

N° Ordre /FSI/UMBB/2020



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE

ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARRA-BOUMERDES

Mémoire de Master

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Biochimie appliquée

Thème : Les phytoherbicides

Présenté par :

Haddouche Asmaa

Rahmoune Zineb

Devant le jury composé de :

Présidente : **Mme Halladj F. (MCB)**

Examinatrice : **Mme Acheuk F. (Prof.)**

Promotrice : **Mme Aourahoun Ait-kaci K. (MCB)**

Promotion -2019/2020-

Remerciements

Tout d'abord, nous rendons grâce à ALLAH, lui qui nous a accordé la bonne santé afin d'effectuer ce travail du début jusqu'à la fin.

Nous remercions nos parents respectueux pour leur soutien durant notre parcours d'études.

Nos remerciements vont, à notre directrice de mémoire, Dr. Ait Kaci Karima, elle qui nous a guidé avec ses orientations, ses conseils et ses critiques tout au long de ce travail de recherche, en nous laissant la liberté dont on avait besoin. On ne peut que lui être reconnaissantes surtout pour ses qualités intellectuelles et humaines.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Et enfin, nous sommes reconnaissantes envers tous les enseignants de l'Université M'HAMED BOUGARA-Faculté des Sciences BOUMERDES (UMBB) pour leur contribution à notre formation, et également à nos camarades et amis pour leurs aides précieuses.

Dédicace

Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tiens très chaleureusement à dédier à :

Ma mère chérie et mon père qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et pour leur patience. Qu'ALLAH les protège et les garde pour moi.

A mes adorables frères : Yacine El-Hakim et Taha El-Amine.

Et à ma sœur et très chère amie Zineb Rahmoune, mon binôme qui m'a toujours aidé et soutenue, et pour tous les moments d'échanges partagés, sans oublier mes amis, mes cousines et ma famille

....Asmaa

Dédicace

A ma mère Meriem

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon immense amour, mon estime, ma profonde affection et ma reconnaissance pour tous les sacrifices consentis pour mon bonheur et ma réussite. Merci pour ton soutien et ton amour.

A mon père Mohamed

En reconnaissance de tout ce tu as fait pour moi tout au long de mon existence, pour ton soutien moral, ton encouragement continu, et pour ta compréhension.

A mon très cher mari Yacine

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement à toi. Tu me voulais toujours la meilleure. Ton amour et ta disponibilité ne m'ont procuré que confiance et stabilité. Tu étais toujours à mes côtés. Je te remercie de ne m'avoir jamais déçu. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect. Je remercie ALLAH qui nous a unis. QU'ALLAH TOUT PUISSANT te comble de Bonheur, t'accorde Santé et Longue vie

A mon frère Hamza et mes sœurs Abla et Nour et à ma chère amie Asmaa

Quim'ont encouragé à aller de l'avant. Un grand MERCI. Qu'ALLAH vous comble de Bonheur et vous protège.

A TOUS LES MEMBRES DE MA GRANDE FAMILLE

ZINEB

Table des matières

Introduction générale	1
I. Généralités sur les herbicides.....	3
I.1. Les adventices.....	4
1) Définitions.....	4
2) Caractéristiques des adventices.....	4
2.1.Reproduction.....	4
2.2.Types biologiques.....	4
2.2.1.Les plantes annuelles ou « Thérophytes ».....	5
2.2.2.Les plantes bisannuelles ou « Hémicryptophytes ».....	5
2.2.3.Les pluriannuelles.....	5
2.2.4.Les vivaces.....	5
2.3.Capacité d'adaptation.....	7
2.4.Productivité et longévité.....	7
3) Impact sur les cultures (ou Nuisibilité).....	8
3.1. Notion de la nuisibilité.....	8
3.2. Les aspects de nuisibilité.....	9
3.3. Seuil de nuisibilité.....	10
3.4. Degrés de nuisibilité.....	11
4) Méthodes de lutte contre les adventices	11
4.1. Méthodes préventives.....	11
4.2. Méthodes culturales (mécaniques).....	13
4.3.Lutte chimique.....	13
4.4. Lutte biologique.....	14
I.2. Les herbicides.....	15
1) Définition.....	15
2) Classification des herbicides.....	15

2.1. Classification chimique.....	15
2.2. Selon le but poursuivi.....	17
2.3. Selon le mode de pénétration dans la plante.....	18
2.4. Selon le moment d'application.....	18
2.5. Classification selon l'HRAC(Herbicide resistance action committee).....	18
3) Propriétés physico-chimiques des herbicides.....	21
4) Propriétés toxicologiques.....	22
A. Ecotoxicité	22
B. Toxicité humaine	22
5) Résistance aux herbicides.....	23
5.1. Types de résistance.....	23
5.2. Mécanismes de résistance.....	24
6) Effets nuisibles des herbicides.....	24
6.1. Sur l'environnement.....	24
6.2. Sur la santé.....	27
I.3. Les bioherbicides.....	28
1) Principe d'action.....	28
2) Classification des bioherbicides.....	29
2.1.Bioherbicides d'origine microbienne	30
2.1.1.Les Mycoherbicides.....	30
2.1.2.Les virus comme bioherbicides.....	31
2.1.3.Les bactéries comme bioherbicides.....	31
2.2.Bioherbicides d'origine végétale.....	33
2.2.1.Les extraits bruts.....	34
2.2.2.Les huiles essentielles.....	34
2.2.3.Les poudres végétales.....	35
3) Formulation des phytoherbicides.....	35

3.1. Formulations solides	35
3.2. Formulations liquides	36
3.3. Emulsions simples.....	36
3.4. Emulsions inversées.....	36
3.5. Formulations spécifiques.....	36
4) Limitations des bioherbicides.....	37
4.1. Limitations environnementales.....	37
4.2. Limitation biologique.....	37
4.3. Limitations technologique et commerciale.....	37
II . Travaux antérieurs sur les phytoherbicides.....	38
1/ Les huiles essentielles.....	39
2/ Les poudres végétales.....	42
3/ Les extraits bruts.....	43
4/ Les extraits hydro alcooliques.....	44
5/ Les extraits aqueux.....	45
Conclusion.....	47
Références bibliographiques.....	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples d'adventices de chaque type de cycle biologique.....	6
Tableau 2 : Productivité et longévité de quelques adventices.....	8
Tableau 3 : Classification des herbicides selon l'HRAC.....	18
Tableau 4 : Critère de biodégradabilité d'un herbicide.....	21
Tableau 5 : Critères de toxicité aiguë des matières actives.....	23
Tableau 6 : Les différents effets des herbicides sur la santé.....	27
Tableau 7 : Pathogènes fongiques et mauvaises herbes ciblées.....	31
Tableau 8 : Pathogènes viraux et mauvaises herbes ciblées.....	31
Tableau 9 : Différentes mauvaises herbes contrôlées par des pathogènes bactériens.....	32

Liste des figures

Figure 1 : Types biologiques selon la classification de Raunkiær (1905).....	6
Figure 2 : L'effet du désherbage chimique, du travail du sol et de leur association sur le rendement du blé tendre var Anza	14
Figure 3 : Structure chimique du glyphosate	16
Figure 4 : Schéma conceptuel des voies d'évolution des pesticides.....	25
Figure 5 : Classification des bioherbicides.....	30
Figure 6 :Caractéristiques des bactéries en tant que bioherbicides potentiels.....	32
Figure 7 : Le mode d'action des bioherbicides microbiens.....	32
Figure 8 :Mode d'action des produits végétaux comme agents de lutte contre les mauvaises herbes.....	33

Introduction

Avec la croissance de la population mondiale, les terres agricoles diminuent, ce qui pourrait entraîner une pénurie alimentaire dans les années à venir. Il est urgent d'obtenir un rendement agricole élevé grâce à des pratiques améliorées et sûres. De nombreux produits agrochimiques sont disponibles pour lutter contre différents types de parasites agricoles tels que les insectes, les champignons, les agents pathogènes, les mauvaises herbes, etc.

Parmi les principaux ennemis des cultures, les mauvaises herbes « ou adventices » occupent une place très importante et sont considérées comme des plantes nuisibles à la culture, car elles diminuent sensiblement la production agricole quantitativement et qualitativement (**Mosango, 1983**).

Les mauvaises herbes pourraient engendrer des pertes de rendement potentielles, allant de 15% à 40%; elles accentuent en outre, le problème des maladies foliaires, favorisent les pullulations d'insectes et entravent l'exécution de certaines pratiques culturales (la moisson pour les espèces de fin de cycle), la compétition pour l'eau et les éléments minéraux et aussi la lumière (**DSA, 2017**).

Après la seconde guerre mondiale, l'introduction d'herbicides sélectifs, le MCPA ou acide 2-méthyl-4-chlorophénoxyacétique et le 2,4-dichlorophénoxyacétique, a considérablement réduit les pertes dues aux mauvaises herbes sans nuire à la culture principale (**Mithila et al., 2011**). A l'heure actuelle, des problèmes de résistance des mauvaises herbes ont été signalés malgré leur sélectivité. La culture transgénique a été adoptée dans le monde entier pour lutter contre ce problème de résistance et remplacer les anciennes méthodes de lutte chimique (**Green et Owen, 2011 ; Beckie, 2011**). Le développement continu de méthodes de contrôle avancées est nécessaire pour surmonter les problèmes liés au contrôle des mauvaises herbes et au maintien des rendements agricoles.

La lutte contre les adventices, implique des pratiques de gestion intégrée qui permettent de réduire efficacement les pertes dues aux mauvaises herbes. Il existe plusieurs méthodes de lutte, directes et indirectes (**Marshall et al., 2003 ; Chikowo et al., 2009**). Les méthodes indirectes affaiblissent les mauvaises herbes en réduisant leur croissance végétative et reproductive. Les méthodes directes consistent à détruire les mauvaises herbes par des méthodes manuelles, mécaniques, biologiques et chimiques (**Chauvelin et al., 2012**). Ces méthodes de lutte existantes ont certaines limites et ne sont pas adaptées à la durabilité des pratiques agricoles modernes. C'est pourquoi, de nouvelles méthodes de lutte contre les mauvaises herbes, respectueuses de l'environnement sont en cours de développement.

Les bioherbicides, constituent l'une des approches agricoles sûres, adoptées dans ce sens. Il s'agit de produits naturels à base de plantes ou d'agents pathogènes, utilisés pour le contrôle biologique des adventices. Les bioherbicides constituent la nouvelle stratégie visant à minimiser les inconvénients conventionnels existants.

Les extraits végétaux y compris notamment, les huiles essentielles ont été étudiés depuis de nombreuses années pour leurs propriétés fongicides et bactéricides, en vue de leur valorisation

en médecine humaine et vétérinaire et plus récemment en protection des cultures. De nombreux travaux de recherche ont montré le potentiel bioherbicide de certains extraits végétaux en conditions contrôlées. Il s'agit d'études limitées tant du point de vue des extraits végétaux testés que du nombre et de la diversité des adventices sur lesquelles ils ont été testés **(Ben kaab, 2020)**.

L'interaction entre les plantes par l'intermédiaire de molécules chimiques, l'allélopathie, suscite actuellement un intérêt grandissant. Une meilleure connaissance de ce phénomène pourrait offrir des perspectives intéressantes pour la gestion de la flore spontanée des parcelles cultivées et ainsi contribuer à diminuer l'utilisation d'herbicides de synthèse **(Zeghada, 2009)**.

Notre mémoire est donc une contribution à la connaissance des divers aspects se rapportant aux plantes adventices, en particulier l'usage des bioherbicides d'origine végétale « ou phytoherbicides ». Un aperçu général est accordé aux travaux de recherche visant à démontrer le potentiel herbicide des extraits végétaux et à l'étude du mode d'action de leurs composés actifs identifiés.

Ainsi, le premier chapitre est une introduction bibliographique qui met en évidence la problématique des adventices en agriculture, les méthodes de lutte actuelles (préventives, culturales, mécaniques) et l'utilisation des pesticides chimiques et les composés allélochimiques pour faire face à cette problématique.

Le deuxième chapitre, est une synthèse de quelques résultats rapportés par les différents travaux scientifiques publiés, notamment ces dix dernières années, en tenant compte des méthodes d'évaluation utilisées pour les tests d'activité herbicide ainsi que des substances utilisées et ce, afin de répondre à la question : les phytoherbicides constituent-ils une solution alternative aux herbicides chimiques ?

I. GENERALITES SUR LES HERBICIDES

I.1. Les adventices

1) Définitions

Une adventice (du latin *adventicius* issu du verbe advenir « qui vient de l'extérieur »), appelée également « mauvaise herbe » et « Weed » en anglais, est une plante qui pousse naturellement dans un endroit (champ, massif, etc.) sans y avoir été intentionnellement installée.

Selon l'**AFPP et CEB (2011)**, les adventices (terme botanique) ou les mauvaises herbes comme désignées en malherbologie, sont des plantes herbacées ou ligneuses indésirables à l'endroit où elles se trouvent.

Selon **Montegut (1980)**, la notion de « mauvaises herbes » est étroitement associée à celle de la concurrence qu'une espèce non semée développe contre la culture semée ou plantée de façon concomitante.

Pour **Longchamp (1977)**, une mauvaise herbe n'est pas mauvaise en soi, tout dépend des inconvénients qu'elle présente pour l'homme.

2) Caractéristiques des adventices

2.1. Reproduction

La reproduction des plantes adventices et leur conservation sont assurées par deux voies majeures, soit par la reproduction sexuée, c'est-à-dire le croisement de deux individus (production de graines) comme chez les espèces annuelles, les bisannuelles et les pluriannuelles ; ou bien par la multiplication végétative (c'est le développement et le fractionnement d'une partie de l'appareil végétatif d'un seul individu), le cas des vivaces qui peuvent aussi produire des graines (**Arino et al., 2012**).

Selon **Maillet (1992)**, les mauvaises herbes appartiennent aux deux types de reproduction (monocarpique et polycarpique). La reproduction monocarpique ou sexuée concerne le type annuel et bisannuelle, 70% des mauvaises herbes appartiennent à ce groupe. La reproduction polycarpique ou reproduction végétative concerne les pluriannuelles et vivaces.

2.2. Types biologiques

Les types biologiques ont été établis par **Raunkiaer (1905)** en se basant sur les caractères et la position des bourgeons (**fig. 1**). Ils sont représentés par :

2.2.1. Les plantes annuelles ou « Thérophytes »

Elles se reproduisent par graines et germent généralement au printemps, fleurissent en été, disséminent leurs graines en automne et meurent en hiver. Ces plantes survivent à l'hiver sous forme de graines. Certaines sont cependant capables de produire plusieurs générations dans l'année (**Lagueyrie, 2020**). Selon **Mc Cully et al. (2004)**, deux types de plantes annuelles sont à distinguer :

a- Les annuelles d'été

Elles sont appelées aussi « estivales », car elles germent au printemps et en été, elles produisent des organes végétatifs, des fleurs et beaucoup de graines et elles ont la propriété de pousser très rapidement et meurent la même année.

b- Les annuelles d'hiver

Elles sont dites aussi « automnales », car elles germent de la fin août- début novembre et passent l'hiver à l'état de rosettes et elles poussent très rapidement au printemps, fleurissent et produisent les graines puis meurent à la fin de la saison.

Il est à noter que les populations de mauvaises herbes sont majoritairement annuelles.

2.2.2. Les plantes bisannuelles ou « Hémicryptophytes »

Leur germination commence au printemps de la première année. Elles développent des organes végétatifs et passent l'hiver à l'état de rosette puis au printemps de la deuxième année, elles fleurissent, produisent des graines et meurent.

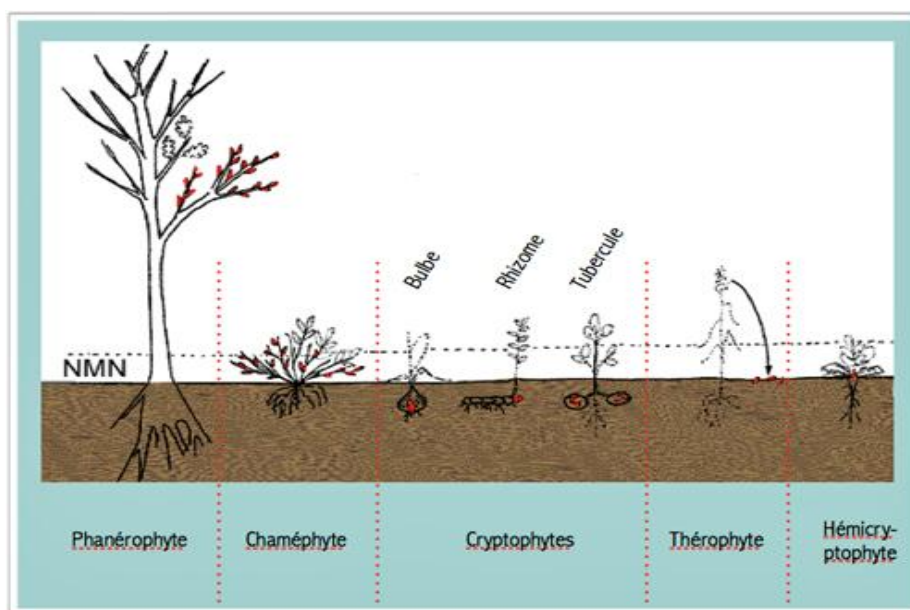
Les bourgeons, au ras du sol, sont enfouis dans des rosettes de feuilles (pissenlits, plantains, iris, etc.).

2.2.3. Les pluriannuelles

Elles sont représentées par les types **Hémicryptophytes**, **Chaméphytes** et **Phanérophytes**. Elles vivent plusieurs années, se régénérant par des bourgeons se trouvant au ras du sol, soit au cœur de la rosette hivernale fixée sur un plateau racinaire persistant soit au sein des graines desséchées de la touffe précédente, cas des Poacées.

2.2.4. Les vivaces

De type « **Géophytes ou Cryptophytes** », ces plantes sont particulièrement difficiles à détruire une fois qu'elles sont établies, car ces plantes possèdent des organes végétatifs (bulbes, tubercules, rhizomes, stolons) qui leur permettent de passer la mauvaise saison enfouies dans le sol.



