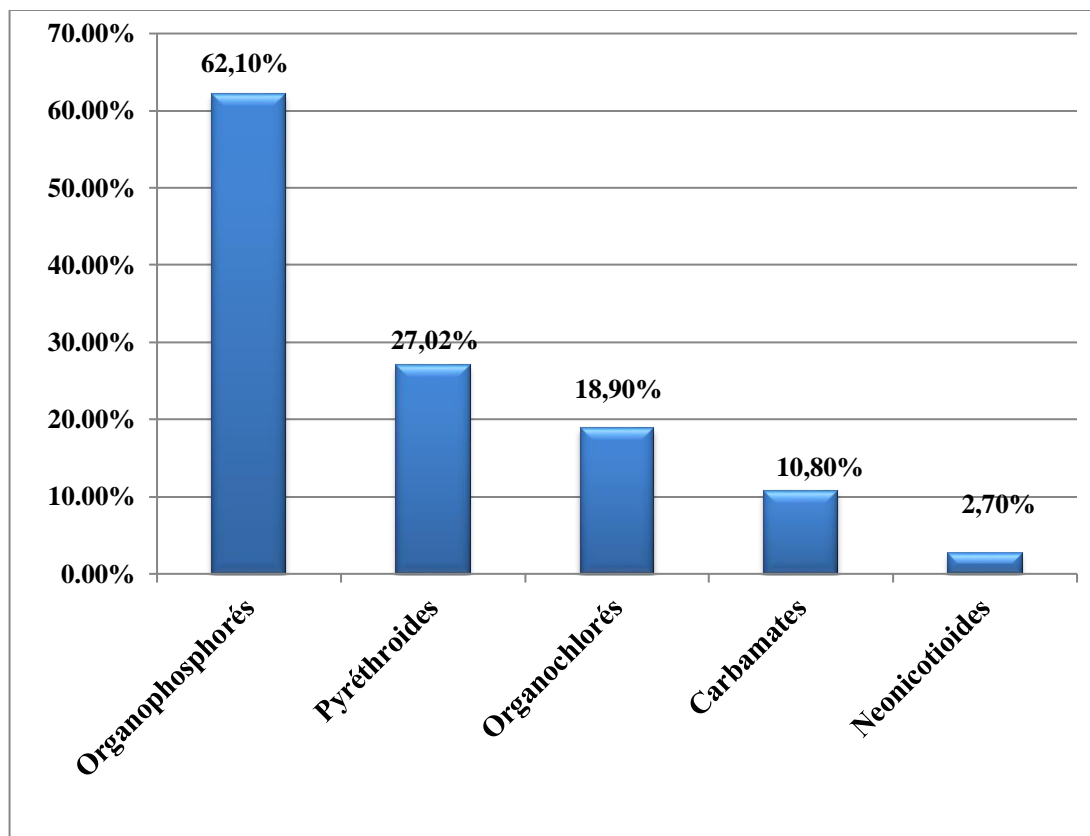


Figure 14 : Analyse du pourcentage des différentes classes des pesticides étudiés.

V.4. Diversité géographique des Microorganismes impliqués dans la biodégradation des pesticides

La diversité géographique dans la recherche sur la biodégradation des pesticides reflète une coopération scientifique mondiale croissante, combinant la microbiologie, la génétique, la biochimie enzymatique et l'écologie microbienne. La compréhension des microorganismes, enzymes et gènes associés à cette activité constitue une base essentielle pour développer des biotechnologies durables, ciblées et respectueuses de l'environnement.

L'analyse comparative des données bibliographiques entre 2018 et 2024 met en lumière une diversité remarquable des approches et des ressources biologiques mobilisées par différents pays pour lutter contre la pollution aux pesticides. Cette diversité reflète non seulement les conditions environnementales propres à chaque région, mais également les priorités scientifiques, les cultures agricoles dominantes, et les capacités technologiques locales (**Tableau 06**).

Tableau 06 : Les microorganismes les plus cités dans les publications sélectionnées.

	Microorganismes	Auteurs
Bactéries	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas plecoglossicida</i> , <i>Pseudomonas alcaligenes</i> , <i>Pseudomonas</i> spp, <i>Pseudomonas citronellolis</i> , <i>Pseudomonadaceae</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus amyloliquenfaciens</i> , <i>Bacillus</i> spp, <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Sphingobactériales</i> et <i>Bacilliales</i> , <i>Proteobacteria</i> et les <i>Firmicutes</i> , <i>Bacillaceae</i> , <i>Oxalobacteraceae</i> , <i>Caulobacteraceae</i> et les <i>nitroréductases</i> , <i>phylum Proteobacteria</i> , <i>Les bactéroïdes Pandore</i> , <i>Dyella</i> , <i>Thiomonas</i> , <i>Psychrobacter</i> , <i>Afipia</i> , <i>rhizobactérie B.amyloliquefaciens</i> , <i>Protée myxofaciens</i> , <i>sténotrophomonas maltophilie</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Azotobacter</i> spp, <i>Azospirillum</i> spp, <i>Microbacterium oxydans</i> sp, <i>Ochrobactrum</i> sp, <i>Serratia sarumanii</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Serratia marcescens</i> , <i>Microbactérie</i> sp, <i>Salinicoccus roseus</i> , <i>Achromobacter marplatensis</i> , <i>Arthrobacter</i> sp, <i>Brevibacterium frigoritolerans</i>	(Shahida et al., 2021 ; Anum et al., 2019 ; Sylvia et al., 2024 ; Marijana Kragulj et al., 2024 ; Muneer Ahmad et al., 2022 ; MENG et al., 2019 ; Samina et al., 2020 ; Jeevanandam & Jabez William ,2024 ; Srinivasulu et al., 2024 ; Harshitha et al., 2024 ; Beadaa & Ahmed Mohammed ,2020; Vishakha & Shivaji ,2018; Asep & Sri, 2019 ; Qing et al., 2023 ; Shahida et al., 2021 ; Anum et al., 2019 ; Sylvia et al., 2024 ; Marijana Kragulj et al., 2024 ; Muneer Ahmad et al., 2022 : MENG et al., 2019 ; Samina et al., 2020 ; Jeevanandam & Jabez William , 2024 ; Srinivasulu et al., 2024 ; Harshitha et al., 2024 ; Beadaa & Ahmed Mohammed ., 2020; Vishakha & Shivaji ,2018; Asep & Sri, 2019 ; Qing et al., 2023 ; Saurabh et al., 2024 ; Gülperi et al., 2024 ; Yan et al., 2022 ; Qin et al., 2020 ; Aisha et al., 2022 ; Peng et al., 2019 ; Bhramar et al., 2024 ; Hamid et al., 2024 ; Slimani, 2022)
Champignon	<i>Aspergillus</i> et <i>Pénicillium</i> , <i>M. robertsii</i> , <i>M. brunneum</i> , <i>M. globosum</i> , <i>M. anisopliae</i> , <i>aspergillus ustus</i> CBMAI, <i>Talaromyces brunneus</i> CBMAI, et <i>Aspergillus</i> sp, <i>Aspergillus fumigatus</i> PD-18, <i>uredinicola GRDBF21</i> , <i>Bipolaris maydis</i>	(Jameson et al., 2024 ; Kannan et al., 2024 ; Fabio R et al., 2024 ; Pierre et al., 2023 ; Priyadarshini et al., 2024)
Actinobactéries	<i>Thermobifida cellulosilytica</i> TB100 (<i>T. cellulosilytica</i>), <i>Thermobifida</i> , <i>Micromonospora</i> , <i>Actinomycetes</i> et <i>Streptomyces</i> , <i>halotolerans</i> DSM 44931 (<i>T. halotolerans</i>) et <i>Streptomyces coelicolor</i> A3 (<i>S. coelicolor</i>), <i>Genres d'Actinobactéries</i> , y compris <i>Arthrobacter</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Microbactérie</i> , etc.	(Zeba et al., 2021 ; Shivananda & Surajit ,2023 ; Ankita et al., 2022)