NMN : niveau moyen de la neige

Figure 1 : Types biologiques selon la classification de Raunkiaer (1905).

Le tableau 1 présente des exemples d'adventices pour chaque type de cycle biologique.

Tableau 1 : Exemples d'adventices (Mamarot et Rodriguez, 2014).

Type de cycle biologique	Durée du cycle	Reproduction sexuée	Multiplication végétative	Exemples
Annuel	1an	Oui	Non	-Gaillet grateron -Coquelicot -Folle -Avoine -Chénopode blanc -Sétaire
Bisannuel	2ans	Oui	Non	-Carotte sauvage -Armoise vulgaire
Pluriannuel	Plusieurs années (>2ans)	Oui	Oui (accidentel)	-Rumex crépu
Vivace	“Eternel”	Oui	Oui	-Chiendent rampant -Chardon -Avoine à chapelet

2.3. Capacité d'adaptation

Les adventices sont adaptés aux mêmes sols et aux mêmes conditions climatiques que les plantes cultivées. Les pratiques qui favorisent les cultures favorisent aussi les mauvaises herbes (**Nedjar et Ben loucif, 2018**). La capacité d'une espèce à devenir envahissante dépend d'un certain nombre de caractères phéno- morpho- physiologiques dont :

- Ressemblances morphologiques et/ou physiologiques avec les plantes cultivées (plantes mimantes et plantes tolérantes ou résistantes aux herbicides) et leur croissance rapide notamment, au stade plantule.
- La synchronisation de la maturité des graines avec celle de la culture et leur dormance et longévité dans le sol.
- Polymorphisme des graines et des besoins germinatifs et la germination discontinue pendant de longues périodes.
- Cumul de plusieurs types de reproduction (multiplication par rhizomes ou autres propagules végétatives, pollinisation par le vent ou des insectes généralistes) et le système de fécondation généralement, auto-compatible.
- Une production de graine importante en conditions favorables, mais également possible en conditions de stress (**Petitfils, 1980**).
- Croissance végétative rapide vers la phase de reproduction et développement rapide du système racinaire « exploiteur ».
- Forte capacité d'acclimatation à des conditions variables et longévité élevée des semences (25-100 ans) (**Petitfils, 1980 ; Barralis, 1980 et Michel-Michez, 1980**).
- Taux de photosynthèse élevé et allocation rapide des photosynthétats vers de nouvelles surfaces foliaires.
- « Armes » spéciales pour la compétition (nitrophilie, port couvrant, allélopathie) et l'indépendance vis-à-vis des contraintes environnementales.

2.4. Productivité et longévité

La productivité des adventices varie selon l'espèce d'adventices, l'origine géographique et écologique, ainsi que sa présence au niveau du terrain soit isolé ou en groupe ; elle est grande quand elle est isolée et limitée si elle est associée à une autre culture (**Barralis, 1973**) (Tableau 2).

La longévité des semences des mauvaises herbes est généralement plus grande que celle des plantes cultivées lorsque les conditions du milieu sont identiques (**Barralis, 1973**). La dissémination est fonction de la répartition des plantes mères, de leur hauteur, de l'agent de dissémination et de la végétation présente tout autour qui pourra intercepter les graines en mouvement (**Navas, 1993**). La dissémination ou la dispersion des semences est variable suivant leur forme, leur grosseur ou leur ornementation (aigrettes, poils, crochets, etc.).

Selon (**Holzner, 1982 ; Ozenda, 1982 et Maillet, 1992**), la dissémination peut se faire naturellement par l'intervention de l'homme (anthropochorie) involontairement, car elle

est causée par le transfert des semences ou les moyens d'entretien cultural, on a aussi l'explosion des fruits (ballochorie), les animaux (zoochorie), le vent (anemochorie) et les eaux (hydrochorie).

La dissémination se fait aussi par la multiplication par bourgeonnement des racines, des tiges et multiplication par bulbes et bulbilles, cas de la reproduction végétative. Cette dissémination est surtout réalisée par les instruments aratoires, ainsi que les eaux d'irrigation et de ruissellement (**Montegut, 1983**).

Tableau 2 : Productivité et longévité de quelques adventices (Brralis, 1973).

Espèces	Productivité (Nb.graines)	Longévité (ans)
<i>Ranunculus arvensis</i>	Moins de 250	/
<i>Stellaria media</i>	Moins de 250	/
<i>Veronica persica</i>	Moins de 250	10
<i>Anagallis arvensis</i>	250 à 500	60
<i>Convolvulus arvensis</i>	250 à 500	/
<i>Polygonum aviculare</i>	500 à 1000	60
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	1000 à 5000	12
<i>Chenopodium album</i>	1000 à 5000	40
<i>Sinapis arvensis</i>	1000 à 5000	60
<i>Sonchus arvensis</i>	5000 à 20,000	/
<i>Cynodon dactylon</i>	20,000 à 40,000	/
<i>Papaver rhoeas</i>	20,000 à 40,000	/
<i>Solanum nigrum</i>	Plus de 40,000	5
<i>Chrysanththemum</i>	/	10
<i>segetum</i>	/	20
<i>Plantago lanceolata</i>	/	80
<i>Daucus carota</i>	/	
<i>Rumex crispus</i>		

3) Impact sur les cultures (ou Nuisibilité)

3.1 Notion de la nuisibilité

La nuisibilité d'une adventice est très variable selon les cultures, la région, le climat, le sol (**Arino et al., 2012**).

Le concept de nuisibilité englobe deux sortes d'effets, une nuisibilité due à la flore potentielle et une nuisibilité attribuée à la flore réelle. Ces deux concepts montrent clairement les dégâts causés par les mauvaises herbes, et leurs effets sur la productivité et le rendement des cultures (**Nedjar et Ben Loucif, 2018**).

Caussanel et Kheddam en **1983** réalisent une enquête et établissent la liste des mauvaises herbes les plus fréquentes dans les cultures fruitières d'Algérie.

➤ **La nuisibilité de la flore potentielle :**

Pour chaque espèce, chacun des organes de multiplication conservés dans le sol à l'état de repos végétatif (semences, bulbes, tubercules, etc.) donne un individu à la levée. Ceci dit, avec un potentiel semencier de l'ordre de 4000 semences viables par m² et si l'on admet que les levées au champ représentent généralement entre 5% et 10% du nombre de semences enfouies, les infestations prévisibles d'une culture représentent 200 à 400 adventices par m² (**Roberts, 1981 ; Barralis et Chadoeuf, 1987 ; Caussanel, 1988**).

➤ **La nuisibilité de la flore réelle :**

La nuisibilité réelle est celle qui s'exerce par les plantes qui lèvent réellement au cours du cycle de la culture (= nuisibilité primaire). Elle peut se manifester soit directement ou indirectement et n'est prise en compte que par ses effets indésirables sur le produit récolté (**Caussanel, 1988**).

3.2 Les aspects de nuisibilité

a) Interactions biologiques entre mauvaises herbes et plantes cultivées

Les mauvaises herbes sont une des principales contraintes biologiques qui affectent la production agricole. On parle du rendement de produit récolté et les diverses actions dépressives causées par les mauvaises herbes sur les plantes cultivées qui les entourent pendant leur cycle végétatif (**Caussanel, 1988**).

b) Compétition due aux mauvaises herbes

La lumière, les éléments nutritifs du sol (tout particulièrement l'azote) et l'humidité du sol sont les plus connus ; plusieurs mises au point sur leur rôle dans les mécanismes de la compétition ont été présentées. Certaines mauvaises herbes comme, par exemple, la folle avoine (*Avena fatua* L.) présentent de nombreux avantages compétitifs sur les céréales cultivées (**Caussanel, 1988**).

c) L'épuisement des éléments nutritifs

Les mauvaises herbes peuvent profiter des engrais plus que les cultures. En examinant les réponses respectives du blé et de 22 mauvaises herbes agricoles à la fertilisation phosphatée, il a été remarqué qu'une forte fertilisation phosphatée dans une culture avec une réaction relativement faible au phosphore, peut être une mauvaise pratique agronomique en présence d'espèces de mauvaises herbes capables de réagir vivement au phosphore du sol (**Blackshaw et al., 2004**).

d) Croisement accidentel et diminution de l'homogénéité

Il y a une possibilité d'un croisement spontané entre les plantes cultivées et les mauvaises herbes, on a l'exemple de la betterave (*Beta vulgaris*). La pollinisation des betteraves par la betterave sauvage aboutit à la formation de betterave mauvaise herbe résistant aux herbicides (**Fénart, 2006**).

e) Allelopathie ou phénomène d'antagonisme

Selon **Gautier (1987)**, la nocivité des adventices peut s'exercer par voie biologique. Certaines plantes excrètent des produits toxiques capables de limiter l'extension des plantes se trouvant dans leur voisinage. C'est le cas des racines d'*Agropyrum repens* dont la décomposition libère des substances inhibitrices. Ce phénomène est dit Allelopathie ou télétoxie (**Guyot, 1951 ; Caussanel et Barralis, 1973 ; Rice, 1974 ; Harper, 1977 et Caussanel, 1989**). Le phénomène d'allelopathie a été démontré expérimentalement *in vitro* dans les essais biologiques où des substances organiques excrétées par la plante se sont révélées inhibitrices de la croissance à partir de certaines doses (**Caussanel, 1989**).

Les substances (exsudats) peuvent être une défense de la plante cultivée contre les mauvaises herbes, c'est le cas de l'avoine cultivée contre *Sinapis arvensis* et du blé et de l'orge contre *Matricaria maritima* (**Kadra, 1976**). Les phénomènes d'allelopathie entre les mauvaises herbes et les cultures sont rarement différenciés des phénomènes de compétition (**Rice, 1984 ; LE Bourgeois, 1993**), car au champ il est impossible de dissocier les deux phénomènes.

3.3 Seuil de nuisibilité

Les seuils de nuisibilité sont à la base de toutes lutttes raisonnées ou intégrées (**Desaymard, 1976**). On distingue deux notions de seuil de nuisibilité :

a / Seuil de nuisibilité biologique

C'est le niveau d'infestation à partir duquel, une baisse de rendement de la culture est mesurée/observée. Dans une culture de blé de printemps, on estime une perte de rendement de 5%, causée par une densité de tallage de 5 plants/m² d'avoine. Dans une culture de tomate, une seule morelle par m² suffit pour causer une perte de rendement de 12% à la récolte (**Caussanel et al., 1986**).

b/ Seuil de nuisibilité économique

C'est le niveau d'infestation à partir duquel une opération de désherbage devient rentable, compte tenu du prix de revient du traitement et de la valeur de la récolte. Les pertes de production en Afrique dues aux mauvaises herbes montrent une large variation allant de 10 à 56% suivant les conditions édapho-climatiques du site d'après **Cramer (1967)** cité par **LE Bourgeois (1993)**.

En Algérie, les cultures céréalières, légumineuses et maraîchères payent chaque année un lourd tribut du fait de leur invasion par une multitude de plantes adventices. Les pertes

de rendements sont évaluées à 24,5% et peuvent aller jusqu'à 39,5% en cas de fortes infestations (**Anonyme, 1978**).

3.4 Degrés de nuisibilité

Pousset (2003) distingue les adventices en : « franchement gênantes », « plus ennuyeuse que gênantes » et « souhaitables ».

➤ Les franchement gênantes

Elles sont envahissantes, étouffantes, toxiques pour nos cultures et réduisent sensiblement les rendements. Leurs envahissements nous inquiètent, donnent de nos pratiques, une mauvaise image auprès de ceux qui utilisent des herbicides et sont souvent sensibles à l'aspect visuel des cultures. Elles ont tendance à dominer les autres adventices et à occuper tout l'espace, y compris parfois pendant les inter-cultures. Nous pouvons donner comme exemple le *Convolvulus arvensis* (**Pousset, 2003**).

➤ Les plus ennuyeuses que gênantes

Elles ne diminuent pas, ou pas beaucoup les rendements, mais entraînent divers désagréments : orties qui irritent la peau, les chénopodes, etc (**Pousset, 2003**).

➤ Les souhaitables

Elles aident les cultures à condition de ne pas être trop envahissantes. On peut dire d'une façon générale que, les flores adventices souhaitables sont celles qui comportent plusieurs espèces bien réparties, en quantités limitées et correspondant à la flore indicatrice et correctrice du sol considéré. Elles ne gênent pas les cultures et améliorent progressivement la fertilité (**Pousset, 2003**).

4) Méthodes de lutte contre les adventices

La lutte contre les mauvaises herbes est essentielle lorsqu'elles deviennent gênantes dans les cultures. L'un des majeurs principes de l'agriculture biologique vise à prévenir les problèmes plutôt que de les guérir. Ce principe vaut également pour la gestion des adventices (**FAO, 2016**).

D'après **Jussiaux et Pequigot (1962)** ; **Khoury (1991)**, la réussite de la lutte contre les mauvaises herbes nécessite une connaissance approfondie de leur mode de vie, il est évident que les méthodes de lutte utilisées seront différentes selon le type biologique de chaque adventice.

4.1 Méthodes préventives

C'est un ensemble de méthodes préventives et/ou curatives à adapter en fonction du contexte pédoclimatique. Le raisonnement se fait sur le long terme, à l'échelle de la rotation des cultures diversifiées (**Arino et al., 2012**).

Les moyens préventifs de lutte contre les mauvaises herbes englobent toutes les mesures qui préviennent l'introduction et la prolifération des mauvaises herbes (**Mc cully et al., 2004**).

Selon **FAO** et **TECA (2016)**, plusieurs mesures préventives peuvent être appliquées simultanément; l'efficacité des différentes méthodes dépend surtout des espèces de mauvaises herbes et des conditions environnementales. Cependant, certaines pratiques sont efficaces contre de nombreuses et diverses adventices et sont donc utilisées régulièrement.

a) Le choix des cultures et des variétés

Les cultures de grande taille et les variétés à feuilles larges permettent de mieux concurrencer les mauvaises herbes que les variétés de petite taille à feuilles étroites. Certaines variétés inhibent et font disparaître les mauvaises herbes tandis que d'autres les tolèrent (**FAO/TECA, 2016**).

b) La rotation des cultures

C'est la mesure la plus efficace pour réguler la quantité de graines et de racines de mauvaises herbes sur une parcelle. La modification régulière des conditions de culture ne favorise pas l'installation des adventices et réduit ainsi leur croissance et leur propagation (**FAO/TECA, 2016**).

c) La gestion des semences

Il est conseillé d'éviter d'introduire des graines de mauvaises herbes sur des parcelles propres (exemptes d'adventices), en prenant soin de nettoyer les outils agricoles ainsi que les pieds, les crins et le poil des animaux de trait. De même, il est important de vérifier dans le cas d'achat de semences, que celles-ci ne soient pas contaminées par des graines d'adventices (**FAO/TECA, 2016**).

d) Le labour

Le labour influe sur la dynamique des mauvaises herbes par la date de réalisation, sa profondeur et les outils utilisés « type charrue » (**Hammadache, 1995**). Il a pour but d'enfuir le plus profondément possible les organes de multiplications des vivaces (rhizomes, bulbes, tubercules, etc.) (**Verdier, 1990**).

e) Contrôle de mauvaises herbes par le sol couvert

La culture couverte a le potentiel de réduire la croissance des mauvaises herbes. Les recherches sur la suppression des mauvaises herbes par la technique de semis sur des sols couverts présente un double objectif à savoir : éliminer les mauvaises herbes et éviter les maladies (**Carol, 2003**).

f) Le paillage (ou mulching)

Souvent, les mauvaises herbes ne sont pas en mesure de passer à travers la couche de paillis et ne peuvent pas se développer à défaut de lumière. Plus le matériel utilisé comme paillis est sec, dense et se décompose lentement, moins les adventices ont une chance de croître **(FAO/TECA, 2016)**.

g) La propagation des graines

Il est important d'empêcher la dissémination des graines d'adventices en éliminant les plantes avant qu'elles aient le temps de fleurir ou de faire murir leurs semences **(FAO/TECA, 2016)**.

4.2 Méthodes culturales (mécanique)

La lutte culturale suppose le recours aux pratiques culturales ordinairement utilisées dans les cultures, en vue de favoriser la culture aux dépens des mauvaises herbes concurrentes. Les moyens mécaniques de lutte contre les mauvaises herbes comprennent des méthodes comme le travail du sol, le désherbage à la main, le binage et le fauchage **(Mc Cully et al., 2004)**.

Le travail du sol, la fertilisation, le pâturage et les précédents culturaux sont parmi les facteurs agro-techniques qui agissent directement ou indirectement sur la dynamique des adventices dans le temps et dans l'espace **(Hammadache, 1995)**.

4.3 Lutte chimique

L'usage d'herbicides pour lutter contre les mauvaises herbes est un élément important de tout programme de lutte intégrée contre les mauvaises herbes **(Mc Cully et al., 2004)**.

Plusieurs critères distinguent les différents types d'herbicides, entre autres : leur effet phytotoxique, leur mode d'action, la période d'application **(Hanitet, 2012)**.

Les travaux de recherche ont montré que l'action des herbicides chimiques est momentanée et passagère, elle n'est pas associée aux assolements et aux travaux agricoles fondamentaux (préparation du sol, semis, fertilisation, etc.). De ce fait pour réduire l'infestation des adventices au minimum, l'agriculture combine plusieurs méthodes, par exemple l'association du travail du sol et herbicide (lutte intégrée) **(Zitoune et al., 1988)**.

La **figure 2** montre l'effet du désherbage chimique, du travail du sol et de leur association sur le rendement du blé tendre var Anza.

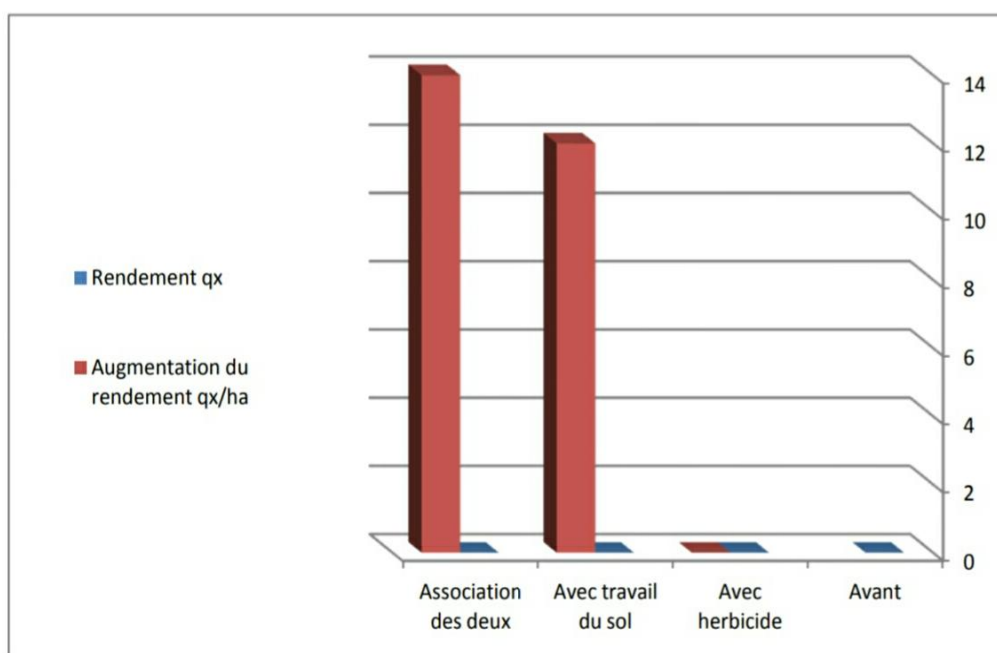


Figure 2 : L'effet du désherbage chimique, du travail du sol et de leur association sur le rendement du blé tendre var Anza (**Zitoune et al., 1988**).

4.4 Lutte biologique

La lutte contre les adventices à l'aide du bio-contrôle peut être réalisée par différents moyens :

- Au niveau de l'habitat, profitant naturellement des prédateurs de graines de mauvaises herbes ou des bactéries. En effet, selon **Palvadeau et Delval (2020)**, certains organismes auxiliaires phytophages peuvent être utilisés pour lutter contre les adventices des cultures ou les plantes envahissantes, permettant ainsi la diminution du recours aux herbicides par les collectivités ainsi que la lutte contre les espèces végétales envahissantes dans les zones difficiles d'accès. Les auxiliaires comme les insectes de la famille des Carabidés, pourraient contribuer à limiter le stock semencier des adventices et ainsi être une méthode préventive. Comme existe aussi, certaines rhizobactéries qui ont la capacité de réduire ou inhiber la croissance des adventices par la sécrétion de toxines.
- Par l'utilisation de mycoherbicides. Ces derniers sont des préparations à base de champignons (spores, mycélium, etc.) provoquant une maladie spécifique qui permet de lutter contre les mauvaises herbes
- Par allélopathie et substances naturelles. Certaines plantes à propriétés allélopathiques peuvent être utilisées comme des bio-herbicides contre certaines adventices tout comme des substances naturelles comme de la farine de gluten de maïs par exemple. L'acide nonanoïque ($C_9H_{18}O_2$) obtenu par extraction végétale, détruit la cuticule, entraînant ainsi la perméabilisation des cellules. Ceci engendre une déshydratation quasi immédiate des tissus, avec effet visible dans les 2 heures qui suivent l'application. Ces produits sont

utilisables pour le désherbage de la vigne, l'épamprage de la vigne et le défanage de la pomme de terre (**Palvadeau et Delval, 2020**).

I.2. Les herbicides

1) Définition

On appelle « herbicide » toute substance ou produit phytosanitaire naturel ou de synthèse, destiné à éliminer les adventices ou limiter leur développement par divers modes d'action.

Par ailleurs, les herbicides font partie des pesticides, et sont classés dans la catégorie des produits phytopharmaceutiques. Leur emploi ne se limite pas au domaine agricole, ils sont utilisés aussi bien pour la protection des cultures que pour le confort (jardinage, entretien des villes, des voies ferrées) (**Calvet et al., 2005**).

2) Classification des herbicides

Les herbicides peuvent être regroupés en différentes catégories ou classes selon le critère retenu : leur sélectivité, leur famille chimique, leur mode de pénétration dans la plante et leur période d'application (usage préventif ou curatif) (**Agra-Ost, 2006**). Néanmoins, la classification selon le mode d'action est la plus commune.

2.1. Classification chimique

Les principales classes chimiques des herbicides sont les suivantes :

- **Les colorants nitrés**

Les colorants nitrés agissent par contact sur de nombreuses adventices (moutarde, coquelicot, vesce), mais certaines leur résistent notamment le liseron et le rumex, en modifiant la perméabilité des membranes cellulaires. Ils sont toxiques pour beaucoup d'êtres vivants.

- **Les carbamates**

Cette famille à toxicité immédiate faible, mais assez volatile comporte non seulement des herbicides mais également des fongicides et des insecticides (**Olivier, 2007**). Ils sont classés selon l'acide dont ils dérivent :

- Les carbamates qui bloquent la division cellulaire sont issues de l'acide carbamique.
- Les biscarbamates qui bloquent la photosynthèse sont issues de l'acide biscarbamique.

- **Les hormones désherbant ou aryloxyacides**

Ce sont des produits peu toxiques qui pénètrent dans les plantes par les feuilles et sont véhiculés par la sève et qui dérèglent gravement le métabolisme du végétal à détruire.

- **Les dérivés de l'urée ou urée substitué**

Ils pénètrent dans la plante par les racines, sont véhiculés par la sève et s'accumulent dans les feuilles où ils bloquent la photosynthèse, ils sont rémanents dans le sol, mais leur toxicité immédiate est faible. Exemple : l'isoproturon, le chlortoluron.

- **Les benzonitriles**

Ils perturbent l'activité des zones de développement des végétaux qu'on appelle les méristèmes où les cellules sont encore peu différenciées et se multiplient rapidement. Ils bloqueraient notamment la formation de la cellulose. Ce sont des produits assez persistants dont la toxicité immédiate n'est pas négligeable (**Agra-Ost, 2006**).

- **Les triazines**

Les triazines comportent un squelette moléculaire composé de 3 atomes de carbone et 3 atomes d'azote. Elles pénètrent dans les plantes par les racines et bloquent elles aussi la photosynthèse.

- **Les ammoniums quaternaires**

Ils perturbent la photosynthèse et leur toxicité immédiate est forte. Leur efficacité dans le désherbage est reconnue, mais ils sont assez dangereux car ils attaquent rapidement le tube digestif et les poumons. Exemple le diquat et le paraquat.

- **Les toluidines (dinitroanilines)**

C'est des produits assez toxiques qui bloquent la division cellulaire. Exemple : la buratine (**Agra-Ost, 2006**).

- **Les dizaines**

Utilisés pour le désherbage des plantations de pêchers, ils bloquent la photosynthèse des mauvaises herbes après absorption racinaire. Exemple : le bromacile.

- **Les amino-phosphates**

Ils comportent des désherbants totaux de contact parmi les plus connus, le glyphosate et le glufosinate (**figure 3**); le premier presque incontournable en grandes cultures (notamment maïs, soja, coton).

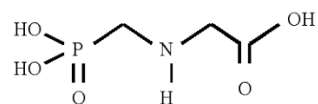


Figure 3 : structure chimique du glyphosate (**Calvet et al., 2005**).

- **Les dérivés de l'acide benzoïque**

Ils persistent longtemps dans les plantes et leurs résidus, pour cette raison les pailles de céréales traitées avec ces produits, notamment avec le dicamba ne doivent pas être utilisées pour la fabrication de fumiers ou compost ni fournies aux animaux.

- **Les dérivés picoliniques**

Ils comprennent notamment, le piclorame puissant débroussaillant très persistant pour lequel la remarque émise à propos du dicamba s'applique également.

- **Les sulfonylurées**

Ils sont absorbés par les feuilles et les racines des plantes à détruire et bloquent la formation de certains acides aminés. Exemple : le chorsulfuron, le nicosulfuron. (**Calvet et al., 2005**).

- **Les imidazolinones**

Elles sont absorbées par les feuilles et les racines et elles inhibent la synthèse de certains acides aminés comme la leucine, bloquant ainsi plus ou moins la croissance de la plante touchée qui vieillit prématurément.

- **Les amides**

On les obtient par déshydratation des sels d'ammoniaque, leur formule comporte au moins une fonction amide, ils empêchent la formation des gibbérellines et de certains lipides. Exemple : le tébulame, l'alachlore .

- **Les acides organiques halogènes**

Ils persistent plusieurs mois dans le sol. Exemple : le dalapon, herbicide anti graminées, utilisé dans la culture du colza ou pour dégager les plantations de feuillus en forêt (**Olivier, 2007**).

- **Les pyridinones**

Il s'agit surtout de la fluridone, utilisée dans la lutte contre les plantes aquatiques. Sa toxicité immédiate est faible.

2.2. Selon le but poursuivi

2.2.1. Herbicides non sélectifs ou totaux

Ces herbicides visent la destruction de toutes les espèces présentes, car ils sont efficaces sur l'ensemble des adventices et aussi les espèces cultivées et l'exemple le plus connu est certainement le Roundup et sa substance active, le glyphosate. (**Olivier, 2007**).

2.2.2 / Herbicides sélectifs

Un herbicide sélectif n'est généralement efficace que sur certaines adventices qui peuvent tolérer une espèce cultivée dans des conditions d'emploi définies. La sélectivité peut être :

- De nature physiologique : la plante cultivée est capable de se débarrasser de l'herbicide.
- De position : certains herbicides ne s'infiltrant pas dans le sol.
- Liée au caractère morphologique des plantes : forte pilosité, cuticule imperméable au produit, méristème protégé.
- Liée au stade de développement des plantes : adventices jeunes et faibles alors que les plantes cultivées sont fortes.
- Artificielle : certains produits contiennent des phytoprotecteurs ou « safeneurs » qui stimulent la décomposition de l'herbicide chez les plantes cultivées. (Olivier, 2007).

2.3/ Selon le mode de pénétration dans la plante

Ils se distinguent selon leur site de pénétration :

- Pénétration dans les tissus méristématiques.
- Pénétration au niveau des racines.
- Pénétration au niveau des feuilles (Onil, 2012).

2.4/Selon le moment d'application

2.4.1/ Traitement préventif

Les herbicides sont destinés à tenir un sol propre, ou utilisés comme traitement :

- En pré-semis ou pré-plantation,
- En pré-levée ou de post-semis,

2.4.2 / Traitement curatif

Les herbicides sont utilisés dans ce cas-là pour traitement de post-levée : ce sont souvent des herbicides foliaires appliqués après la levée des plantes considérées, ils doivent donc être très sélectifs (Onil, 2012).

2.5/ Classification selon l'HRAC (Herbicide resistance action committee).

La classification HRAC des herbicides est la répartition des substances actives herbicides établie, selon leurs modes d'action par l'Herbicide Resistance Action Committee (HRAC) en leur attribuant une lettre par groupe. Ils sont ainsi classés en fonction des métabolismes qu'ils affectent.

Tableau 3 : Classification des herbicides selon l'HRAC (The International Survey of Herbicide Resistant Weeds ; 2014).

Mécanisme ciblé	Modalité d'action	modalité détaillée	Substance active
	Altération du transport d'électrons	Blocage du photosystème2	Triazine
			Triazinones
			Triazolinones
			Uraciles
			Pyridazinones
			Phénylcarbammates
			Urées substituées
			Amides
			Benzothiadiazones

Photosynthèse			Hydroxybenzonitriles (HBN)
			Phénylpyridazinones
		Blocage du photosystème1	Bipyridiles
	Synthèse de chlorophylles	Inhibition de la Photoporphyrinogène oxydase (PPO)	Diphényl éthers
			N-phényl-phtalimides
			Oxadiazoles
			Phénylpyrazoles
			Triazolinones
			Thiadiazoles
			Oxazolidinediones
			Pyrimidinediones
	Synthèse des caroténoïdes	Inhibition de la Phytoene Désaturase	Aryloxypicolianilides
			Furanones
			Phénoxybutamides
			Pyridinécarboxamides
			Pyrrolidones
			Isoxazoles
			Tricétones
			Callistémones
			Pyrazoles
			Autres
			Diphényl éthers
			Isoxazolidinones
			Triazole
Synthèse des acides aminés	Synthèse de la valine, la leucine et l'isoleucine	Inhibition de l'acétolactate synthase (ALS)	Sulfonylurées
			Imidazolinone
			Sulfonyl amino carbonyl triazolinones
			Triazolopyrimidines
			Pirimidinylthiobenzoates
	Synthèse de la phénylalanine, de la tyrosine et du tryptophane	Inhibition de l'énolpyruvyl shikimate phosphate synthase (EPSP synthase)	Glycines
			Acides phosphiniques
	Synthèse des acides gras	Inhibition de l'acétyl coenzyme A carboxylase (ACCase)	Aryloxyphénoxy propionates (fops)
			Cyclohexane diones (dimes)
			Phenylpyrazolines (den)
	Inhibition de	Inhibition des élongases à l'origine des acides gras >18C (cire et subérine)	Benzofuranes
		Inhibition des élongations à l'origine des	Acétamides
			Chloroacétamides
			Oxyacétamides

Synthèse des lipides	l'élongation des acides gras	acides gras > 18c (cire et subérine) Inhibition des enzymes de cyclisation du géranyl géranyl phosphate (gibbérellines)	Tétrazolinones
			Autres
			Thiocarbamates
			Acides Chlorocarboniques
			Phosphorodithioates
Blocage de la division cellulaire en métaphase	Blocage de la formation des licrotubulles du fuseau achromatique	Inhibition de la polymérisation de la tubuline	Benzamides
			Dinitroanilines
			Phosphoroamidates
			Pyridines
			Acides benzoïques
	Blocage des centres organisateurs des microtubules (MTOC) et désorganisation des microtubules		Carbamates
	Blocage de la synthèse de l'acide folique et des MTOC	Inhibition de la dihydroptéroate synthase	Carbamates
Perturbation de la croissance	Activation de la division et de l'élongation cellulaire (croissance désordonnée)	Inhibition de la synthèse de la cellulose	Acides benzoïques
			Acides phénoxy-carboxyliques
			Acides pycoliniques
			Acides quinoléines carboxyliques
			Autres
Perturbation de la régulation de l'auxine			Phtalames
			Semi-carbbazones
Perturbation de la membrane	Découplants		Dinitrophénols
Sites d'action inconnus			Acide arylaminopropionques
			Pyrazoluim
			Dérivés organo arsenicaux
			Autres

3) Propriétés physico-chimiques des herbicides

- Temps de demi-vie au sol-TD₅₀

Le temps de demi-vie au sol (TD_{50}) est le temps nécessaire, pour que la masse de l'herbicide contenu dans le sol chute de 50% de sa valeur initiale (**Onil, 2012**). Cette mesure relève de la capacité de l'herbicide à se dégrader dans le temps, soit par dégradation physico-chimique, soit par dégradation microbienne (biodégradation) (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2000**).

Notons que le TD_{50} varie beaucoup selon les conditions dans lesquelles elle est mesurée. En effet, le type de sol, les conditions aérobiques, l'acidité, le taux de matière organique influencent la persistance d'un produit dans le sol (**Onil, 2012**).

- **Demi-vie dans l'eau – TD_{50} eau**

Ce paramètre chimique désigne le temps nécessaire pour que 50 % de la concentration initiale d'une matière active se transforme dans l'eau (**Blum, 2007**).

- **Demande biologique en oxygène (DBO_5 , DBO_{28}) et biodégradabilité dans l'eau.**

Par ajout à l'herbicide d'un oxydant fort en excès, on détermine le nombre d'atomes d'oxygène nécessaire pour que l'herbicide se dégrade complètement ; c'est la demande chimique en oxygène (DCO). En parallèle, on définit la DBO_5 comme étant la quantité d'oxygène consommée pour dégrader l'herbicide au bout de cinq jours (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2000**). De la même manière, la DBO_{28} est la quantité d'oxygène consommée au bout de 28 jours pour biodégrader l'herbicide. Le tableau suivant explique les critères de biodégradabilité d'un herbicide.

Tableau 4 : Critère de biodégradabilité d'un herbicide

Critère	Conséquence	Source
$DBO_{28} < 0,6 \text{ DCO}$	Produit non biodégradable	(Organisation des co-operations économiques et de développement, 2005).
$DBO_{28} > 0,6 \text{ DCO}$ et que $DBO_{17} > 0,1 \text{ DCO}$	Produit non biodégradable	
$DBO_t > 0,1 \text{ DCO}$ et que $DBO_{t+10} < 0,6 \text{ DCO}$ Où $t \in [1; 17]$	Produit non biodégradable	
$DBO_{28} > 0,6 \text{ DCO}$ et que $DBO_{17} < 0,1 \text{ DCO}$	Produit biodégradable	
$DBO_t > 0,1 \text{ DCO}$ et que $DBO_{t+10} > 0,6 \text{ DCO}$	Produit biodégradable	

- **Coefficient d'absorption sur le carbone organique K_{oc} (ml/g)**

Le K_{oc} est un indicateur du potentiel d'adsorption d'une matière active par les particules organiques du sol (**Calvet, 2005**).

- **Solubilité aqueuse (g/l)**

Quantité d'une substance pouvant être dissoute par litre d'eau. En général, les substances très solubles ont moins tendance à être adsorbées par les particules du sol, et par

conséquent son K_{oc} sera faible (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2000**).

- **Coefficient de partage octanol/eau (P_{ow})**

Cet indice traduit la tendance d'une matière active à la bioaccumulation de l'herbicide par les organismes vivants (vers de terre entre autres). En effet, un produit dont le P_{ow} (coefficient de partage) est petit (inférieur à 1), implique que celui-ci aura tendance à rester majoritairement dans le système aqueux de l'organisme animal et sera donc éliminé par les processus naturels de celui-ci. Cependant, un produit possédant un P_{ow} élevé aura tendance à être stocké dans les tissus adipeux de l'organisme animal où il pourra s'accumuler, c'est la bioaccumulation (**Olivier, 2007**).

4) Propriétés toxicologiques

La toxicité des herbicides dépend de plusieurs facteurs. Quatre éléments peuvent être pris en considération : le climat, le sol, la plante traitée et le mode d'application (**Amatrop, 2000**).