Chapitre III: Synthèse des études antérieures

On remarque une prépondérance des bactéries. Les bactéries sont des acteurs majeurs et les micro-organismes les plus étudiés dans la biodégradation des pesticides.

Les bactéries sont les agents les plus largement étudiés, en raison de leur croissance rapide, leur adaptabilité métabolique élevée, et leur capacité à coloniser une variété de niches écologiques. Leur adaptabilité et leur capacité à acquérir des gènes de dégradation via des plasmides les rendent très efficaces. Ces bactéries possèdent souvent des enzymes spécifiques (hydrolases, monooxygénases, dioxygénases) qui leur permettent de casser les liaisons chimiques des pesticides. (**Tableau 07**).

Tableau 07 : Répartition des microorganismes, enzymes et gènes impliqués dans la biodégradation des pesticides par pays.

Pays	Bactéries	Champignons	Actinobactéries	Enzymes étudiées	Gènes étudiés
Inde	✓		✓	Hydrolases, Oxydases	opd, opdA, estP
Chine	✓	✓	✓	Laccases, peroxydases	pnpA, linA, linB
Pakistan	✓	✓		Estérases	estD, opd
Brésil		✓	✓	Lignine peroxydases	catA, catB
Australie				Monooxygénases	mnp, phaC
Thaïlande		✓		Phosphotriestérases	opd, mpd
Indonésie	✓			Laccases	estP, opd
Iraq	✓			Hydrolases	
Turquie	✓			Peroxydases	opd, estB
Allemagne	✓	✓		Laccases, estérases	linD, linE
France	✓			Lignine peroxydases	pnpB, estC
Serbie	✓			Monooxygénases	
Estonie			✓	Estérases	estA, estD
Égypte	✓			Phosphotriestérases	opdA, opdD
Slovaquie		✓		Laccases	estB, catA
Nigéria	✓	✓	✓	Peroxydases	
Algérie	✓			Laccases, hydrolases	estP, catB

Des pays comme l'Inde, la Chine, le Pakistan, le Brésil et l'Algérie ont isolé des souches capables de dégrader efficacement des herbicides et insecticides persistants. Des

genres comme *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Burkholderia* sont fréquemment cités pour leur potentiel de biodégradation.

On a aussi observé une contribution significative des champignons. Les champignons présentent une métabolisation enzymatique plus diversifiée que les bactéries, grâce à des familles enzymatiques telles que les laccases, peroxydases et monooxygénases. Ces enzymes permettent une attaque de structures chimiques complexes, comme les cycles aromatiques présents dans de nombreux pesticides. Des pays comme le Nigéria, le Brésil et l'Allemagne ont exploré le rôle de champignons tels que *Aspergillus*, *Fusarium* et *Botrytis cinerea*. (Tableau 07).

Les Actinobactéries sont des agents sous-explorés mais prometteurs. Bien que moins fréquemment mentionnées, les actinobactéries (ex. : *Streptomyces*) se distinguent par leur capacité à produire une grande variété d'enzymes extracellulaires. Des recherches menées en Inde, en Estonie et en Nigéria ont révélé leur rôle dans la dégradation de composés résistants, soulignant un potentiel biotechnologique encore sous-exploité.

L'enzyme occupe un rôle central et reste le véritable moteur de la dégradation, qu'elle soit produite in situ ou isolée. Les enzymes les plus citées sont:

Hydrolases : clivent les liaisons ester ou amide.

Laccases : oxydent les composés aromatiques.

Peroxydases : dégradent les structures phénoliques.

Phosphotriestérases : ciblent les pesticides organophosphorés.

Les enzymes sont de plus en plus étudiées isolément, en dehors de leurs microorganismes producteurs, ce qui ouvre la voie à des applications en enzymologie environnementale et à la bioremédiation dirigée.

Les recherches récentes se sont concentrées sur l'identification et la caractérisation des gènes codant les enzymes de biodégradation par approche moléculaire. Les gènes tels que *opd*, *estP*, *linA*, *linB*, *catA*, *catB* ont été détectés dans divers environnements contaminés, offrant des cibles potentielles pour:

L'ingénierie de souches recombinantes plus efficaces.

Le développement de biocapteurs génétiques pour surveiller la présence de pesticides.

L'amélioration des stratégies de bioremédiation assistée par ADN recombinant.

Hétérogénéité géographique et contexte local.

L'implication de pays comme l'Algérie, le Nigéria ou l'Égypte montre un intérêt croissant dans les régions du Sud pour les solutions biologiques face aux enjeux de pollution agricole. Ces pays, souvent exposés à des pratiques intensives ou inappropriées de traitement

phytosanitaire, développent des solutions locales adaptées aux souches indigènes, souvent plus résilientes.

VI. Situation en Algérie

En Algérie, la contamination des sols et des eaux par les pesticides constitue une problématique environnementale croissante. Face à cette situation, la biodégradation, processus naturel assuré par les microorganismes, apparaît comme une solution écologique prometteuse. Cependant, plusieurs obstacles freinent l'étude de la biodégradation des pesticides, notamment le manque d'infrastructures de recherche spécialisées, l'insuffisance de financements, la rareté des bases de données locales sur les microorganismes indigènes, ainsi que le faible nombre d'études approfondies sur les mécanismes microbiens de dégradation.

Actuellement, l'Algérie est classée parmi les pays qui utilisent d'énormes quantités de pesticides. On compte environ 400 produits phytosanitaires homologués en Algérie dont une quarantaine de variétés sont largement utilisées par les agriculteurs (**Bouziati, 2007**).