A- Ecotoxicité

L'indicateur de référence global est la dose létale 50 (DL50), la concentration létale (CL50) ou la concentration efficace (CE50). C'est la quantité massique d'herbicide, administrée en une fois à un lot d'une espèce vivante de référence et qui provoque la mort de 50% du lot (**Amatrop, 2000**). Cet indicateur permet d'estimer la toxicité aiguë du produit. Les principaux indicateurs écotoxicologiques sont :

- CL^{50} 14 jours pour les vers de terre (mg/kg de sol) ;
- DL^{50} orale ou $DL50$ contact pour les abeilles (mg/abeille) ;
- DL^{50} aiguë (mg/kg) pour les oiseaux ;
- CL^{50} aiguë (mg/l) pour les poissons 96 h ;
- CL^{50} ou $CE50$ (mg/l) pour les daphnies 48 h ;
- CE^{50} (mg/l) pour les algues (algue verte);
- CE^{50} (mg/l) pour les plantes vasculaires.

B- Toxicité humaine

Selon la voie d'exposition de l'homme à l'herbicide, le potentiel de toxicité humaine par sa substance active est évalué par les indicateurs $DL50$ (mg/kg) pour les voies orale et cutanée, et par $CL50$ (mg/l) pour la voie inhalée.

Notons que l'Organisation mondiale de la santé désigne le type de formulation comme l'une des principales variables de modulation de la toxicité des pesticides dans son système de classification des pesticides (**IPCS, 2005**). Selon leur type de formulation, les produits peuvent se répartir en deux groupes : ceux à risque d'exposition faible et ceux à risque d'exposition élevée.

Le tableau 5 présente les seuils de toxicité des différents indicateurs et le niveau de gravité documenté.

Tableau 5 : Critères de toxicité aiguë des matières actives (Amatrop, 2000).

Toxicité aiguë	Gravité de l'effet				
	Points alloués				
	8	4	2	1	0
	Valeur de l'indicateur				
DL ₅₀ orale (mg/kg)	≈ 50	50-300	300-2000	2000	
DL ₅₀ cutanée (mg/kg)	≈ 200	200-1000	1000-2000	2000	
CL ₅₀ inhalation (mg/l)	≈ 0,5	0,5-1	1-5	5	
Irritation cutanée	Sévèrement à extrêmement	Modérément	Légèrement	Très peu ou pas	
Irritation oculaire	Sévèrement à extrêmement	Modérément	Légèrement	Très peu ou pas	
Sensibilisation	Oui	Possible			Non

5) Résistance aux herbicides

La résistance aux herbicides traduit la capacité qu'a un peuplement de mauvaises herbes de survivre et se reproduire suite à un traitement herbicide qui, sous des conditions d'utilisation normale réussirait à le maîtriser efficacement.

Les mauvaises herbes résistantes aux herbicides sont normalement très rares dans un peuplement. Toutefois, le fait d'appliquer le même herbicide, dans le même champ, année par année, conduit à une sélection qui ne laisse que des plants résistants (**Anonymous, 2004**).

5.1. Type de résistance

a. Résistance croisée

C'est la capacité des adventices à résister à des herbicides ayant un même mode d'action. Cette aptitude est due à un mécanisme biochimique propre à la plante qui peut-être commandé par un gène unique, soit par plusieurs gènes qui influent sur un mécanisme unique (**Phipps et Park, 2005**).

b. Résistance multiple

Se définit comme la capacité d'un individu ou d'une population, de résister à des herbicides ayant des modes d'action différents, chez des plantes possédant deux ou plusieurs mécanismes de résistance distincts (**Phipps et Park, 2005**).

5.2. Mécanisme de résistance

On distingue deux types : la résistance liée à la cible (RLC) qui est due à une mutation ou une surexpression de la cible de l'herbicide, et la résistance non liée à la cible (RNLC) qui est due à un autre mécanisme, par exemple une dégradation rapide de la substance active (**Wick, 2001**).

a. Mutation de la cible

Se fait par une altération du site cible, donc la molécule active de l'herbicide ne peut plus se lier à ce site et est incapable d'exercer son effet phytotoxique.

b. Amplification ou surexpression de la cible

Lorsque la protéine cible, sur laquelle agit l'herbicide, est synthétisée en grande quantité par la plante, l'effet de l'herbicide devient insignifiant.

c. Dégradation de la molécule active détoxification

C'est la capacité d'une mauvaise herbe à dégrader rapidement une molécule active d'herbicide et de l'inactiver avant que le site cible soit affecté (**Anonymous, 2004**).

d. Séquestration de la molécule active

Dans ce cas, la molécule herbicide peut être inactivée soit par sa liaison, par exemple avec une molécule de sucre de la plante, soit par son retrait des régions actives du métabolisme de la cellule vers des zones inactives dans lesquelles elle se trouve sans effet (par exemple la paroi cellulaire) (**Anonymous, 2004**).

6) Effets nuisibles des herbicides

6.1. Sur l'environnement

Les composés actifs des herbicides ainsi que leurs métabolites sont susceptibles de se retrouver dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eaux de surface et eaux souterraines, sédiments, plantes, atmosphère) et y subir des processus de rétention, dégradation et transfert. **La figure 4** résume ces divers processus. Ainsi, les produits phytopharmaceutiques peuvent se disperser par lixiviation, lessivage, ruissellement, érosion, volatilisation, etc. et se dégrader du fait de divers processus comme la biodégradation ou la dégradation abiotique (hydrolyse, oxydation, etc.). Leur devenir dans l'environnement est fonction de leur structure chimique, des propriétés physico-chimiques des milieux et des conditions météorologiques comme la température, le vent et les précipitations (**Anses, 2019**).

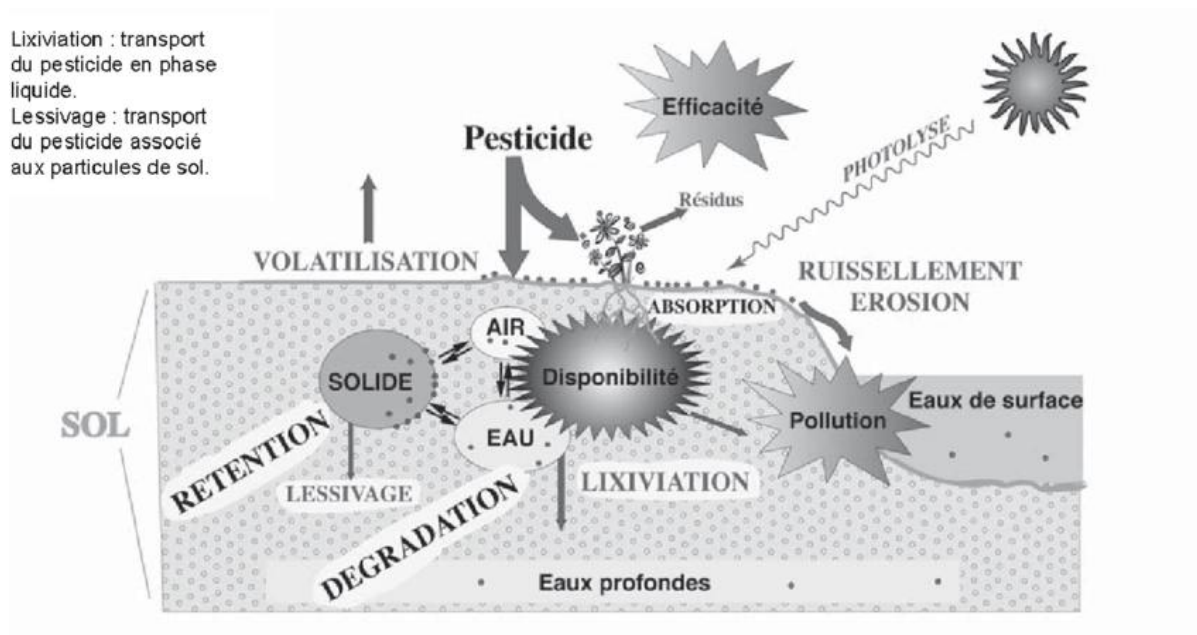


Figure 4 : Schéma conceptuel des voies d'évolution des pesticides (**Barriuso et al., 1996**).

a. Pollution de l'eau

Les effets des pesticides sur les systèmes aquatiques sont souvent analysés à l'aide de modèles de transport hydrologique pour étudier le mouvement et le devenir des produits chimiques dans les rivières et les ruisseaux. Des les années 1970, des analyses quantitatives de ruissellement de pesticides ont été menées afin de prévoir les quantités de pesticides susceptibles d'atteindre les eaux de surface (**Hoganet et al., 1973**).

Des résidus de pesticides peuvent également être retrouvés dans la pluie et dans les eaux souterraines (**Kellogg et Nehring, 2000**).

Les facteurs qui influencent la capacité d'un pesticide à contaminer l'eau comprennent sa solubilité dans l'eau, la distance séparant le site d'application, le type de sol, la présence d'une culture en cours de croissance et la méthode d'application utilisée (**Pedersen, 1997**).

La principale conséquence de la contamination des cours d'eau par les herbicides est l'apport d'éléments nutritifs en grande quantité, notamment du phosphore, créant un déséquilibre dans la croissance des végétaux marins (**Anonymous, 2006**). Il est bien connu par la communauté scientifique que le phosphore est, dans un cours d'eau sain, l'élément nutritif limitant (en plus faible quantité) empêchant aussi la prolifération des algues (**Olivier, 2007**). Un apport important de phosphore dans les cours d'eau rompt l'équilibre naturel, c'est l'eutrophisation. Les conséquences de l'eutrophisation des cours d'eau sont désastreuses. De plus, lorsque la DBO dans un milieu est supérieure à ce que le milieu peut fournir, il se crée le phénomène d'anoxie qui se traduit par une absence totale d'oxygène dissout dans le milieu. L'apport de phosphore en grande quantité entraîne donc l'eutrophisation des cours d'eau et mène à l'anoxie des milieux. En absence d'oxygène, la

vie aquatique n'est plus possible. Cependant, l'expérience a prouvé qu'un cours d'eau peut retrouver son état naturel dès la cessation d'un apport en phosphore (**Bernier, 2002**).

b. Pollution des sols

Les sols constituent un compartiment clé dans l'environnement, car ils sont un lieu de passage quasi-obligé de la contamination agricole lors de son transfert et ils jouent un rôle important dans son devenir. Le devenir de ces produits phytosanitaires dans le sol est variable en fonction de leur nature et de leur composition chimique et les risques pour l'environnement sont d'autant plus grands que ces produits sont toxiques, utilisés sur des surfaces et à des doses élevées et qu'ils sont persistants et mobiles dans les sols. Ainsi, ils sont soit dégradés par les micro-organismes, ou par hydrolyse, ou par les sédiments ou bien absorbés par les racines des plantes.

Lorsqu'un pesticide se dégrade, la minéralisation de celui-ci émet dans l'environnement des substances chimiques telles que l'acide chlorhydrique (HCL) dans le cas de composé chloré (**Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2000**). Or l'acide chlorhydrique est considéré comme un acide fort, sa libération dans l'environnement risque automatiquement d'induire une acidification du milieu. Ainsi, une acidification des sols se traduit généralement par un appauvrissement du milieu, soit la perte des minéraux nutritifs nécessaires à la végétation et donc à la culture agricole (**Plan Air-climat, 2009**). De plus, lorsque le PH d'un sol devient suffisamment bas (pH inférieur à 5,5) ; certains minéraux tels que l'aluminium, le cuivre ou le magnésium deviennent plus solubles et donc accessibles pour la végétation (**Institut français de la vigne et des vins, 2010**). Or ces minéraux sont toxiques et peuvent entraîner la mort des cultures (**Gouvernement du Canada, 2012**).

Après la minéralisation des herbicides dans le sol, il y a la formation des métabolites (produits de dégradation) et ces derniers présentent une toxicité pour l'environnement (**Mamy, 2012**). Il est donc important, de non seulement suivre l'évolution environnementale de l'herbicide, mais également de tous ses métabolites.

c. Pollution de l'air

Les pesticides peuvent contribuer à la pollution de l'air. La dérive des pesticides se produit lorsque ces derniers en suspension dans l'air sont sous forme de particules transportées par le vent vers d'autres zones pouvant potentiellement les contaminer (**Victoria Gouvernement, 2010**).

Les conditions météorologiques au moment de l'application ainsi que la température et l'humidité relative influencent la propagation du pesticide dans l'air. La dérive de pulvérisation et l'exposition augmentent lorsque la vitesse du vent s'accroît. Une faible humidité relative et une température élevée provoquent une augmentation de l'évaporation des produits pulvérisés (**Anonyme, 2008**).

Au cours du transport aérien, l'herbicide peut être dégradé par les rayonnements lumineux (**Anonyme, 2008**). L'herbicide est ramené au sol lors des précipitations,

entraînant ainsi la contamination de champs éloignés du lieu d'application (**Victoria Gouvernement, 2010**).

6.1. Effet sur la santé

Les pesticides sont connus pour tuer les organismes nuisibles, mais certains pesticides peuvent également avoir des effets néfastes sur la santé des humains. La probabilité de subir des effets néfastes sur la santé dépend du type de pesticide et des autres produits chimiques qu'il contient, de la quantité, de la durée et de la fréquence de l'exposition.

Les pesticides peuvent entrer dans l'organisme lors du mélange du produit, de son application ou de son nettoyage. Un produit ou une substance chimique peut pénétrer dans l'organisme soit par la peau (contact dermique), soit par les poumons (inhalation), ou bien par la bouche (ingestion) (**Centre Canadien d'hygiène et de Sécurité au travail, 2008**).

Cependant, les effets généraux sur la santé d'une exposition aiguë (court terme) ou d'une intoxication sont énumérés dans le tableau ci-après :

Tableau 6 : Les différents effets des herbicides sur la santé (Olivier, 2007).

Intoxication légère	Intoxication modérée	Intoxication grave
Un ou plusieurs des symptômes suivants : ● irritation des voies nasales, de la gorge, des yeux ou de la peau ● céphalées ● étourdissement ● perte d'appétit ● soif ● nausées ● diarrhée ● transpiration ● faiblesse ou fatigue ● agitation ● nervosité	Un ou plusieurs des symptômes d'intoxication légère et les symptômes suivants : ● vomissement ● salivation excessive ● toux ● sensation de constriction au niveau de la gorge et du thorax ● crampe abdominale ● vision trouble ● transpiration excessive ● confusion	Un ou plusieurs des symptômes d'intoxication légère, des symptômes d'intoxication modérée et les symptômes suivants : ● incapacité de respirer ● sécrétion abondante dans les voies respiratoires ● rétrécissement des pupilles ● brûlure chimique sur la peau ● perte de conscience ● mort

I.3/ Les bioherbicides

Les stratégies de lutte contre les mauvaises herbes/ adventices sont diverses, mais reposent essentiellement sur l'application de molécules herbicides d'origine chimique. L'usage intensif des herbicides de synthèse pendant les cinquante dernières années a induit un certain nombre d'impacts sur l'environnement (**Morales-Flores *et al.*, 2013**) et notamment sur l'eau. En France, **et d'après le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013)**, les 15 molécules chimiques provenant de produits phytopharmaceutiques les plus retrouvées dans les cours d'eau en 2011 étaient en majorité des herbicides ou leurs métabolites. L'emploi intensif des herbicides a aussi provoqué l'apparition d'individus résistants.

A l'heure actuelle, les bioherbicides constituent une nouvelle approche pour le contrôle durable des mauvaises herbes. Ces bioherbicides sont à base de diverses substances naturelles (champignons, bactéries, acides gras végétaux, etc). Ils seraient probablement biodégradables et peu toxiques, mais cela reste à étudier au cas par cas.

En 1971, un bioherbicide était défini comme une substance destinée à réduire la présence des mauvaises herbes et ne provoquant pas de dégradation de l'environnement (**Macro et al., 1971**). De nos jours, cette définition a évolué et d'après **Bailey (2014)**, les bioherbicides sont des produits d'origine naturelle ayant un pouvoir désherbant. Ces produits peuvent être soit des microorganismes, soit des dérivés d'organismes vivants comprenant entre autres les métabolites naturels que produisent ces organismes au cours de leur croissance et leur développement.

1) Principe d'action

Le principe d'action des bioherbicides est similaire aux mécanismes d'interactions hôtes/agents pathogènes et au phénomène d'allélopathie (**Bonin et al., 2014**). Dans le cas de l'interaction de type hôte/pathogène, l'agent de biocontrôle appliqué sur des adventices doit contourner les réactions de défense de la plante. La relation entre les deux individus doit être compatible pour que l'agent pathogène (ici l'agent de biocontrôle) soit capable d'infecter la plante cible (**Andanson, 2010**). Différents facteurs de virulence sont impliqués directement ou indirectement dans la maladie. Les premiers facteurs sont des enzymes qui dégradent les parois végétales (pectinases, cellulases, ligninases, etc.), les protéines et les membranes lipidiques (protéases, peptidases, amylases, phospholipases, etc.) facilitant l'entrée et/ou la dispersion des agents de biocontrôle dans la plante hôte (**Ghorbani et al., 2005**). Les seconds sont des toxines qui interfèrent avec le métabolisme du végétal en modifiant l'expression d'un gène conduisant à la mortalité du végétal. Les toxines interagissent avec un composé spécifique de la plante (enzyme, récepteur, etc.) donc, si ce composé est absent ou altéré, il n'y a pas d'effet toxique. Par conséquent, les toxines et/ou leurs cibles moléculaires sont des déterminants importants pour caractériser une gamme hôte-agent pathogène (**Hoagland et al., 2007**). Dans le cas du phénomène d'allélopathie, seules les molécules extraites de micro-organismes (champignons, bactéries, etc.) ou de plantes sont utilisées. Ce type de contrôle correspond au phénomène d'inhibition observable dans certaines parcelles. L'allélopathie se définit comme étant « un effet négatif de composés chimiques produits par le métabolisme secondaire des plantes ou de microorganismes (virus, champignons, bactéries, etc.) qui ont une influence sur la croissance et le développement des écosystèmes biologiques et agricoles (à l'exception des mammifères) » (**De Albuquerque et al., 2011**). L'exemple le plus connu est celui de la juglone produite par le noyer autour duquel peu de plantes peuvent pousser. Ces différents types d'action d'origine microbienne et végétale permettent de disposer d'une extraordinaire diversité de composés biochimiques pour agir sur un grand nombre de sites moléculaires cibles au niveau des adventices (**Duke et al., 1999**).

Selon la ressource biologique dont le bioherbicide est issu, l'efficacité de ce dernier va dépendre de la spécificité et de la virulence de l'agent de biocontrôle ou de la spécificité de

la molécule. Par ailleurs, il a été montré que l'action d'un bioherbicide est également dépendante de nombreux facteurs tels que la dose d'inoculum, le stade phénologique de la cible, les conditions environnementales dont l'hygrométrie (**Hallett, 2005 ; Ghorbani et al., 2006**). De nos jours, des molécules actives naturelles telles que la phosphinothricine, version biosynthétique du glufosinate, et le bialophos, produit phytotoxique microbien, ont permis de concevoir des herbicides commerciaux (**Duke et al., 1999**).

De plus en plus d'études sur les bioherbicides sont actuellement publiées. Malheureusement, la plupart n'investissent pas suffisamment dans la compréhension du mode d'action régissant l'interaction entre le micro-organisme ou la molécule et la plante cible, ni sur l'impact écotoxicologique du bioherbicide. Une telle connaissance permettrait pourtant d'optimiser les conditions d'application des bioherbicides et encouragerait leur utilisation.

Cependant, du point de vue réglementaire, il est préférable, mais pas obligatoire, de connaître le mode d'action pour homologuer un produit de type herbicide. À l'échelle mondiale, seule une douzaine de formulations commerciales de type bioherbicide à base de micro-organismes ou de molécules naturelles sont actuellement commercialisées.

2) Classification des bioherbicides

Les bioherbicides sont classés en deux catégories selon leur origine : les produits végétaux et les agents pathogènes (figure 5). Chaque catégorie comprend de multiples formes d'herbicides d'origine biologique.

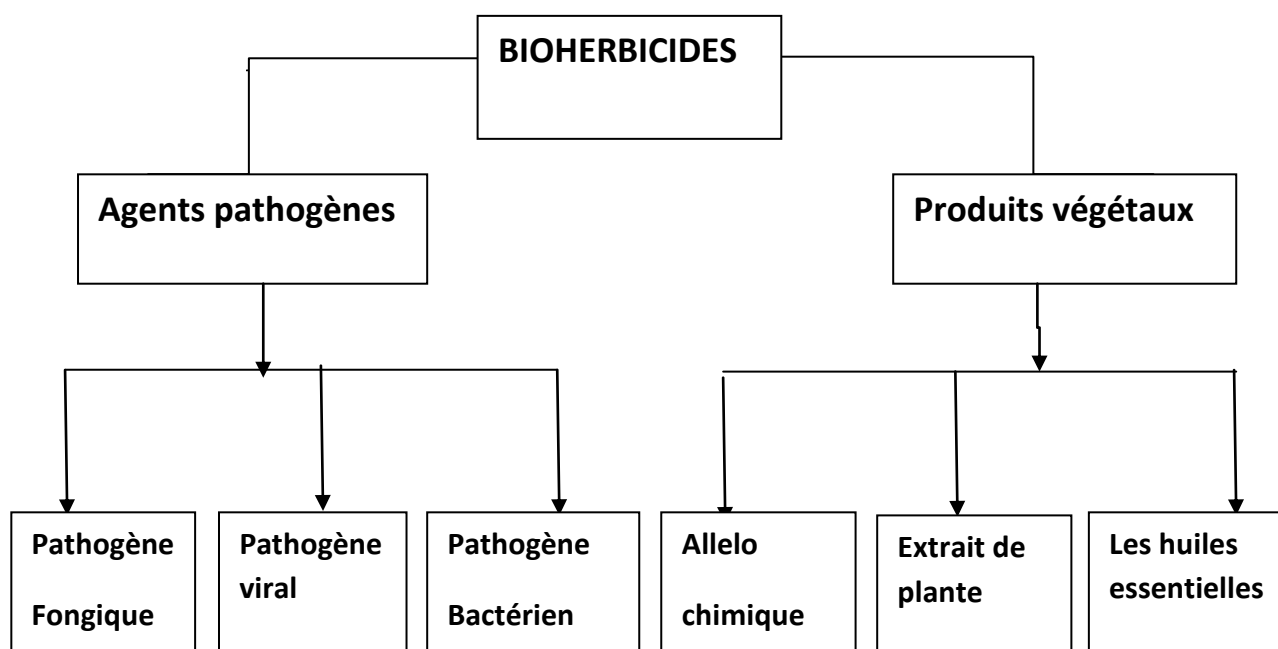


Figure 5 : Classification des bioherbicides (**Aldetal, 2003 ; Caldwell et al., 2012**).

2.1. Bioherbicides d'origine microbienne

L'idée d'utiliser des agents microbiens dans la lutte contre les mauvaises herbes remonte aux débuts des années 1900, mais leur utilisation a commencé après la seconde guerre mondiale (**Pacanoski, 2015**).

2.1.1. Les mycoherbicides

Les mycoherbicides sont des champignons utilisés comme herbicides. Ce sont les plus courants dans la lutte contre les mauvaises herbes. Les pathogènes fongiques constituent la solution de rechange la plus prometteuse aux herbicides chimiques de synthèse pour les systèmes de gestion des mauvaises herbes (**Évidente et Motta, 2001 ; Évidente et Abouzeid, 2006**). Le contrôle des mauvaises herbes par les agents pathogènes fongiques est basé sur leurs métabolites phytotoxiques qui inhibent les voies de pénétration des plantes et sont toxiques pour les cellules végétales des mauvaises herbes. *Alternaria*, *Ascochyta*, *Drechslera*, *phoma*, *phyllostictica*, *Pyrenophora*, *Septoria*, *Stagonospora* sont les pathogènes les plus courants pour le biocontrôle des mauvaises herbes comme *Chenopodium album* L., *Cirsium arvense* L., les graminées, etc. Les premiers herbicides fongiques sont légalement commercialisés au Canada en 1973.

Sclerotinia minor est le bioherbicide le plus efficace contre les pissenlits et les espèces de gazon en serre (**Watson et Bailey, 2013**), *S. minor* et *S. sclerotiorum* sont des agents phytotoxiques pour le chardon des champs (*Cirsium arvense*) (**Skipper et al., 2013**), le principal phytotoxique de ces deux champignons pathogènes étant l'acide oxalique. L'acide oxalique est l'inhibiteur du polyphénol oxydase (PPO), un inhibiteur des molécules de défense des plantes (**Macro et al., 1984**). Le tableau 7 illustre quelques exemples de mycoherbicides et leurs cibles.

Tableau 7 : Pathogènes fongiques et mauvaises herbes ciblées.

Agents bioherbicides fongiques	Mauvaises herbes ciblées	Références
<i>Phomopsis amaranthicola</i>	<i>Amaranthus</i> species	Roskopf et al., (2005)
<i>Dactylaria higginsii</i>	<i>Cyperus rotundus</i>	Kadir et Charudattan (1999)
<i>Phoma macrostoma</i>	Dicot plants	Bailey et al., (2011)
<i>Phoma exigua</i>	<i>Gautheria shallon</i>	Zhao et Sharma (2006)
<i>Uromyces scutellatus</i>	<i>Euphorbia esula/virgata</i>	Caesar (2006)
<i>Uromyces pennisylvaticus</i>	<i>Nasella arvensis</i>	Anderson et al., (2010)
<i>Plectosporium tabacinum</i>	<i>Gallium spurium</i>	Zhang et al., (2002)
<i>Ascochyta caulina</i>	<i>Chenopodium album</i>	Ghorbani et al., (2002)
<i>Fusarium mycelium</i>	<i>Cannabis sativa</i>	Tiourebaev et al., (2001)

2.1.2. Les virus comme bioherbicides

Les virus peuvent également être utilisés comme bioherbicides pour lutter contre certaines mauvaises herbes, mais en raison de certaines contraintes, ils ne sont pas efficaces comme les mycoherbicides. En effet, les virus présentent une grande variabilité génétique et ne sont pas spécifiques à une cible (**Kazinczu et al., 2006**). Les agents

pathogènes viraux pour la lutte contre les mauvaises herbes sont décrits dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Pathogènes viraux et mauvaises herbes ciblées.

Agents bioherbicides viraux	Mauvaises herbes ciblées	Références
<i>Araujia virus de la mosaïque</i>	<i>Araujia hortorum</i>	Elliott <i>et al.</i> , 2009
<i>Tobacco Rattle Virus</i>	<i>Impatiens glandulifera</i>	Kollmann <i>et al.</i> , 2007
<i>Tobacco mosaic virus</i>	<i>Solanum viarum</i>	Farrel <i>et al.</i> , 2008
<i>Óbuda Pepper Virus (ObPV)</i> et <i>Pepino Mosaic Virus (PepMV)</i>	<i>Solanum nigrum</i>	Kazinczi <i>et al.</i> , 2006

2.1.3. Les bactéries comme bioherbicides

Il a été prouvé que de nombreuses bactéries peuvent servir d'agents de lutte biologique contre les mauvaises herbes en raison de certaines caractéristiques comme les cultures de croissance qui peuvent être maintenues dans un liquide, préparées sous forme de formulation sèche et modifiées génétiquement pour améliorer leur bioefficacité (figure 6).

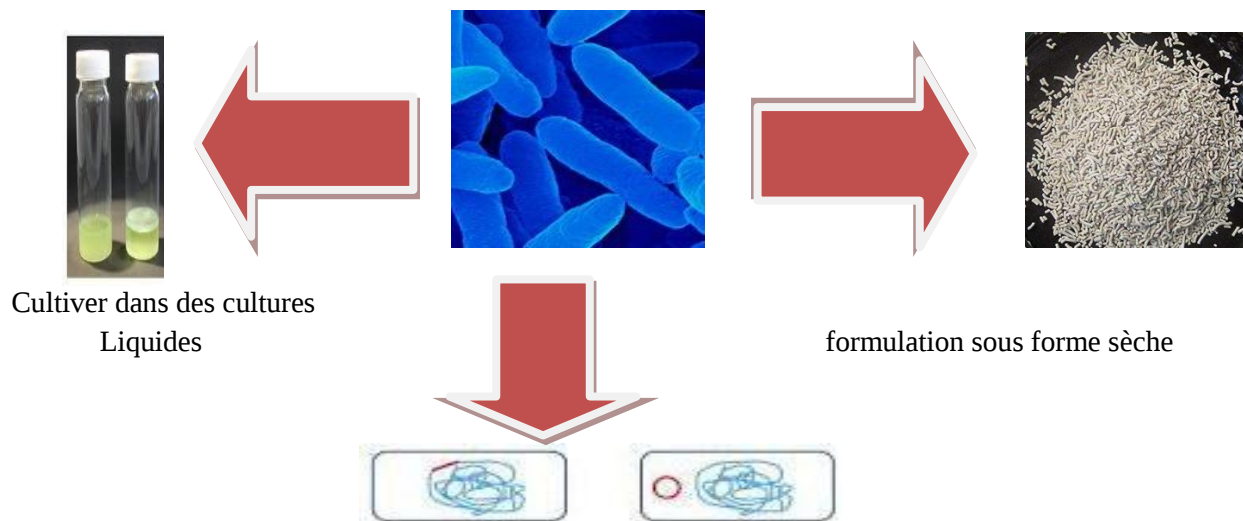


Figure 6 : Caractéristiques des bactéries en tant que bioherbicides potentiels (Nusrat et Amrisha Agrawal, 2018)

De nombreuses études de manipulation génétique ont prouvé que *Pseudomonas fluorescens* et *Xanthomonas campestris* sont les espèces bactériennes les plus populaires pour le contrôle des mauvaises herbes. Ainsi, *Pseudomonas fluorescens* a la capacité de supprimer la germination des plantes adventices qui comprennent 8 espèces de dicotylédones et 21 espèces de monocotylédones (Banowitz *et al.*, 2008). *Xanthomonas*

campestris est l'autre espèce bactérienne utilisée comme agent de lutte contre les mauvaises herbes pour le pâturin annuel (*Poa annua*) de la marque Camperico (Imaizumi *et al.*, 1997 ; Tateno, 2000). Le tableau suivant présente quelques exemples d'adventices contrôlées par des bactéries.

Tableau 9 : Différentes mauvaises herbes contrôlées par des pathogènes bactériens.

Agents bioherbicides bactériens	Le contrôle des mauvaises herbes ciblées	Références
<i>Pseudomonas fluorescens</i> strain BRG100	<i>Setaria viridis</i>	Quail <i>et al.</i> , (2002)
<i>Pseudomonas fluorescens</i> strain D7	<i>Bromus tectorum</i>	Kennedy <i>et al.</i> , (1991).
<i>Xanthomonas campestris</i>	<i>Poa annua</i>	Imaizumi <i>et al.</i> , (1997) et Tateno, (2000).
<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	General vegetation	Rupp <i>et al.</i> , (1977).
<i>Ralstonia solanacearum</i>	<i>Solanum nigrum</i>	De Valerio <i>et al.</i> , 2011.

Le mode d'action des bioherbicides microbiens est représenté dans la figure suivante.

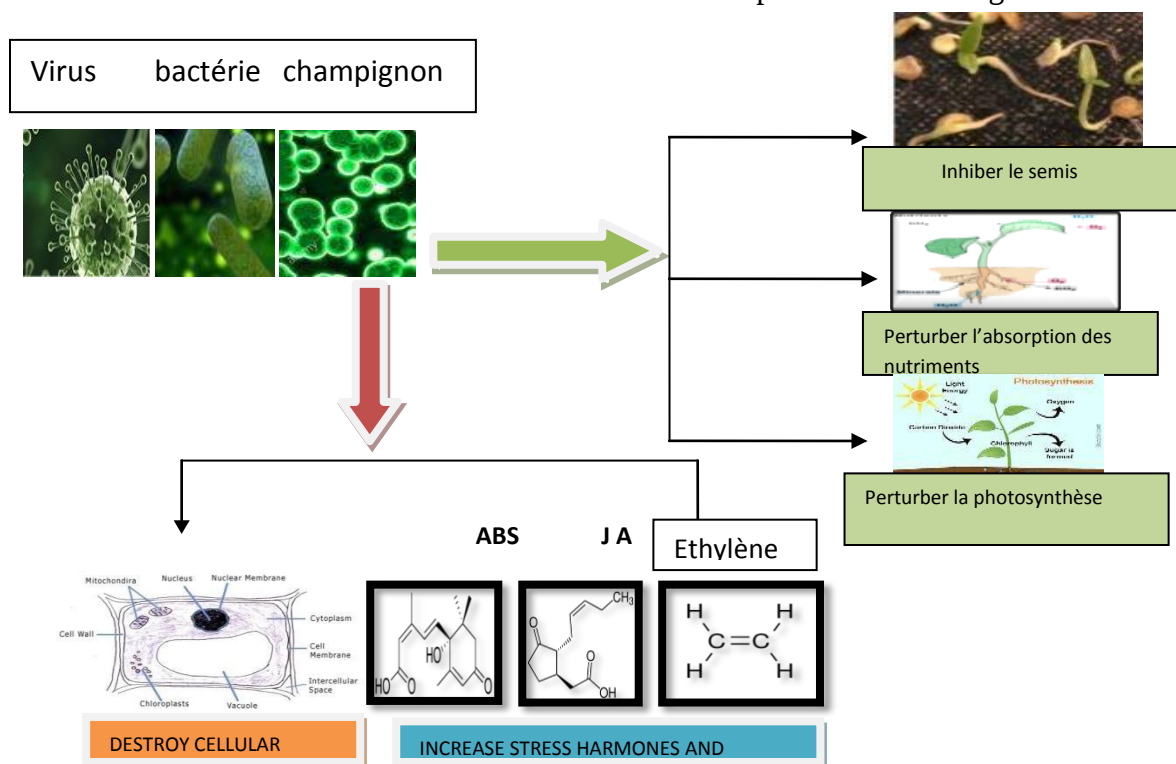


Figure 7 : Modes d'action des bioherbicides microbiens (Imaizumi *et al.*, 1997; Tateno, 2000).

2.2. Bioherbicides d'origine végétale

Les produits végétaux peuvent être utilisés comme agents de lutte contre les mauvaises herbes sous trois formes : l'extrait de plantes, l'huile essentielle et les produits allélochimique. Ces trois produits végétaux sont utilisés comme bioherbicide potentiel depuis de nombreuses décennies. Le principal mode d'action des produits à base de plantes est l'inhibition de la germination des mauvaises herbes et la réduction de la croissance des plantes. Les extraits de plantes de n'importe quelle partie de la plante sont susceptibles de contenir divers types de substances naturelles bioactives : les peptides, les alcaloïdes, les terpénoïdes, les composés phénoliques, etc. (Boger et Sandmann, 1989), (figure 8).