Les analyses effectuées sur des échantillons d'eau prélevés dans la région de Staouli (Alger) et d'Annaba ont montré que dans plus de 30% des échantillons, la concentration de certaines molécules organochlorées et organophosphorées dépasse les valeurs préconisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). L'usage national des produits phytosanitaires en agronomie, fait craindre une pollution massive des sols, des eaux superficielles, des nappes phréatiques et de tous les milieux physiques dans toutes les régions du pays (**Bouziati, 2007**).

Des chercheurs ont isolé diverses espèces fongiques à partir de sols de la région d'Annaba contaminés par des pesticides. Les espèces les plus fréquemment identifiées étaient *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. terreus*, *Absidia*, ainsi que *Rhizopus microsporus var. corymbifer*. Parmi les souches isolées, 53 ont montré une capacité significative à dégrader l'herbicide metribuzine en milieu liquide (**Bordjiba et al., 2001**).

Il a également été démontré que la présence de cet herbicide stimulait la croissance des genres *Absidia* et *Fusarium*, qui ont réussi à éliminer 50 % du composé en seulement 5 jours. Par ailleurs, *Botrytis cinerea* s'est révélée particulièrement efficace pour éliminer presque totalement les herbicides linuron et métoburone, tandis que 31 autres espèces isolées ont aussi montré une capacité de dégradation du métoburone (**Bordjiba et al., 2001**).

Une autre étude a été faite pour isoler et identifier des microorganismes autochtones intervenants dans la bioremédiation des sols contaminés par les pesticides agricoles. Les essais d'isolement ont été réalisés à partir de terres à vocation agricoles, traitées périodiquement par différentes familles de produits phytosanitaires, situées à l'est Algérien au

niveau de la wilaya d'El Tarf sous la direction de l'Institut Technique des Cultures Maraichères (ITCMI) (Slimani, 2022).

Les souches ont fait l'objet de test de croissance en présence de quatre substances actives (abamectine, chlorpyrifos méthyl, deltaméthrine et thiophanate méthyl) à diverses concentrations, afin de déterminer leur phase de croissance ainsi que leur aptitude de se développer en présence de ces xénobiotiques comme unique source de carbone, et enfin confirmer éventuellement leur capacité à les biodégrader en milieu minéral. La caractérisation des bactéries a été réalisée selon les méthodes microbiologiques standardisées (identification morphologique et biochimique culture dépendante) puis une caractérisation moléculaire via l'identification des protéines par **MALDI-TOF-MS** ainsi que le séquençage de l'**ADNr16S** d'après Sanger.

L'identification des souches réalisée au premier temps par les **API système** (Api 20 E, Api 20 NE et Api Staph. bioMérieux, Meylan, France), a permis d'obtenir les profils biochimiques :

- Api 20 E (utilisée pour identification des *Bacillus*): *Bacillus thuringiensis*, *B.lentus*, *B.cereus*...
- Api 20 NE (Non-Fermentant): *Pseudomonas putida*, *P. fluorescens*, *Achromobacter denitrificans* ...
- Api Staph (*Staphylococcus* sp.): *S. auricularis*, *S. warneri*, *Kocuria rosea* ...

La spectrométrie de masse **MALDI TOF-MS**, a confirmé l'identification de quelques souches en donnant des résultats similaires et parfois différents à ceux obtenus avec les galeries **API**, le genre *Arthrobacter* au lieu de *Staphylococcus* et *Pseudomonas* à la place d'*Achromobacter*. Les résultats d'identification des bactéries ont présenté de bons scores allant de 1.89 à 2.489

L'identification moléculaire des souches bactériennes sélectionnées après amplification et séquençage de leurs **ADNr16S** a donné les espèces suivantes : *Pseudomonas* sp. OX1, *Pseudomonas mediterranea* isolate strain PSB47, *Pseudomonas migulae* strain OKB3, *Pseudomonas* sp. clone 6A4, *Achromobacter marplatensis* strain EY-T10, *Arthrobacter* sp. dv7, *Bacillus weihenstephanensis* strain 261ZG8, *Bacillus* sp. H1-80, *Bacillus* sp. strain GL5, *Brevibacterium frigoritolerans* strain WJB99, *Bacillus* sp. strain GL5, *Bacillus* sp. strain JDMASP42 (Slimani, 2022).

L'histoire de l'évolution a été déduite en utilisant la méthode *Neighbors-Joining* (Saitou *et al.*, 1987) pour l'**Analyses phylogénétiques**.

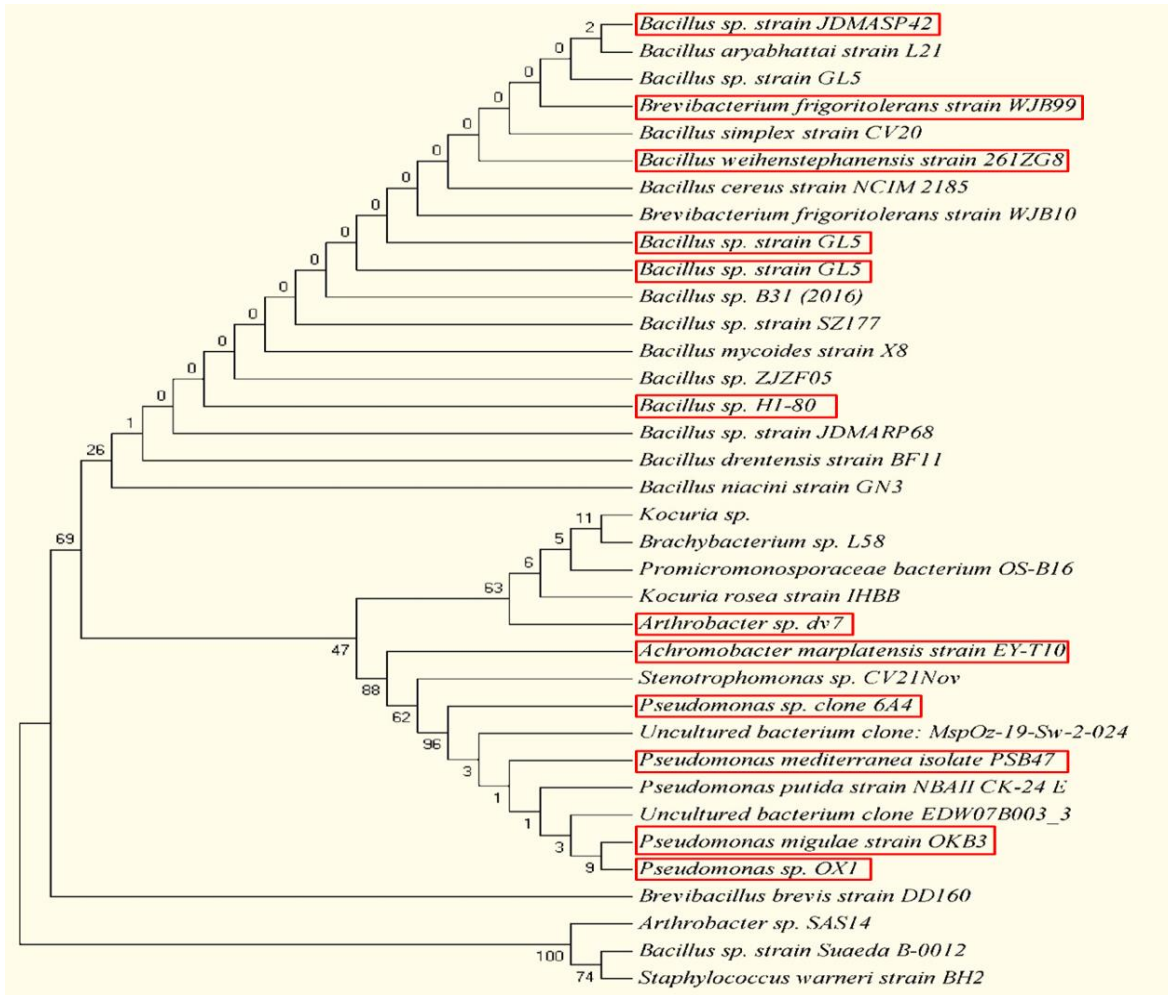


Figure 15: Relations évolutives entre les espèces intéressantes et l'ensemble des taxons identifiés (Slimani, 2022).

Conclusion et perspectives

Conclusion et Perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de compréhension et d'évaluation des capacités biodégradatives des différents groupes microbiens présents dans le sol. Il vise à explorer, à partir des données disponibles et des travaux de recherche existants, la diversité des microorganismes impliqués dans la dégradation des pesticides et à comparer leur efficacité relative.

L'étude s'intéressera notamment aux types de pesticides les plus couramment utilisés, à leur persistance dans le sol, aux enzymes spécifiques produites par les microorganismes pour les transformer, ainsi qu'aux applications potentielles dans le domaine de la bioremédiation. En identifiant les groupes microbiens les plus performants et les conditions favorables à leur action, cette recherche pourra contribuer à la mise en place de stratégies biologiques efficaces pour la dépollution des sols contaminés par les pesticides, tout en ouvrant la voie vers une agriculture plus durable et respectueuse des équilibres écologiques.

Les résultats de notre recherche bibliographique montrent une diversité géographique des publications scientifiques sur notre thème de recherche, ceci illustre que la problématique des pesticides est mondiale, mais que les réponses scientifiques sont localisées, influencées par les réalités agroécologiques, économiques et institutionnelles de chaque pays. Le développement de solutions microbiennes pour la dégradation des pesticides attire désormais une attention croissante dans les pays du Sud comme du Nord, avec une nette dynamique dans les pays émergents.

Cette diversité géographique témoigne de l'intérêt mondial et multidisciplinaire pour les stratégies de bioremédiation des pesticides, en réponse aux enjeux environnementaux et sanitaires communs.

La progression croissante de ses publications témoigne d'un intérêt croissant pour les approches biologiques de dépollution, et notamment pour la biodégradation des pesticides via les micro-organismes. L'année 2024 semble marquer un tournant, à la fois en termes de volume de publications et d'avancées scientifiques dans le domaine.

La majorité des articles et ouvrages retenus proviennent de publications récentes, illustrant une dynamique scientifique en pleine expansion dans le domaine de la biodégradation des pesticides. Cette actualisation constante des travaux témoigne non seulement de l'intérêt croissant de la communauté scientifique pour les enjeux environnementaux et sanitaires liés aux pesticides, mais aussi des progrès significatifs réalisés

dans les domaines de la microbiologie, de la biotechnologie et de l'ingénierie environnementale. Elle reflète également la montée en puissance des stratégies durables telles que la bioremédiation, soutenues par des approches multi-disciplinaires alliant génétique, enzymologie, écologie microbienne et innovation technologique. Cette tendance met en lumière une volonté mondiale de mieux comprendre et exploiter les potentialités des microorganismes dans la dépollution des sols et des eaux contaminés par les pesticides.

La pollution des sols par les pesticides est un défi environnemental global. La biodégradation, en tant que processus biologique naturel, offre une alternative écologique prometteuse aux méthodes de dépollution physico-chimiques. Toutefois, l'efficacité de ce processus dépend étroitement des microorganismes impliqués et de leur arsenal enzymatique. Les bactéries jouent un rôle prédominant dans la biodégradation des pesticides grâce à leur diversité génétique et métabolique, ainsi qu'à leur capacité à produire des enzymes spécifiques adaptées à la dégradation des contaminants. Les enzymes, catalyseurs naturels de ce processus, facilitent la dégradation des pesticides en scindant les liaisons chimiques complexes, rendant les molécules plus simples et moins toxiques.

Les perspectives d'utilisation des enzymes dans la gestion des sols contaminés, notamment par des applications de bioremédiation et des biotechnologies, ouvrent la voie à des solutions plus écologiques et durables pour lutter contre la pollution des sols. Les recherches futures devront continuer à explorer les mécanismes de dégradation et à développer des stratégies permettant d'optimiser ces processus à grande échelle.

Enfin, la mise en place de collaborations interdisciplinaires entre chercheurs, industriels et décideurs politiques sera essentielle pour accélérer la commercialisation et l'adoption de ces solutions enzymatiques. Des investissements dans la recherche fondamentale et appliquée, ainsi que dans la validation sur le terrain, permettront de surmonter les obstacles techniques et économiques actuels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abate, T., van Huis, A., & Ampofo, J. K. O. (2000).** Pest management strategies in traditional agriculture: an African perspective. *Annual review of entomology*, 45(1), 631-659.
- Abdelkader, A. A., Khalil, M. S., & Mohamed, M. S. M. (2022).** Simultaneous biodegradation of λ -cyhalothrin pesticide and *Vicia faba* growth promotion under greenhouse conditions. *AMB Express*, 12(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01383-0>
- Alatassi, G., Baysal, Ö., Silme, R. S., Örnek, G. P., Örnek, H., & Can, A. (2024).** Pesticide degradation capacity of a novel strain belonging to *Serratia sarumanii* (GBS19) with its genomic profile. <https://doi.org/10.1101/2024.11.28.625876>
- Ambreen, S., Yasmin, A., & Aziz, S. (2020).** Isolation and characterization of organophosphorus phosphatases from *Bacillus thuringiensis* MB497 capable of degrading Chlorpyrifos, Triazophos and Dimethoate. *Heliyon*, 6(7), e04221. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04221>
- Ansari, I., El-Kady, M. M., El Din Mahmoud, A., Arora, C., Verma, A., Rajarathinam, R., Singh, P., Verma, D. K., & Mittal, J. (2024).** Persistent pesticides : Accumulation, health risk assessment, management and remediation: An overview. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100274>
- Behera, S., & Das, S. (2023).** Potential and prospects of Actinobacteria in the bioremediation of environmental pollutants : Cellular mechanisms and genetic regulations. *Microbiological Research*, 273, 127399. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127399>
- Bhandari, G., & Sharma, M. (2021).** Microbial Enzymes in the Bioremediation of Pollutants : Emerging Potential and Challenges. In *Mycoremediation and Environmental Sustainability* (p. 75-94). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54422-5_3.
- Bish, M., Oseland, E., & Bradley, K. (2021).** Off-target pesticide movement: a review of our current understanding of drift due to inversions and secondary movement. *Weed Technology*, 35(3), 345-356.
- Bordjiba, O., Steiman, R., Kadri, M., Semadi, A., & Guiraud, P. (2001).** Removal of herbicides from liquid media by fungi isolated from a contaminated soil. *Journal of environmental quality*, 30(2), 418-426.
- Bose, S., Kumar, P. S., Vo, D. V. N., Rajamohan, N., & Saravanan, R. (2021).** Microbial degradation of recalcitrant pesticides: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3209-3228.
- Cardozo, M., De Almeida, J. S. F. D., Cavalcante, S. F. D. A., Salgado, J. R. S., Gonçalves, A. S., França, T. C. C., Kuca, K., & Bizzo, H. R. (2019).** Biodegradation of Organophosphorus Compounds Predicted by Enzymatic Process Using Molecular Modelling and Observed in Soil Samples Through Analytical Techniques and Microbiological Analysis : A Comparison. *Molecules*, 25(1), 58. <https://doi.org/10.3390/molecules25010058>