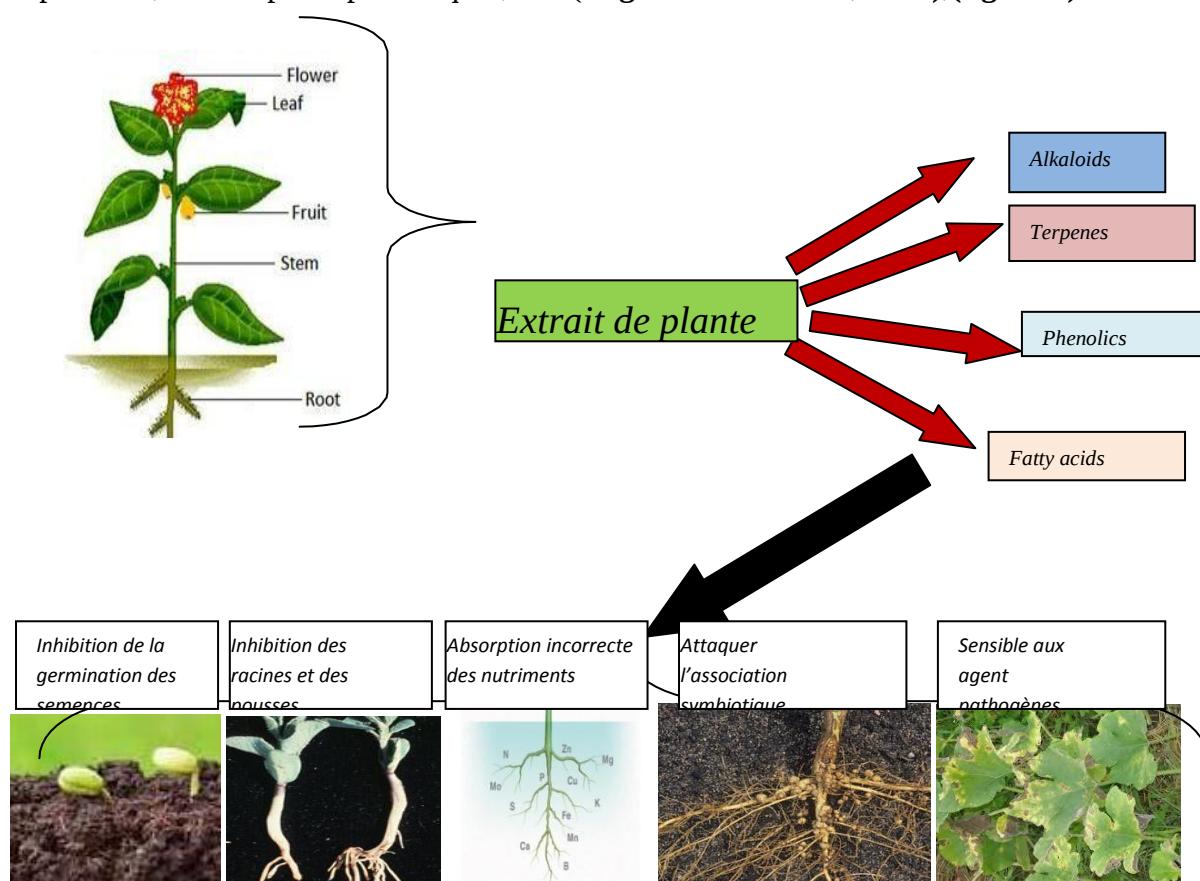


Figure 8 : Mode d'action des produits végétaux comme agents de lutte contre les mauvaises herbes (Boger et Sandmann, 1989).

2.2.1. Les extraits bruts

De nature divers (alcaloïdes, polyphénols), ces extraits sont obtenus notamment par extraction avec un solvant organique, habituellement alcoolique, ou avec de l'eau distillée, après évaporation du solvant, le marc obtenu est utilisé pour formulation du phytoherbicide (Falleh *et al.*, 2011).

Les polyphénols représentent un groupe important et diversifié de substances présentes en abondance dans la majorité des fruits, des herbes et des légumes (Falleh *et al.*, 2008). Ces composés jouent un rôle important dans les mécanismes de défense des plantes contre

les stress biotique et abiotique. En effet, certaines espèces végétales produisent des composés phénoliques pour inhiber la croissance d'autres plantes concurrentes. Ces composés jouent le rôle d'allélochimiques.

Ces molécules sont largement répandues dans les feuilles, les tiges, les graines et les fruits de nombreuses plantes comestibles (**Falleh et al., 2011**).

2.2.2. Les huiles essentielles

Une variété de composés d'allélochimiques a été identifiée, y compris les huiles essentielles, qui sont des composés volatils, naturels et complexes (allant de 20 à 60 molécules différents). Caractérisés par une forte odeur, elles sont formées par les plantes aromatiques comme métabolites secondaires. Elles sont obtenues des plantes, par distillation à la vapeur (**Koul et al., 2008**).

Plusieurs espèces produisent des huiles essentielles contenant des composés pouvant agir comme des herbicides naturels. Les huiles essentielles inhibent la germination des graines et la croissance des plantes. En particulier, de nombreuses espèces libèrent des monoterpènes phytotoxiques qui entravent le développement d'espèces herbacées (**Greene, 1882**).

2.2.3. Les poudres végétales

Une forme naturelle efficace et respectueuse de l'environnement aux effets allélopathique et phytotoxique qui contrôlent les mauvaises herbes (**El-Rokiek et al., 2019**) par la suppression de la germination et la croissance des pousses des adventices.

3) Formulation des phytoherbicides

Une formulation satisfaisante de tout produit a idéalement une longue durée de conservation, une relative facilité et un faible coût. La forme adoptée dans la formulation d'un bioherbicide diffère selon sa nature (micro-organisme ou principe actif chimique). Ainsi, de nombreux champignons peuvent être conservés sous forme de préparations séchées pendant un à deux ans avant d'être utilisées. Le développement des formulations a suivi deux voies principales, soit sous forme de sprays liquides, soit sous forme de particules solides (**Bouette et al., 1993**).

3.1. Formulations solides

Plusieurs types de céréales ont été utilisés comme milieu de culture pour les champignons et comme matériel d'application pour les bioherbicides. Il s'agit notamment, du riz (**Bouette et al., 1993**), de l'orge (**Vogelgsang et al., 1995**) et du blé (**Bourdot et al., 1995 ; Morris et al., 1999**). Après une période d'incubation, le grain colonisé est séché et généralement finement moulu pour l'application.

Walker et Connick (1983) ont développé une méthode élégante d'encapsulation des champignons bioherbicide dans l'alginate de calcium. Les propagules fongiques sont placées dans une solution d'alginate de sodium et cette suspension est ajoutée goutte à

goutte à une solution de chlorure de calcium, les billes d'alginate de calcium qui se forment avec chaque goutte contiennent des propagules fongiques. Une fois séchées, ces perles peuvent être utilisées comme matériel d'application ou comme support pour la production de spores destinées à être utilisées dans une autre formulation.

Une autre formulation solide utilisant de l'amidon absorbant l'eau, de l'huile de maïs, du saccharose en poudre et de la silice hydratée, a été décrite par **(Qimby et al., 1991)** et est appelée procédé « stableze ». **Chittick et al. (2003)** ont signalé un procédé de séchage par pulvérisation pour encapsuler les fragments hyphaliques d'un champignon *Phomopsis* sp. pour la lutte contre le chardon safran (*Carthamus lanatus* L.).

Les formulations solides peuvent avoir leur place dans la lutte contre les mauvaises herbes dans les pâturages, les parcours et les écosystèmes naturels où un contrôle immédiat des mauvaises herbes n'est généralement pas nécessaire **(Bourdote et al., 1995)**.

3.2. Formulations liquides

Les formulations liquides de bioherbicides les plus simples sont des suspensions aqueuses de spores souvent avec une petite quantité d'agent mouillant (par exemple 0,1% v/v) comme le tween 20 (monolaurate de polyoxyéthylène sorbitan) **Quimby et al., (1998)**.

Elles sont généralement utilisées comme normes pour comparer des formulations plus complexes, cependant, dans des conditions idéales pour une infection fongique, des suspensions aqueuses simples peuvent être efficaces sur le terrain **(Auld et al., 1990)**.

Les agents mouillants tels que le Tweens® facilitent l'étalement sur les surfaces foliaires et les copolymères silicon-polyester tels que le Silwet L-77 favorisent la pénétration des stomates et des lenticelles par les (petites) spores bactériennes. Cependant, en diminuant la tension de surface des suspensions appliquées, les agents mouillants auront tendance à augmenter le taux d'évaporation de l'eau **(Gabriel, 1991)**.

3.3. Emulsions simples

Des émulsions simples d'huile végétale (contenant 10% d'huile et 1% d'un agent émulsifiant) se sont révélées prometteuses pour réduire la dépendance à la rosée dans des études en environnement contrôlé **(Auld 1993)**. **Zhang et Watson (1997)** ont utilisé une version modifiée de ce type d'émulsion en ajoutant 1% (p/v) de dextrose et 0,2% (p/v) de carboxyméthylcellulose à la phase huileuse. Ils ont obtenu une mortalité de plus de 90% chez les herbes d'étable (*Echinochloa* spp.) pulvérisées avec *Exserohilum monoceras* (DrechsK.). Le mécanisme par lequel de simples émulsions peuvent réduire la dépendance à la rosée n'est pas clair. **(Greaves et al., 2001)** suggèrent que des émulsions inversées se forment à la surface des feuilles et aussi lorsque l'huile pénètre dans le tissu foliaire et se mélangent aux composants aqueux du tissu foliaire.

3.4. Emulsions inversées

Les émulsions inversées consistent en une phase huileuse continue qui contient des gouttelettes d'eau. Le potentiel de ce type de formulation pour réduire l'évaporation des

bioherbicides a été reconnu pour la première fois par **Quimby *et al.*, (1998)**. Il a été démontré que ces formulations permettent de surmonter les besoins en rosées et de réduire les concentrations des spores requises (**Amsellem *et al.*, 1990 ; Boyette *et al.*, 1993 ; Womack *et al.*, 1996**). Toutefois, ce type de formulation présente un certain nombre d'inconvénients, entre autres, la forte teneur en huile susceptible de produire des effets phytotoxiques sur les plantes non visées (**Quimby *et al.*, 1998**).

3.5. Formulations spécifiques

Dans certaines circonstances, les formulations uniques peuvent être requises. Par exemple, des formulations flottantes pour les mauvaises herbes aquatiques ou les mauvaises herbes dans le riz. **Gohbara et Tsukamoto (1999)** ont révélé une formulation flottante dans laquelle des micro-organismes sont enrobés d'une émulsion inversée et d'un enrobage supplémentaire de poudre à faible densité apparente. Des formulations dispersables peuvent être réalisées en combinant le NaHCO_3 avec de l'acide citrique (2 :1 p/p) et en le mélangeant avec des spores dans une suspension aqueuse concentrée et une huile végétale contenant un agent tensioactif lipophile.

4) Limitation des bioherbicides

4.1. Limitation environnementale

Les facteurs environnementaux influencent la performance de la formulation des bioherbicides car la production d'inoculum dépend de la sporulation de la formulation. Lors de l'application de bioherbicide, les conditions environnementales prévalant dans la phyllosphère des plantes sont souvent hostiles aux agents de lutte biologiques (**Kenerley et Andrews, 1992**).

4.2. Limitation biologique

Il est souhaitable qu'un bioherbicide agisse relativement rapidement et soit suffisamment efficace pour lutter contre les mauvaises herbes. Malheureusement, de nombreux agents pathogènes découverts ne permettent de lutter que partiellement contre une seule espèce de mauvaise herbe, même dans des conditions idéales (**Charudattan, 2005**). La spécificité de l'hôte est liée à la biologie fondamentale de l'agent pathogène de l'hôte (**Leonard, 1982 ; Gabriel, 1991**). Les contraintes biologiques comprennent également la variabilité et la résistance de l'hôte (**Auld, 2003**).

4.3. Limitations technologique et commerciale

Plusieurs limites technologiques qui pourraient empêcher l'utilisation généralisée des bioherbicides ont été identifiées.

La souche pathogène, la méthode de formulation et l'interaction de ces deux paramètres ont une incidence significative sur la durée de conservation des formulations à température ambiante (**Altman *et al.*, 1990 ; Hebbar *et al.*, 1998**).

L'aspect le plus difficile de la formulation des bioherbicides est de surmonter le problème de la déshydratation qui existe pour plusieurs d'entre eux.

II. Travaux antérieurs sur les phytoherbicides :

(Activité phytoherbicide des substances d'origine végétale)

1/ Les huiles essentielles

Les bioherbicides, notamment ceux d'origine végétale, constitueraient une solution alternative prometteuse en matière de lutte biologique contre les mauvaises herbes. Parmi ces ressources naturelles, les huiles essentielles ou certains de leurs composants présentent un potentiel herbicide remarquable, susceptible d'être exploité dans le développement d'herbicides naturels.

Les huiles essentielles constituent la source principale des produits végétaux à potentiel herbicide. Ces substances ont fait objet de nombreux travaux de recherche, réalisés *in vitro* et en plein champs. Dans ce qui suit, les résultats de quelques études évaluant le potentiel herbicides des HEs extraites à partir de différentes espèces végétales sont rapportés.

La phytotoxicité de dix-neuf (19) composants majeurs d'huiles essentielles a été déterminée par **Vasilakoglou et al., (2013)** à l'aide d'un essai biologique à base de perlite avec du ray-grass rigide (*Lolium rigidum* Gaudin). Ainsi, la germination et la longueur des racines du ray-grass rigide sous différentes concentrations de trans-anéthol, thymol, linalol, carvacrol, carvone, fenchone, thuyone, eugénol, trans-2-décénal, décanal, estragole, cinnamate de méthyle, eucalyptol, ocimène, limonène, myrcène, alpha-pinène, bêta-pinène ou p-cymène ont été comparées. En outre, la synergie ou l'antagonisme possible entre ces composants a été étudié. Les effets de réponse aux doses phytotoxiques des composants des huiles essentielles ont été évalués par la méthode d'évaluation Whole-range. Le carvacrol, la carvone, le thymol, le trans-anéthol et le linalol étaient les composants les plus phytotoxiques inhibant complètement la germination du ray-grass rigide et la longueur des racines à 160 nL / cm³ ou plus. La fenchone, l'estragole, la thuyone, l'eugénol et le trans-2-décénal ont fourni une inhibition intermédiaire tandis que le myrcène, le bêta-pinène, l'alpha-pinène, le limonène, l'ocimène et le p-cymène étaient légèrement phytotoxiques. Une synergie entre le carvacrol, le thymol, le trans-anéthol ou le linalol avec la carvone, la thuyone, la fenchone, l'eugénol ou l'eucalyptol a également été observée. Les résultats ont indiqué que les huiles essentielles contenant une concentration élevée des composants spécifiques évalués tels que le carvacrol, la carvone, le thymol, le trans-anéthol ou le linalol, pourraient être utilisées à l'avenir comme herbicides naturels dans le développement de nouvelles stratégies de lutte contre les mauvaises herbes. L'activité de ces composants pourrait être encore améliorée en raison de la synergie avec moins de composants phytotoxiques.

Dudai et al., (1999) ont étudié les propriétés allélopathiques de 32 huiles essentielles extraites de plantes aromatiques. Les extraits d'*Origanum syriacum*, de *Micromeria fruticosa* et de *Cymbopogon citratus* ont été sélectionnés pour une étude plus approfondie. La germination de plusieurs espèces, y compris le blé, était fortement inhibée par les huiles essentielles lorsqu'elles étaient appliquées à 20–80 ppm. Les huiles essentielles mélangées avec les premiers 0,5 cm de sol, ont inhibé la germination du blé et des graines d'*Amaranthus*. De plus, cet effet dépendait du type de sol.

Fraternale et al., (2015) ont testé «*in vitro*» l'huile italienne d'estragon (*Artemisia dracunculus* L.) pour son activité antigerminante contre les graines de *Raphanus sativus* L., *Lepidium sativum* L., *Papaver rhoeas* L. et *Avena fatua* L. et ont démontré une bonne activité inhibitrice dose-dépendante.

Koïou et al., (2020) ont déterminé la phytotoxicité de dix (10) composants majeurs de l'huile essentielle de lavande (*Lavandula angustifolia* Mill.) sur les espèces de mauvaises herbes sétaire hérissée (*Setaria verticillata* L. P. Beauv.), à l'aide d'un essai biologique sur boîte de Pétri à base de perlite. Leur phytotoxicité a également été comparée à celle des principes actifs d'huiles essentielles phytotoxiques bien connues (carvacrol, thymol, carvone et eugénol) d'origan (*Origanum vulgare* L.) et d'huiles essentielles de girofle (*Syzygium aromaticum* L. Merr. & L. M. Perry). Les effets synergiques ou antagonistes potentiels entre le carvacrol ou l'eugénol avec d'autres composants de l'huile essentielle de lavande ont été étudiés. En ce qui concerne les composants les plus phytotoxiques, le terpinen-4-ol à 80 nL / cm³ a complètement inhibé la germination et la longueur des racines de la sétaire hérissée, affichant une phytotoxicité similaire à la carvone et au thymol. Comme le carvacrol, le lavandulol et l'acétate de linalyle ont provoqué la germination totale (100%) et la réduction de la longueur des racines de la sétaire hérissée à 160 nL / cm³ tandis que le même effet a été obtenu par l'acétate de lavandulyle à 320 nL / cm³. Un effet synergique a également été observé lorsque le carvacrol ou l'eugénol étaient associés à l'ocimène, la 3-octanone, l' α -terpinéol ou le terpinen-4-ol. En se concentrant sur le développement de stratégies alternatives de lutte contre les mauvaises herbes, les huiles essentielles de lavande contenant de fortes concentrations de terpinen-4-ol, de lavandulol ou d'acétate de linalyle pourraient être utiles pour la production d'herbicides naturels. Ces composants d'huile essentielle combinés à des composants d'huile essentielle d'origan ou de clou de girofle sélectionnés, augmentent la phytotoxicité et la lutte contre les mauvaises herbes en raison de l'effet synergique observé en mélange.

Ibáñez et Blázquez (2019) ont évalués les effets phytotoxiques d'*Eucalyptus citriodora*, *Lavandula angustifolia* et *Pinus sylvestris*, trois huiles essentielles commerciales courantes, sur les mauvaises herbes (*Portulaca oleracea*, *Lolium multiflorum* et *Echinochloa crus-galli*), les cultures vivrières (tomate et concombre). et l'espèce envahissante *Nicotiana glauca*. Les huiles essentielles ont été testées à différentes concentrations (0,125-1 μ L / mL). L'indice de germination et les données de longueur des semis ont été enregistrés sur 14 jours. Les tests *in vitro* ont montré que *L. angustifolia* avec le linalol ($38,7 \pm 0,1\%$), le 1,8-cinéole ($26,5 \pm 0,1\%$) et le camphre ($14,2 \pm 0,1\%$) comme principaux composés présentaient les effets les plus phytotoxiques affectant la germination des graines dans les mauvaises herbes et la tomate, et les espèces envahissantes susmentionnées. *L. multiflorum* était la mauvaise herbe la plus sensible, en particulier à l'huile essentielle de lavande, qui a diminué la croissance de son hypocotyle et de sa racine de 87,8% et 76,7%, respectivement, à une dose de 1 μ L / mL. Le concombre était la culture vivrière la plus résistante, sans réduction significative observée de la germination des graines et de la croissance de l'hypocotyle avec les huiles essentielles d'*E. Citriodora* et de *L. angustifolia*.