- Chatterjee, A., & Biswas, R. (2024).** *Bioremédiation des pesticides*. 9.
- Chen, Q., Shi, H., Liang, Y., Qin, L., Zeng, H., & Song, X. (2023).** Degradation Characteristics and Remediation Ability of Contaminated Soils by Using β -HCH Degrading Bacteria. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 2767. <https://doi.org/10.3390/ijerph20042767>
- Chia, X. K., Hadibarata, T., Jusoh, M. N. H., Sutiknowati, L. I., Tan, I. S., & Foo, H. C. Y. (2024).** Role of extremophiles in biodegradation of emerging pollutants. *Topics in Catalysis*, 1-18.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017).** Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016.
- Da Silva Júnior, A. H., De Oliveira, C. R. S., Leal, T. W., Mapossa, A. B., Fiates, J., Ulson De Souza, A. A., Ulson De Souza, S. M. D. A. G., & Da Silva, A. (2024).** Organochlorine pesticides remediation techniques: Technological perspective and opportunities. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 5, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100098>
- Dey, P., Malik, A., Singh, D. K., Haange, S.-B., Von Bergen, M., & Jehmlich, N. (2024).** Unveiling fungal strategies: Mycoremediation in multi-metal pesticide environment using proteomics. *Scientific Reports*, 14(1), 23171. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74517-y>
- Dixit, A., Kumar, N., Upadhyay, A., Bajpai, V. K., Cho, Y., Yang, Y., Huh, Y. S., & Shukla, S. (2024).** Application of sensing methods in agricultural sector for the detection of pesticide residues: An overview. *Plant Science Today*, 11(sp4). <https://doi.org/10.14719/pst.5725>
- Dutta, B., Panja, A. S., Nigam, V. K., Nanjappan, S. K., Ravichandiran, V., & Bandopadhyay, R. (2024).** Computational and biochemical characterization of the immobilized esterase of *Salinicoccus roseus* for pesticide degradation. *Scientific Reports*, 14(1), 30661. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73165-6>
- Dwivedi, S. A. & Tomer, A. (2021).** Application of mycobiococontrol agent in biodegradation and pest management. Dans R. Prasad et al. (éd.), *Mycoremediation and Environmental Sustainability* (pp. 247-260). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3030544225_11.
- Ellouze, M., & Sayadi, S. (2016).** White-rot fungi and their enzymes as a biotechnological tool for xenobiotic bioremediation. *Management of hazardous wastes*, 103-120.
- El-Naggar, M. E., Abdelsalam, N. R., Fouda, M. M., Mackled, M. I., Al-Jaddadi, M. A., Ali, H. M., ... & Kandil, E. E. (2020).** Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. *Nanomaterials*, 10(4), 739.
- Fareed, A., Riaz, S., Nawaz, I., Iqbal, M., Ahmed, R., Hussain, J., Hussain, A., Rashid, A., & Naqvi, T. A. (2019).** Immobilized cells of a novel bacterium increased the degradation of N-methylated carbamates under low temperature conditions. *Heliyon*, 5(11), e02740. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02740>

Gangola, S., Chaube, S., Bayram, A., Joshi, S., Bhandari, G., & Malik, S. (s. d.). *Système de prise de décision.*

Ganvir, V. N. (s. d.). *Isolement et caractérisation des imidacloprides dégradants.*

García-Galán, M. J., Monllor-Alcaraz, L. S., Postigo, C., Uggetti, E., de Alda, M. L., Díez-Montero, R., & García, J. (2020). Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas. *Environmental Pollution*, 265, 114579.

Gouma, S., Fragoeiro, S., Bastos, A. C., & Magan, N. (2014). Bacterial and fungal bioremediation strategies. In *Microbial biodegradation and bioremediation* (pp. 301-323). Elsevier.

Guerrero Ramírez, J. R., Ibarra Muñoz, L. A., Balagurusamy, N., Frías Ramírez, J. E., Alfaro Hernández, L., & Carrillo Campos, J. (2023). Microbiology and Biochemistry of Pesticides Biodegradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15969. <https://doi.org/10.3390/ijms242115969>

Gupta, P. K., & Gupta, P. K. (2019). Toxic effects of pesticides and agrochemicals. *Concepts and Applications in Veterinary Toxicology: An Interactive Guide*, 59-82.

Harshitha, C. P., Kumar, H. K. N., Mohana, N. C., & Satish, S. (2024). Biodegradation of monocrotophos by *Stenotrophomonas maltophilia* and its potential in vitro plant growth promoting activities. *The Microbe*, 4, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100101>

Huang, Y., & Chen, S. (2022). Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential application for the bioremediation of contaminated waters. Dans Naveen Kumar Arora (Eds.), *Enzymes for pollutant degradation* (pp. 119-138). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/9789811645747_6

Hussain, S., Siddique, T., Arshad, M., & Saleem, M. (2009). Bioremediation and Phytoremediation of Pesticides: Recent Advances. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(10), 843–907. <https://doi.org/10.1080/10643380801910090>

Ibrahim, S., Gupta, R. K., War, A. R., Hussain, B., Kumar, A., Sofi, T., Noureldeen, A., & Darwish, H. (2021). Degradation of chlorpyrifos and polyethylene by endosymbiotic bacteria from citrus mealybug. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(6), 3214-3224. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.058>

Ichinose, H. (2012). Molecular and functional diversity of fungal cytochrome P450s. *Biological and pharmaceutical bulletin*, 35(6), 833-837.

Indonesian Agricultural Environment Research Institute (IAERI), Pati 59182, Indonesia, Indratin, I., Kurnia, A., Indonesian Agricultural Environment Research Institute (IAERI), Pati 59182, Indonesia, Wahyuni, S., & Indonesian Agricultural Environment Research Institute (IAERI), Pati 59182, Indonesia. (2019). Degradation of Cypermethrin by Indigenous Bacteria from Contaminated Soil. *Makara Journal of Science*, 210-216. <https://doi.org/10.7454/mss.v23i4.7998>

- Isakovski, M. K., Jevrosimov, I., Tamindžija, D., Apostolović, T., Knicker, H., De La Rosa, J. M., Rončević, S., & Maletić, S. (2024).** Enhanced retention of hydrophobic pesticides in subsurface soils using organic amendments. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135738. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135738>
- Jeffries, T. C., Rayu, S., Nielsen, U. N., Lai, K., Ijaz, A., Nazaries, L., & Singh, B. K. (2018).** Metagenomic Functional Potential Predicts Degradation Rates of a Model Organophosphorus Xenobiotic in Pesticide Contaminated Soils. *Frontiers in Microbiology*, 9, 147. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00147>
- Joseph, J. T., Shobana, C. S., Sekhar, D., Suresh, S., Poothenchery, S., Selvam, K. P., Aloyuni, S. A., Al Othaim, A., Alshehri, B., Abdel-Hadi, A., Ismail, A., & Manikandan, P. (2024).** Exploration of *Cladosporium uredinicola* GRDBF21 and *Bipolaris maydis* GRDBF23 in biodegradation of the organophosphorus pesticide chlorpyrifos. *Journal of King Saud University - Science*, 36(7), 103252. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103252>
- Kalyabina, V. P., Esimbekova, E. N., Kopylova, K. V., & Kratasyuk, V. A. (2021).** Pesticides: Formulants, distribution pathways and effects on human health – a review. *Toxicology Reports*, 8, 1179-1192. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.06.004>
- Kashyap, U., Garg, S., & Arora, P. (2024).** Pesticide pollution in India: Environmental and health risks, and policy challenges. *Toxicology Reports*, 13, 101801. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101801>
- Kaur, R., Singh, D., Kumari, A., Sharma, G., Rajput, S., Arora, S., & Kaur, R. (2021).** Pesticide residues degradation strategies in soil and water: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-24.
- Khan, N., Muge, E., Mulaa, F. J., Wamalwa, B., Von Bergen, M., Jehmlich, N., & Wick, L. Y. (2023).** Mycelial nutrient transfer promotes bacterial co-metabolic organochlorine pesticide degradation in nutrient-deprived environments. *The ISME Journal*, 17(4), 570-578. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01371-7>
- Kristoffersen, P., Rask, A. M., Grundy, A. C., Franzen, I., Kempenaar, C., Raisio, J., ... & Zarina, L. (2008).** A review of pesticide policies and regulations for urban amenity areas in seven European countries. *Weed Research*, 48(3), 201-214.
- L'Héritier, F., Marques, M., Fauteux, M., & Gaudreau, L. (2014).** Defining molecular sensors to assess long-term effects of pesticides on carcinogenesis. *International journal of molecular sciences*, 15(9), 17148-17161.
- Lee-Ann Ataikiru, T., & Ajuzieogu, C. A. (2023).** Enhanced bioremediation of pesticides contaminated soil using organic (compost) and inorganic (NPK) fertilizers. *Heliyon*, 9(12), e23133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23133>
- Li, Q., Li, J., Kang, K.-L., & Wu, Y.-J. (2020).** A safety type of genetically engineered bacterium that degrades chemical pesticides. *AMB Express*, 10(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00967-y>
- Li, Q., Zhang, L., Wan, J., Fan, T., Deng, S., Zhou, Y., & He, Y. (2023).** Analysis of the Degradation of OCPs Contaminated Soil by the BC/nZVI Combined with Indigenous

Microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4314. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054314>

Liu, X., Mao, J., & Zhao, L. (2024). Analysis of the toxic mechanisms of different pesticides. *MATEC Web of Conferences*, 404, 04004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440404004>

Liu, Y., Wang, X., Nong, S., Bai, Z., Han, N., Wu, Q., Huang, Z., & Ding, J. (2022). Display of a novel carboxylesterase CarCby on Escherichia coli cell surface for carbaryl pesticide bioremediation. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 97. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01821-5>

Llewellyn, R., Ronning, D., Clarke, M., Mayfield, A., Walker, S., & Ouzman, J. (2016). Impact of weeds in Australian grain production. Grains Research and Development Corporation, Canberra, ACT, Australia.

Lu, P., Liu, H., & Liu, A. (2019). Biodegradation of dicofol by Microbacterium sp. D-2 isolated from pesticide-contaminated agricultural soil. *Applied Biological Chemistry*, 62(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0480-y>

Lushchak, V. I., Matviishyn, T. M., Husak, V. V., Storey, J. M., & Storey, K. B. (2018). Pesticide toxicity: a mechanistic approach. *EXCLI journal*, 17, 1101.

Mäder, P., Stache, F., Engelbart, L., Huhn, C., Hochmanová, Z., Hofman, J., Poll, C., & Kandeler, E. (2024). Effects of MCPA and difenoconazole on glyphosate degradation and soil microorganisms. *Environmental Pollution*, 362, 124926. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124926>

Mahdii, B. A., & Turke, A. M. (2020). Determine the ideal conditions for the biodegradation process and lowest inhibit concentration of Clorspan and Ground up pesticides by different types of Bacteria. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*, 23(02), 267-278. <https://doi.org/10.36295/ASRO.2020.23232>

Malla, M. A., Dubey, A., Kumar, A., & Yadav, S. (2022). Metagenomic analysis displays the potential predictive biodegradation pathways of the persistent pesticides in agricultural soil with a long record of pesticide usage. *Microbiological Research*, 261, 127081. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127081>

Maqbool, Z., Hussain, S., Imran, M., Mahmood, F., Shahzad, T., Ahmed, Z., Azeem, F., & Muzammil, S. (2016). Perspectives of using fungi as bioresource for bioremediation of pesticides in the environment: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 16904-16925. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7003-8>

Matsumura, F. (1982). *Degradation of Pesticides in the Environment by Microorganisms and Sunlight*. In: Matsumura F., Murti C.R.K., editors. *Biodegradation of Pesticides*. Springer ; Boston, MA, USA. pp. 67–87.