L'activité phytotoxique de l'huile essentielle des parties aériennes d'*Origanum acutidens* et de ses constituants monoterpéniques aromatiques, le carvacrol, le p-cymène et le thymol ont également été déterminés. L'huile, le carvacrol et le thymol ont complètement inhibé la germination des graines et la croissance des plantules d'*Amaranthus retroflexus*, *Chenopodium album* et *Rumex crispus* et ont également montré un puissant effet phytotoxique contre ces plantes. Cependant, le p-cymène n'a montré aucun effet phytotoxique. Les résultats suggèrent que les propriétés herbicides de l'huile peuvent être attribuées à son composant principal, le carvacrol, et que ces agents pourraient être utilisés comme herbicide (**Kordali et al., 2008**).

Douze huiles (12) essentielles de plantes aromatiques méditerranéennes ont été testées pour leur activité phytotoxique à différentes doses contre la germination et la croissance radiculaire initiale des graines de *Raphanus sativus*, *Lactuca sativa* et *Lepidium sativum*. Les huiles essentielles ont été obtenues par hydrodistillation d'espèces végétales récoltées en pleine floraison, "*Hyssopus officinalis*, *Lavandula angustifolia*, *Majorana hortensis*, *Melissa officinalis*, *Ocimum basilicum*, *Origanum vulgare*, *Salvia officinalis* et *Thymus vulgaris* (Lamiaceae), *Verbena officinalis* (Verbenaceae), *Pimpinella anisum*, *Foeniculum vulgare* et *Carum carvi* (Apiaceae)". Un essai biologique basé sur la germination et la croissance ultérieure des radicules a été utilisé pour étudier les effets phytotoxiques de ces huiles essentielles sur les graines de *Raphanus sativus*, *Lactuca sativa* et *Lepidium sativum*. La germination et la croissance radiculaire des graines testées ont été affectées de différentes manières par les huiles. Les huiles essentielles de thym, de baume, de verveine et de carvi étaient plus actives contre la germination et l'allongement des radicules. Une forte présence de monoterpènes oxygénés est liée à une puissante activité phytotoxique (**De Almeida et al., 2010**).

L'effet phytotoxique des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* L. et *Ocimum basilicum* L. ssp. *Basilicum* contre la germination des graines et la croissance des plantules de *Portulaca oleracea*, *Lolium multiflorum* et *Echinochloa crus-galli* ont été étudiés. L'huile essentielle de romarin a inhibé de manière significative la germination des graines de *L. multiflorum* et *E. crus-galli* et la croissance des plantules des trois mauvaises herbes tandis que l'huile essentielle de basilic n'a montré que des effets significatifs sur l'hypocotyle et / ou la longueur de la radicule en fonction de la mauvaise herbe et de la dose (**Ibáñez et Blázquez, 2018**).

Ben kaab et al. (2020) ont montré que l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* ralentissait la croissance des plantules de *Trifolium incarnatum*, *Silybum marianum* et *Phalaris minor* tout en inhibant complètement la germination des graines à une dose de 5 mM.

Les activités herbicides des composés volatils d'origine végétale (*Ocimum basilicum* L., *Salvia officinalis* L., *Lavandula angustifolia* Mill., *Melissa officinalis* L. et *Thymus vulgaris*) ont été étudiés contre 3 mauvaises herbes (*Xanthium strumarium* L., *Avena sterilis* L. et *Phalaris brachystachys* L.). Chaque huile essentielle a été appliquée aux

concentrations de 2, 4, 8, 16 et 32 μ L sur le filtre papier en haut des boîtes de Pétri pour déterminer la germination et la croissance « essais biologiques ». Le taux d'inhibition des huiles essentielles a été dose dépendant. L'huile essentielle de *T. vulgaris* a montré l'effet inhibiteur le plus élevé sur la germination de *X. strumarium* et *A. sterilis* tandis que l'huile essentielle d'*O. basilicum* s'est révélée plus efficace contre *P. brachystachys* (Uremis et al., 2009).

Moussaoui et al. (2017) ont évalué le potentiel allélopathique des bioproduits formulés à base d'huiles essentielles de *Pistacia lentiscus* (L., 1753) et de *Cupressus arizonica* (Greene, 1882), en termes de réduction et/ou blocage de la capacité germinative des plantes adventices dans les conditions naturelles. L'efficacité temporelle des bioherbicides formulés a été estimée par l'évaluation des taux de germination du réservoir adventice d'une jachère non travaillée. L'huile essentielle est extraite par hydrodistillation à partir de feuilles de *P. lentiscus* et de *C. arizonica*. Après formulation, trois doses ont été préconisées (dose faible D1=0,1g/l, dose moyenne D2=0,2g/l et dose forte D3=0,3g/l), par pulvérisation sur un sol non travaillé. Les traitements ont été comparés à un témoin (formulation sans matière active) dans le but de mettre en évidence la capacité de la formulation à sécuriser et optimiser l'activité allélopathique des huiles essentielles testées. Les résultats ont montré que les différentes concentrations des deux bioherbicides ont un effet très significatif sur le taux de germination des adventices par comparaison au témoin. L'effet allélopathique a enregistré une dégradation temporelle positive suivant la concentration du principe actif D1 < D2 < D3. Cependant, En revanche, le bioherbicide formulé à base de l'huile essentielle de *Cupressus arizonica* s'avère plus efficace à l'encontre de la capacité germinative des adventices par rapport au bioherbicide formulé à base de l'huile essentielle de *Pistacia lentiscus*. La formulation a permis la sécurisation du principe actif et la réduction des doses sans réduire l'activité allélopathique des bioproduits formulés à base des huiles essentielles de *P. lentiscus* et de *C. arizonica*. Il semble donc que ce type de formulation permettra d'assurer une lutte optimale contre les adventices tout en diminuant l'épandage de matières actives de synthèse dans l'environnement et pourrait même retarder l'émergence des espèces végétales résistantes au traitement herbicide.

Les huiles essentielles (HE) montrent une grande variabilité dans l'efficacité de la lutte contre les mauvaises herbes, fortement dépendant de l'espèce végétale et de l'effet de chaque composant d'huile essentielle sur la germination et la croissance initiale d'un large éventail de mauvaises herbes nuisibles. Cependant, les effets synergiques ou antagonistes potentiels des constituants d'huile essentielle n'ont pas été largement étudiés (Vasilakoglou et al., 2013). En outre, ces huiles doivent être formulées de la même manière et étudiées dans des conditions de terrain afin de déterminer si elles représentent une approche alternative à la lutte contre les mauvaises herbes (Fraternali et al., 2015).

Par ailleurs, il est bien connu que les HE font face à une baisse d'efficacité lorsqu'ils sont utilisés bruts dans les champs, principalement en raison de leur volatilité et dégradabilité. L'encapsulation est une bonne solution aux problèmes de dégradation et de perte d'activité des composés bioactifs contenus dans l'HE, comme elle permet une libération contrôlée en fonction du site et du temps (Capelezzo et al., 2018).

Notons que certaines HEs ont déjà été commercialisées et lancées avec succès dans l'agriculture biologique aux états-Unis. Ils perturbent la cuticule et contribuent à la dessiccation et la brûlure des tissus jeunes. Citons comme exemples : le bioherbicide disponible sous le nom commercial de GreenMatch EX, et constitué d'huiles de citronnelle (*Cymbopogon sp.*) et l'Interceptor™ contenant 10% d'huile de pin (*Pinus sylvestris* L.) (Soltys *et al.*, 2013). En ce qui concerne l'Europe, aucune huile essentielle n'a été commercialisée en tant que bioherbicide. Il y'a seulement des HE commercialisées en tant qu'insecticides ou fongicides (Ben kaab, 2020).

2/ Les poudres végétales

Nous évoquons dans ce qui suit, les résultats de quelques travaux ayant investigué l'activité phytoherbicide de poudres végétales.

La poudre de graines de pois a été testée à travers deux des expériences successives en serre, pour déterminer son effet phytotoxique sur deux mauvaises herbes du blé infesté de blettes (feuilles larges) et d'alpiste (herbe à poux). La poudre de graines de pois a été ajoutée à la surface du sol à des taux successifs de 20, 40, 60, 80 et 100 g / pot. Les pots ont été cultivés à temps (lors du semis) ou 1 semaine après l'ajout de la poudre de graines de pois. Les résultats ont indiqué que la poudre de graines de pois à 100 g / pot supprimait plus de 70 à 80% des deux mauvaises herbes par rapport aux contrôles correspondants. D'autre part, l'effet inhibiteur de la poudre de graines de pois sur les mauvaises herbes étaient accompagné d'une augmentation de la croissance ainsi que de la teneur en pigments photosynthétiques et par conséquent rendement en blé, notamment à 80 g / pot. Cette étude de El-Rokiek *et al.* (2019) suggère que la poudre de graines de pois a des effets allélopathiques et phytotoxiques qui contrôlent les mauvaises herbes du blé. L'analyse de la poudre de graines de pois allélopathique aux doses appliquées, a révélé la présence de composés phénoliques et de flavonoïdes. Les deux composés allélopathiques ont montré des niveaux élevés avec une augmentation du taux de poudre de graines de pois. Le mélange de poudre de graines de pois avec la surface du sol à 80 g / pot 1 semaine avant le semis était le traitement le plus efficace pour lutter contre les mauvaises herbes qui ont par conséquent, atteint le rendement du blé.

Uddin *et al.* (2014) ont mis en évidence une formulation d'un bioherbicide (poudre) à base du sorgoleone extrait du *Sorghum bicolor*. Cette formulation a présenté un effet herbicide en pré-émergence et post-émergence. La sorgoléone allélochimique, un composant majeur des exsudats hydrophobes des racines de *Sorghum bicolor*, a été formulé sous forme de poudre mouillable [4,6 WP] et évaluée comme herbicide naturel sur plusieurs espèces de mauvaises herbes et de cultures dans différentes conditions de croissance. La sorgoléone formulée [4,6 WP] a supprimé la germination et la croissance des pousses des mauvaises herbes, les espèces à feuilles larges présentant une plus grande sensibilité que les espèces de graminées. La germination et la croissance des espèces de mauvaises herbes à feuilles larges ont été complètement supprimées (100%) à 0,2 g m.a.L⁻¹

sorgoléone dans une étude en chambre de croissance. Les applications en post-levée de la formulation mouillable de sorgoléone [4,6 WP] ont inhibé la croissance des mauvaises herbes de 20 à 25% plus élevée que les applications de pré-levée en serre. Les mauvaises herbes à feuilles larges étaient plus sensibles que les graminées aux deux méthodes d'application. Dans toutes les études, la croissance a été supprimée chez plus de 90% des mauvaises herbes à feuilles larges et deux espèces, en particulier *Rumex japonicus* et *Plantago asiatica* ont été complètement supprimées à 0,4 kg m.a. ha⁻¹ sorgoléone. Les espèces cultivées en revanche, étaient beaucoup plus tolérantes à la sorgoléone, avec une inhibition de 30% au maximum, au taux le plus élevé de 0,4 kg m.a. ha⁻¹ sorgoléone. Les résultats révèlent que la sorgoléone, après formulation sous forme de poudre mouillable, est plus efficace pour inhiber la croissance des mauvaises herbes et que les espèces cultivées y sont tolérantes. La forte capacité de suppression des mauvaises herbes de la sorgoléone formulée offre donc des possibilités intéressantes en tant qu'approche naturelle efficace et respectueuse de l'environnement pour la gestion des mauvaises herbes.

3/ Les extraits bruts

Très peu de recherches ont été menées à propos de la formulation des bioherbicides à partir d'extraits végétaux. Certains composés phénoliques et en particulier les flavonoïdes sont connus pour leurs propriétés herbicides. Très peu de travaux ont été réalisés sur l'activité herbicide de leur constituants actifs vis à vis d'adventices problématiques.

L'extrait brut de *C. cardunculus* induit un stress oxydatif chez les plantes traitées et perturbe par conséquent les fonctions physiologiques et biochimiques des cellules végétales. **Ben kaab et al. (2020)** ont étudié pour la première fois la capacité des composés bioactifs à interagir avec la membrane plasmique. Les résultats montrent que la naringénine et la myricitrine seules peuvent pénétrer à travers la partie polaire de la membrane, mais elles ne semblent pas pouvoir traverser la partie apolaire. Une formulation optimale contenant de la myricitrine et de la naringénine et ayant d'autres modes d'action que les herbicides conventionnels, notamment en ciblant potentiellement la membrane plasmique, pourrait être très utile pour résoudre le problème de résistance aux herbicides. Dans l'ensemble, l'extrait brut de *C. cardunculus* peut être suggéré comme un herbicide écologique potentiel et une source appropriée de composés herbicides naturels.

Les effets allélopathiques d'exsudats racinaires de concentration différente de *Kochia scoparia* sur la germination des graines de lin oléagineux ont été étudiés en utilisant des méthodes de bio-essais. Les résultats ont montré que différentes concentrations d'exsudats racinaires de *K.scoparia* avaient différents degrés d'inhibition (ou de promotion) sur l'énergie de germination, taux de germination, indice de germination et indice de vigueur des graines du lin oléagineux tandis que le taux d'inhibition augmentait avec l'augmentation de la concentration de traitement. Différentes concentrations d'exsudats de racine de *K. scoparia* semblent favoriser la longueur des racines des plants de lin oléagineux et inhiber la hauteur des pousses, le poids frais des racines et le poids frais des pousses. Les

résultats ont montré que la sécrétion du système racinaire était l'un des moyens par lesquels *K. scoparia* pouvait libérer des composés allélochimiques et affecter la croissance des plantes autour d'eux. La raison des exsudats racinaires de *K. scoparia* affectant la germination des graines de lin était principalement due à l'inhibition de l'indice de vigueur des graines et la croissance des plantules de lin était en grande partie due au fait que, les racines devenaient minces et longues (Zhao *et al.*, 2012).

Il est à noter que les recherches scientifiques visant l'étude du potentiel herbicide d'extraits végétaux sont très limitées jusqu'à présent. En effet, plusieurs études se sont intéressées seulement à la présence ou à l'absence d'un effet herbicide pour certains extraits végétaux. En outre, l'application d'extraits de plantes en tant que bioherbicide de pré-levée ou de post-émergence pourraient entraîner une réduction des doses d'herbicide synthétique en raison de leur action synergique ou additive.

Il s'est avéré que la majorité des extraits phytotoxiques cités dans la littérature scientifique ne sont pas toujours suffisamment efficaces pour inhiber totalement la croissance ou la germination des mauvaises herbes surtout lorsqu'ils sont appliqués en pulvérisation, même lorsque les plantes présentent un potentiel allélopathique élevé en tant que paillis, système de culture intercalaire ou en rotation (Pavela *et al.*, 2016). Ceci peut être le résultat d'un effet inhibiteur de l'activité d'un composé par un autre dans une solution aqueuse ou l'impossibilité de pénétration de l'extrait à travers la cuticule. Pour cette raison, l'amélioration de l'efficacité de ces solutions aqueuses naturels est associée à l'extraction et l'isolement d'allélochimiques individuels et leur comparaison avec des herbicides synthétiques (Soltys, 2013).

4/ Les extraits hydro-alcooliques

Parmi les nombreuses espèces végétales présentes dans le Cerrado, « *Ouratea spectabilis* » se distingue par le manque des espèces qui poussent sous son couvert. Par conséquent, Mecina *et al.* (2014) ont évalué le potentiel phytotoxique de différents extraits et fractions de l'extrait hydroéthanolique de feuilles d'*O. spectabilis* par des essais biologiques de la pré- et post-émergence des graines de *Lactuca sativa* L., détermination de l'indice mitotique dans les cellules racinaires d'*Allium cepa* L. Il a été possible de vérifier que différents extraits et fractions d'acétate d'éthyle d'*O. spectabilis* interféraient avec le taux de germination, car une germination réduite a été observée par rapport au témoin. De même, la croissance et le développement a été affecté chez les semis de laitue, comme l'a montré la longueur réduite des racines primaires et des hypocotyles par rapport au contrôle. De plus, l'indice mitotique a été réduit dans les groupes traités par rapport au contrôle négatif. Une analyse HPLC-PAD pour l'extrait hydroéthanolique et sa fraction d'acétate d'éthyle a montré une prédominance de composés flavonoïdes appartenant aux groupes des isoflavones et des catéchines. Ainsi, il a été conclu que cette espèce synthétise des composés phytotoxiques capables d'interférer dans la stabilisation et le développement d'autres espèces.

Dans une étude réalisée par **Ben kaab et al. (2020)** sur 10 extraits végétaux testés contre les plantes indésirables et plus particulièrement contre *Trifolium incarnatum*, *Sylibum marianum* et *Phalaris minor*, un seul extrait, celui de *Cynara. cardunculus*, s'est révélé prometteur pour le développement d'un bioherbicide à base de plante. D'autre part, l'extrait méthanolique de *Cynara cardunculus* a inhibé la germination des mauvaises herbes et la croissance des plantules, et a provoqué des nécroses et des chloroses. Suite à un fractionnement bio-guidé, cinq principaux composés phénoliques ont été identifiés dans l'extrait méthanolique de *Cynara cardunculus* à savoir: l'acide syringique, l'acide p-coumarique, la myricitrine, la quercétine et la naringénine. Seuls 3 flavonoïdes contenus dans la fraction la plus active ont été testés sur *Trifolium incarnatum*. Les 3 composés ont présenté un effet phytotoxique significatif et pourraient donc être utilisés dans une nouvelle composition d'herbicides botaniques pour lutter contre les mauvaises herbes. En outre, une nouvelle composition herbicide a été conçue pour améliorer l'activité de l'extrait méthanolique en post-émergence. La formulation contenant l'extrait méthanolique brut de *C. cardunculus* a présenté la même activité herbicide que le bioherbicide industriel standard contenant de l'acide pélargonique. Ces résultats font de *C. cardunculus* une source appropriée de composés naturels potentiellement utilisables comme herbicide naturel.