Matuš, P., Littera, P., Farkas, B., & Urík, M. (2023). Review on Performance of Aspergillus and Penicillium Species in Biodegradation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides. *Microorganisms*, 11(6), 1485. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061485>

- Meng, D., Zhai, L., Tian, Q., Guan, Z., Cai, Y., & Liao, X. (2019).** Complete genome sequence of *Bacillus amyloliquefaciens* YP6, a plant growth rhizobacterium efficiently degrading a wide range of organophosphorus pesticides. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(11), 2668-2672. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62658-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62658-4)
- Nair, P. A., & Sujatha, C. H. (2011).** Organic pollutants as endocrine disruptors: organometallics, PAHs, Organochlorine, organophosphate and carbamate insecticides, phthalates, dioxins, phytoestrogens, alkyl phenols and bisphenol A. In *Environmental chemistry for a sustainable world: Volume 1: Nanotechnology and health risk* (pp. 259-309). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Oirdi, M. E., Yaseen, M., Farwa, U., Raza, M. A., Farhan, M., Sandhu, Z. A., ... & Nahvi, I. (2024).** Crops and people: the dangers and potential benefits of pesticides. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2334096.
- Ortiz-Hernández, M. L., Sánchez-Salinas, E., Dantán-González, E., & Castrejón-Godínez, M. L. (2013).** Pesticide biodegradation: mechanisms, genetics and strategies to enhance the process. In *Biodegradation-life of Science*. IntechOpen.
- Pailan, S., Sengupta, K., & Saha, P. (2020).** Microbial metabolism of organophosphates: key for developing smart bioremediation process of next generation. Dans P. K. Arora (dir.), *Microbial Technology for Health and Environment, Microorganisms for Sustainability* 22 (p. 361-399). Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/9789811526794_14
- Pedroso, M. M., Hine, D., Hahn, S., Chmielewicz, W. M., Diegel, J., Gahan, L., & Schenk, G. (2021).** Pesticide degradation by immobilised metalloenzymes provides an attractive avenue for bioremediation. *EFB Bioeconomy Journal*, 1, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2021.100015>
- Peshin, R., & Zhang, W. (2014).** *Integrated pest management and pesticide use* (pp. 1-46). Springer Netherlands.
- Peshin, R., Bandral, R. S., Zhang, W., Wilson, L., & Dhawan, A. K. (2009).** Integrated pest management: a global overview of history, programs and adoption. *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process: Volume 1*, 1-49.
- Pujiati, Fatimah, Ramadhan, R., & Ni'matuzahroh. (2024).** Mycoremediation of pesticide-contaminated soil: A review. *BIO Web of Conferences*, 148, 02020. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414802020>
- Rajamani, M., & Negi, A. (2020).** Biopesticides for pest management. In *Sustainable bioeconomy: Pathways to sustainable development goals* (pp. 239-266). Singapore: Springer Singapore.
- Ramakrishnan, B., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., Naidu, R. (2011).** Mixtures of Environmental Pollutants: Effects on Microorganisms and Their Activities in Soils. In: Whitacre, D. (eds) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* Volume 211. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol 211. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8011-3_3
- Randhawa J, S. (2024).** Microbial assisted remediation approach for neonicotinoids from polluted environment. Springer Nature, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s42269-024-01227-w>

- Rani, A., Mathur, A., & Gupta, S. (2022).** isolation and screening of actinobacterial isolates from chemical pesticides usage fields of the uttarakhand region. *Journal of Advanced Scientific Research*, 13(06), 69-73. <https://doi.org/10.55218/JASR.202213611>
- Rasool, S., Rasool, T., & Gani, K. M. (2022).** A review of interactions of pesticides within various interfaces of intrinsic and organic residue amended soil environment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 11, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100301>
- Rehman, H., Rehman, Z., Das, T. K., Rehman, M., Khan, B. A., Nandi, S., Ahmad, K., Mohanty, S. K., Ur Rehman, W., Naeem, R., Bajaj, M., & Tuka, M. B. (2024).** Toxicity evaluation and degradation of cypermethrin-contaminated soil using biochar and *Bacillus cereus* amendments. *Scientific Reports*, 14(1), 29892. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81588-4>
- Reichenberger, S., Bach, M., Skitschak, A., & Frede, H. G. (2007).** Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground-and surface water and their effectiveness; a review. *Science of the total environment*, 384(1-3), 1-35.
- Rigolin, F., Leite, C., Birolli, W., Porto, A., & Seleghim, M. (2024).** Biodegradation of the Pyrethroid Pesticide Gamma-Cyhalothrin by Fungi from a Brazilian Cave. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240026>
- Rodrigues, J. A., Narasimhamurthy, R. K., Joshi, M. B., Dsouza, H. S., & Mumbrekar, K. D. (2022).** Pesticides exposure-induced changes in brain metabolome: implications in the pathogenesis of neurodegenerative disorders. *Neurotoxicity Research*, 40(5), 1539-1552.
- Salam, Md. T. B., Mahmood, A., Asghar, W., Ito, K., & Kataoka, R. (2024).** Phytomicrobiomes : A Potential Approach for Sustainable Pesticide Biodegradation. *Applied Sciences*, 14(7), 2740. <https://doi.org/10.3390/app14072740>
- Sarker, A., Kim, D., & Jeong, W.-T. (2024).** Environmental Fate and Sustainable Management of Pesticides in Soils : A Critical Review Focusing on Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(23), 10741. <https://doi.org/10.3390/su162310741>
- Saw, G., Nagdev, P., Jeer, M., & Murali-Baskaran, R. K. (2023).** Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 194, 105524.
- Sawangproh, W., Paejaroen, P., Afifah, L., & Phaenark, C. (2025).** Microbial pesticides : A bibliometric analysis of global research trends (1973–2024). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 35(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s41938-025-00840-9>
- Scott, C., Pandey, G., Hartley, C.J. et al. (2008).** The enzymatic basis for pesticide bioremediation. *Indian J Microbiol.* 48, 65–79 <https://doi.org/10.1007/s12088-008-0007-4>
- Singh, A., & Chand Kumawat, K. (2025).** Unraveling the potential of microbial diversity in pesticide remediation : An eco-friendly approach for environmental sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101832. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101832>
- Singh, B. K., & Walker, A. (2006).** Microbial degradation of organophosphorus compounds. *FEMS microbiology reviews*, 30(3), 428-471.

- Slimani, H. (2022).** *Isolement et Identification des Microorganismes Intervenant dans la Bioremédiation et la Dépollution Des Sols Contaminés par Les Pesticides* [thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba. Algérie].
- Soares, W. L., & de Souza Porto, M. F. (2009).** Estimating the social cost of pesticide use: An assessment from acute poisoning in Brazil. *Ecological Economics*, 68(10), 2721-2728.
- Srinivasulu, M., Maddela, N. R., Chandra, M. S., Chandramati Shankar, P., Rangaswamy, V., & Prasad, R. (2024).** Microbe-pesticide interactions: Soil enzyme analysis and bacterial degradation of chlorpyrifos. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.05.004>
- Sun, M., Xu, W., Zhang, W., Guang, C., & Mu, W. (2022).** Microbial elimination of carbamate pesticides: specific strains and promising, *Enzymes. Applied microbiology and biotechnology*, 106: 5973–5986. <https://doi.org/10.1007/s00253022121414>
- Sviridov, A. V., Shushkova, T. V., Epiktetov, D. O., Tarlachkov, S. V., Ermakova, I. T., & Leontievsky, A. A. (2021).** Biodegradation of organophosphorus pollutants by soil bacteria: biochemical aspects and unsolved problems. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 57, 836-844.
- Swathy, K., Vivekanandhan, P., Yuvaraj, A., Sarayut, P., Kim, J. S., & Krutmuang, P. (2024).** Biodegradation of pesticide in agricultural soil employing entomopathogenic fungi: Current state of the art and future perspectives. *Heliyon*, 10(1), e23406. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23406>
- Tanabe, S., Madhusree, B., Öztürk, A. A., Tatsukawa, R., Miyazaki, N., Özdamar, E., ... & Öztürk, B. (1997).** Persistent organochlorine residues in harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) from the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 34(5), 338-347.
- Tang, W., Ji, H., & Hou, X. (2018).** Research progress of microbial degradation of organophosphorus pesticides. *Prog Appl Microbiol*, 1(1), 29-35.
- Thieffry, S., Aubert, J., Devers-Lamrani, M., Martin-Laurent, F., Romdhane, S., Rouard, N., Siol, M., & Spor, A. (2024).** Engineering multi-degrading bacterial communities to bioremediate soils contaminated with pesticides residues. *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134454. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134454>
- Usmani, Z., Kulp, M., & Lukk, T. (2021).** Bioremediation of lindane contaminated soil: Exploring the potential of actinobacterial strains. *Chemosphere*, 278, 130468. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130468>
- Vaishnavi, J., & Osborne, J. W. (2024).** Biodegradation of monocrotophos, cypermethrin & fipronil by *Proteus myxofaciens* VITVJ1: A plant - microbe based remediation. *Heliyon*, 10(18), e37384. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37384>
- Wondimu, K. T., & Geletu, A. K. (2023).** Residue analysis of selected organophosphorus and organochlorine pesticides in commercial tomato fruits by gas chromatography mass spectrometry. *Heliyon*, 9(3), e14121. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14121>

- Wondimu, K. T., Geletu, A. K., & Kedir, W. M. (2025).** Recent developments in monitoring of organophosphorus pesticides in food samples. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101709. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101709>
- World Health Organization. (2020).** International Code of Conduct on Pesticide Management: guidelines for personal protection when handling and applying pesticides. World Health Organization.
- Xie, P. P., Zong, Z. Q., Qiao, J. C., Li, Z. Y., & Hu, C. Y. (2024).** Exposure to pesticides and risk of colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 345, 123530.
- Yan, Q. X., Hong, Q., Han, P., Dong, X. J., Shen, Y. J., & Li, S. P. (2007).** Isolation and characterization of a carbofuran-degrading strain *Novosphingobium* sp. FND-3. *FEMS microbiology letters*, 271(2), 207–213. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00718.x>
- Yew Foo, H. C. (2024).** The function of microbial enzymes in breaking down soil contaminated with pesticides: a review. *bioprocess and biosystems engineering*. 47:597–620. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02978-6>
- Zhang, W., Bai, C., & Liu, G. (2007).** A longer-term forecast on global supply and demand of food products. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 5(1), 105.

الأطروحة : عرض لأهم الأبحاث حول التحلل الحيوي للمبيدات : مقارنة قائمة على المصادر العلمية

الإسم و اللقب : نوال جريدي

المؤطر : كلثوم شرفي

ملخص :

يُعد تلوث التربة والمياه بالمبيدات مشكلة بيئية رئيسية في جميع أنحاء العالم. وفي مواجهة الآثار الضارة لهذه المركبات على التنوع البيولوجي وصحة الإنسان، يبرز التحلل البيولوجي بواسطة الكائنات الحية الدقيقة الطبيعية كحل بيئي مستدام. وقد أصبح تحديد الكائنات الحية الدقيقة المشاركة في تحلل المبيدات قضية علمية رئيسية لتحسين استراتيجيات المعالجة. في السنوات الأخيرة، ركزت العديد من الدراسات المنشورة حديثاً على عزل وتوصيف السلالات الميكروبية القادرة على التحلل البيولوجي الفعال لأنواع مختلفة من المبيدات. وقد أظهر هذا العمل هيمنة البكتيريا في تحلل أكثر المبيدات سميةً وانتشاراً. كما درست الفطريات وبعض الإنزيمات الميكروبية، ولكن لا تزال تمثيلها أقل نظراً لعدم وجود تعريف محدد لها. ويؤكد تزايد الدراسات الحديثة الاهتمام المتزايد بفهم آليات التحلل البيولوجي الميكروبي، ويفتح آفاقاً واعدة للاستخدام المستهدف للإنزيمات في عمليات المعالجة البيولوجية.

وتشكل هذه الأطروحة جزءاً من هذه الديناميكية من خلال الاعتماد على تحليل بيبليوغرافي معمق من أجل تسليط الضوء على الكائنات الحية الدقيقة السائدة واقتراح أساليب جديدة لإزالة التلوث من البيئات الملوثة.

الكلمات المفتاحية : المبيدات الحشرية، التحلل البيولوجي، المعالجة البيولوجية، الإنزيمات الميكروبية، الكائنات الحية الدقيقة..

Thesis : Overview of Research on the Biodegradation of Pesticides: A Literature-Based Approach

First name and Name : DJERIDI Nawel

Directed by : CHORFI Keltoum

Abstract:

Pesticide contamination of soil and water is a major environmental problem worldwide. Faced with the harmful effects of these compounds on biodiversity and human health, biodegradation by natural microorganisms is emerging as an ecological and sustainable solution. Identifying the microorganisms involved in pesticide degradation has become a key scientific issue for optimizing remediation strategies. In recent years, numerous recent published studies have focused on the isolation and characterization of microbial strains capable of efficiently biodegrading different types of pesticides. This work has demonstrated the predominance of bacteria in the degradation of the most toxic and widely used pesticides. Fungi and certain microbial enzymes have also been studied, but remain less represented due to the lack of specific identification. The increased presence of recent studies underlines the growing interest in understanding microbial biodegradation mechanisms and opens up promising prospects for the targeted use of enzymes in bioremediation processes.

This thesis is part of this dynamic by relying on an in-depth bibliographic analysis in order to highlight the dominant microorganisms and to propose new approaches for the decontamination of contaminated environments.

Keywords : Pesticides, Biodegradation, Bioremediation, Microbial Enzymes, Microorganisms.