5/ Les extraits aqueux

Cherif et al. (2016) ont étudié l'activité allélopathique de l'extrait aqueux obtenu par reflux de *Pergularia tomentosa* (*Asclepiadaceae*) récoltée dans le Sahara septentrional Est algérien, via l'examen de ses effets sur la germination des graines d'orge *Hordeum vulgare* L. L'étude réalisée a permis de mettre en évidence l'effet inhibiteur sur la germination des graines d'orge traitées. Les extraits aqueux purs et dilués à 50% présentent une capacité inhibitrice exceptionnelle de l'ordre de 100%. Elle est moindre pour les concentrations à dosage assez faible. Pour des concentrations $\leq 20\%$, l'extrait racinaire de cette plante semble plus phytotoxique que l'extrait foliaire. En outre, des anomalies de croissance sont observées au niveau des lots traités.

L'effet herbicide d'extraits aqueux de feuilles de deux plantes récoltées dans le nord du Sahara algérien (*Cleome arabica* (*Capparaceae*) et *Pergularia tomentosa* (*Asclepiadaceae*)) a été évaluée par **Cherif (2020)**, en adoptant le test d'inhibition de la germination des graines, test réalisé sur l'adventice *Dactyloctenium aegyptium* (*Poaceae*) de deux espèces cultivées dont *Hordeumvulgare* et *Triticumdurum* (*Poaceae*). L'effet inhibiteur des extraits de *C. arabica* a été hautement significatif. Il se manifeste par la croissance de la partie aérienne et souterraine de *H. vulgar* et *T. durum*. Le taux d'inhibition est supérieur à 84,44% pour les graines de *D. aegyptium* traitées aux différentes concentrations. Les taux d'inhibition vont de 75,56% à 91,11% pour le blé T. dur irrigué à 80% à 100%, mais ne sont que de 55,56% à 77,78% pour les graines d'orge traitées avec les mêmes concentrations (80% à 100%).

Kouadria et al. (2019) ont visé à travers leur étude l'inhibition de la germination des graines de céréales de mauvaises herbes en utilisant un extrait aqueux de feuilles

d'eucalyptus à différentes doses (5, 10 et 20%) par rapport à un témoin (herbicide 2,4D). Les résultats indiquent la possibilité d'utiliser des extraits de plantes comme herbicides en lutte biologique, car la plante testée au cours de ces travaux a montré de réelles propriétés inhibitrices de la germination. En effet, l'*Eucalyptus globulus* s'est avéré être un inhibiteur puissant, compatible avec sa capacité allélopathique.

Ghosh et al. (2016) a démontré que l'extrait aqueux botanique et la poudre sèche de trois espèces végétales présentaient des propriétés allélochimiques connues contre la germination et la croissance des semis de *Sorghum bicolor* L. cultivars *khella*. En outre, *Ammi majus* a montré l'inhibition la plus élevée de la germination des graines (52,5%) suivie par *Guiera sengalensis* et *Salix spp.* (85,5% et 85,0%) respectivement.

La commercialisation des bioherbicides à base d'extraits végétaux y compris les huiles essentielles paraît fortement compliquée et cela est dû à la législation stricte, la faible persistance des effets et le manque de qualité et de quantités suffisantes de matériels végétaux à des prix abordables. Les processus d'autorisation des bioherbicides sont complexes et coûteux, tout comme l'autorisation de tout composé nouvellement synthétisé sans antécédents d'utilisation dans l'industrie alimentaire, cosmétique ou pharmaceutique. Les autorisations de l'HE nécessitent une documentation de sécurité par le biais d'études toxicologiques appropriées. Cependant, dans de nombreux cas, de telles études n'existent pas et leur préparation est trop coûteuse pour les fabricants locaux. La fabrication de bioherbicide, souvent d'importance locale seulement, est généralement à petite échelle, car la production est limitée par la disponibilité de substances actives (**Pavela et al., 2016**).

Selon **Bennaoum (2018)**, ces molécules allélochimiques ont fait preuve de leur pouvoir inhibiteur, or ces bio-essais ne représentent pas la réalité écologique, car une simple boîte de pétri ne peut remplacer le sol. En parallèle, les mécanismes de ce phénomène allélopathique ne sont pas encore élucidés. Pour des études complémentaires, des questions peuvent être posées sur l'action synergique des substances volatiles et des composés actifs solubles dans l'eau, sur l'efficacité de ces huiles essentielles et des composés allélochimiques dans le sol, sur leurs relations avec les minéraux ainsi que leurs effets sur les microorganismes du sol. Des études plus poussées s'imposeront sur chaque constituant afin de mieux cibler la ou les molécules dites « allélochimiques » responsables de répression de la germination et de la croissance des plantes.

CONCLUSION

Les stratégies de lutte contre les mauvaises herbes/adventices sont diverses mais reposent essentiellement sur l'application de molécules herbicides d'origine chimique. L'usage intensif des herbicides de synthèse pendant les cinquante dernières années a induit un certain nombre d'impacts sur l'environnement et peuvent être nocifs pour les humains et les animaux (**Morales-Flores *et al.*, 2013**).

Pour réduire l'application de produits phytopharmaceutiques et notamment des herbicides, de nouvelles molécules sont recherchées et de nouveaux produits sont ainsi mis au point. Ces nouveaux produits, bioherbicides, devraient a priori présenter un profil environnemental plus favorable car ils sont conçus à partir de substances naturelles déjà présentes dans l'environnement (**Rizvi *et al.*, 2012**).

A la lumière de ce travail, et reposant sur nos connaissances des résultats de diverses études scientifiques sur l'utilisation de substances d'origine végétale pour éliminer ou au moins réduire le problème des mauvaises herbes, nous concluons que cette tendance a un bel avenir et appelle à l'optimisme, malgré le manque d'études sur les phytoherbicides. La recherche devra prendre de l'avant dans ce sens jusqu'à atteindre l'objectif visé ; comme elle devrait être en mesure de fournir des informations sur la commercialisation de produits végétaux, au moins aussi efficaces que dans des conditions de laboratoire contrôlées, avec une stabilité améliorée des composés dans des conditions de terrain.

Une connaissance plus élargie du potentiel que nous offre les plantes en tant que bioherbicide, serait susceptible de mettre en place une nouvelle stratégie de lutte biologique plus efficace et plus sûre sur le plan sanitaire et écologique, et nous permettrait de se passer complètement des herbicides industriels, pourquoi pas !

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFFP et CEB(2011). Répertoire terminologique en protection des plantes. Disponible sur : <http://www.afpp.net/apps/accesbase/bindocload.asp?d=6016&t=0&identobj=qpg796No&uid=57305290&sid>
- Andanson A.(2010), Évolution de l'agressivité des champignons phytopathogènes, Couplage des approches théorique et empirique, Nancy 1, <http://www.theses.fr/2010NAN10094>
- Anonyme. (1976). Les mauvaises herbes des céréales d'hiver en Algérie. ITGC, 150 p.
- Anonymos. (Novembre 2006). comité de recherche et de sensibilisation d'Eau Secours!. Canada, 12 p.
- Anonymous, Agricultural chemical use database, National Agricultural Statistic Service (NASS), USDA, <http://www.pest-managemebt.info/nass/2004>
- Anonymous.(2008). Quand l'agriculture est mauvaise pour la santé. In *goodplanet.info. Enjeux alimentation et agriculture*. <http://www.goodplanet.info/Alimentation-agriculture/Pesticides/Pesticides/%28theme%29/266> (Page consultée le 12/14 2012).
- Anses,(2019). Avis de l'Anses, Saisine n°2015-SA-0252.
- Arino O. Kalogirou V. Perez J.R. Pinnock S.(2012). Culture-Meris : an ESA weekly service for agriculture. *Remote Sensing Letters*. 3(6):461-469.
- Bailey K. L.(2014). The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens. In *Integrated Pest Management, Current Concepts and Ecological Perspective*, edited by Dharam P, Abrol, Academic P, 245–66, Elsevier.
- Banowetz, G.M.Azevedo, M.D., Armstrong, D.J, Halgren, A.B. & Mills, D.I (2008). Germination-arrest factor (GAF) : biological properties of a novel, naturally-occurring herbicide produced by selecte isolate of rhizosphere bacteria. *Bio Control.*, 46 :380-390.
- Barralis G., Chadoeuf R et Dessaint F.(1992). Influence à long terme des techniques culturales sur la dynamique des levées au champ d'adventices. IXème colloque internationale, Biologie, écologie, et systématique des mauvaises herbes, Dijon, 12 p.
- Barralis G., Chadoeuf R.(1987). Potentiel semencier des terres arables .*Weed Research.*, 27(6) :417-424.
- Batish D.R. Singh H.P. Setia R.K. Kaur S. Yadav S.S. (2007). Alternative control of littleseed canary grass using eucalypt oil. *Agronomy for Sustainable Development* ., 27:171-177.
- Beckie H.J. (2011). Herbicide resistant weed management: focus on glyphosate. *Society of chemical industry.*, 60-64.
- Ben Kaab S. (2020). Etude du potentiel herbicide des extraits végétaux des espèces xero- halophytes Tunisiennes et détermination de leurs modes d'action. Thèse de doctora, université de Liège-Gembloux Agro-bio Tech, 201 P.

- Ben Kaab S. Lins L. Hanafi M. Rebey I.B. Deleu M. Fauconnier M.L. Ksouri R. Jijakli H. De Clerck C. (2020). *Cynara cardunculus* crude extract as a powerful natural herbicide and insight into the mode of action of its bioactive molecules. *Biomolecules.*, 10(2):209.
- Ben Kaab S. Rebey B.I. Hanafi M. Berhal C. Fauconnier M.L. De Clerck C. Ksouri R. Jijakli H. (2020). Study of *Romarinus officinalis* essential oil as an effective antifungal and herbicidal agent. *Spanish Journal of Agricultural Research.*, 17(2):e1006.
- Ben Kaab S. Rebey B.I. Hanafi M. Mkadmini H.K. Smaoui A. Fauconnier M.L. De Clerck C. Jijakli M.H. Ksouri R. (2020). Screening of Tunisian plant extracts for herbicidal activity and formulation of a bioherbicide based on *Cynara cardunculus*. *South African Journal of Botany.*, 128:67-76.
- Benmahdi S.(2016/2017). Contribution à l'inventaire des adventices inféodées à la céréaliculture dans la région de Bordj Zemoura wilaya de Bordj Bou Arreridj. Thèse de master, Université Ibrahimi El Bachir El Mohamed.
- Bennaoum Z.(2018). Enveloppe écologique, caractères microphytodermiques et effets allélopathiques des composés phytochimiques des espèces du genre *Ruta* dans la région nord occidentale oranaise. Thèse de magister, Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbes Faculté des Sciences la nature et de la vie, 225 p.
- Bernier D.(2002). Impact des herbicides dans l'eau et le terreau. In Agri-réseau. Légumes de serres. <http://www.agrireseau.qc/legumesdeserre/Documents/JHR%20SERRES%202002%20TEXTE%20DBERNIER%20IMPACT%20des%20herbicides.pdf>
- Blackshaw R.E. R.N. Brandt H.H. Janzen. et Entz T.(2004). Weed speci response to phosphorus fertilization. *Weed Sci.* 52: 406-412.
- Boschetto G.(2013). Évaluation de la Pertinence de l'utilisation des Herbicides en Lien avec le Développement Durable. Essai présenté au centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maitre en environnement (M.ENV.). Université de sherbrooke 86 p.
- Capelezzo A.P., Mohr L.C., Dalcanton F., Muneron de Mello J.M., Fiori M.A.(2018). β -Cyclodextrins as Encapsulating Agents of Essential Oils. *Interchopen.*, 2:1001.
- Carol A.(2003). Can Cover Crops Control Weeds? TwoYear Study Tests Efficacy in VegetableProduction Systems. A Monthly Report on Pesticides and Related Environmental. Issue No. 203:7 p.
- Caussanel J.P, Kheddami M.(1983). Répartition et densité des principales mauvaises herbes en Algérie dans les cultures pérennes (verger et palmeraies) Ed. I.N.P.V.Rapp. Technique, n°83-01 d'Alger : 88-101.
- Caussanel J.P, Barralis G, Fabre E, Morin C, Branthome X.(1986). La détermination des seuils de nuisibilité des mauvaises herbes, méthode d'études. *Rev.Perspective agricole* n°108 :58-65.

- Caussanel J.P.(1988).Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. Agronomie Elsevier /INRA :219-240.
- Caussanel J.P.(1989) Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. Agronomie, EDP Sciences., 9 (3) :219-240 p.
- Caussanel J.P.(1989). Nuisibilité et seuil de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelles : situation de concurrence biospécifique.Ed Elsevier, I.N.R.A Rev. Agronomie, vol 9, n°3, Paris :219-320.
- Caussanel J.P.Barralis G. (1973). Phénomène de concurrence entre végétaux.IVème coll.intern.Ecol.Biol.des mauvaises herbes,Columa,Marseille, 202-238.
- Chauvelin D. Kasso D. Loumet J.J. Favolle A. Doucet J.L. (2012). Explorer la banque de graines du sol pour mieux comprendre la dynamique de régénération des forets tropicales africaines (synthèse bibliographique). Biotechnologie , agronomie Société et environnement. 18(4).
- Cherif R. (2020). Comparative study of the biological activities of the aqueous extracts of two spontaneous plants harvested in the Algerian sahara.
- Cherif R. (2020). Etude comparative des activités biologiques des extraits aqueux de deux plantes spontanées récoltées au Sahara Algérien. Thèse de doctora, Université de Ghardaia, 151 P.
- Cherif R. Kemassi A. Boual Z. Bouziane N. Benbrahim F. Hadjseyed A. Gharib T.ould el Hadj-khelil A. Sakeur M.L.ould-el-hadj M.D. (2016). Activités biologiques des extraits aqueux de *Pergularia tomentosa* L.(Asclepiadaceae). Lebanese science journal., 17(1) :25-35.
- Chikowo R. Faloya V. Petit S. Munier-Johain N.M. (2009).Integrated weed management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. Agriculture, Ecosystems and environment.,132:237-242.
- Cramer, D. A. ; Barton, R. A. ; Shorland, F. B. ; Chochanska, Z.(1967). A comparison of the effects of white clover (*Trifolium repens*) and of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) on fat composition and flavour of lamb. J. Agric. Sci., 69: 367-373
- De Albuquerque M. Dos Santos R. Lima L. Melo Filho P. Nogueira R. Da Câmara C. and Ramos A. (2011), « Allelopathy, an Alternative Tool to Improve Cropping Systems, a Review », Agronomy for Sustainable Development 31 (2) : 379–95.
- De Almeida LFR. Frei F. Mancini E. De Martino L. De Feo V.(2010). Phytotoxic activities of Mediterranean essential oils. Molecules., 15(6) :4309-23.
- Desaymard P.(1976). Seuils de nuisibilité des mauvaises herbes. Phytoma, 27-28 p.
- Dudai N. Poljakoff M.A. MayerM.A, Putievsky E. LernerH.R.(1999). Essential oils as Allelochemicals and their potential use as bioherbicides. Journal of chemical ecology.,25(5):1079-1089.
- Duke S. O. Dayan F. E. Romagni J. G. and Rimando A. M.(1999). Natural Products as Sources of Herbicides : Current Status and Future Trends. Weed Research, 40 : 99–111.
- El idrissi M., Elhourri M., Amechrouq A. et Zouh R. (2014). Activité phytotoxique des huiles essentielles de *chenopodium ambrosoides* et de *daucus carota* ssp. Sur la

- germination et la croissance des racines des graines de *lepidium sativum*. ScienceLib Editions Mersenne., 6 (140608).
- El idrissi M., Elhourri M., Amechrouq A., Zouh R.(2014). Activité phytotoxiques des huiles essentielles de *chenopodium ambrosoides* et de *daucus carota* ssp. Sur la germination et la croissance des racines des graines de *lepidium sativum*. ScienceLib Editions Mersenne. 6(140608).
 - El-Rkiek K.G. Saad el-din S.A. El-wakeel M.A. El-awadi M.E.S. Dawood M.G. (2019). Allelopathic potential of the pea seed powder as natural herbicide for controlling weeds infested wheat plants. Bulletin of the National Research Centre., 43:193.
 - Falleh, H., Ksouri, R., Chaieb, K., Karray-Bouraoui, N., Trabelsi, N., Boulaaba, M., & Abdelly, C. (2008). Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities. Comptes Rendus-Biologies, 331(5) :372–379. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.02.008>.
 - Fénart S.(2006).Dynamique spatiale et temporelle des populations de betteraves mauvaisesherbes, implications possibles dans la dissémination de transgènes. Laboratoire de Génétique et Evolution des Populations Végétales, UMR CNRS, 1 p.
 - Fraternale D., Flamini G., Ricci D. (2015).Essential oil composition and antigermination activity of *Artemisia dracunculus* (Tarragon). Natural product communications.,10(8) :1469-72.
 - Fraternale D., Ricci D., Verardo G., Gorassini A., Stochi V., Sestili P. (2015). Activity of *Vitis Vinifera* Tendrils extract against phytopathogenic fungi. Sage journals.,10(6).
 - Gautier M.(1987). La culture fruitière « L'arbre fruitier » Ed. Baillière, vol 1. Paris, 89-224.
 - Ghorbani R. Leifert C. and Seel W.(2005). Biological Control of Weeds with Antagonistic Plant Pathogens, in Advances in Agronomy, 191–225.
 - Ghorbani R., Seel W., Leifert C.(2006). Effect of Plant Age, Temperature and Humidity on Virulence of *Ascochyta Caulina* on Common Lambsquarters (*Chenopodium album*) , Weed Science 54 : 526–31.
 - Ghosh R., Kumar A., Ghosh A., Mondal D., Karmakar C., Bharath G., Bandopadhyay P., Sounda G. (2016). Bash of botanical herbicides in annual planning of weed pest management for eco-efficient sustainable agriculture. Journal of Crop and weed., 12(3):168-174.
 - Google.com/amp/s/agronomie
 - Gouvernement du Canada 2012. Herbicides pour le désherbage des brise-vent. In Gouvernement du Canada. Centre du développement de l'agroforesterie. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1192722957329&lang=fra> (Page consultée le 01/10 201).
 - Green J.M., Owen M.D.K. (2011). Herbicide-resistant crops: utilities and limitations for herbicide- resistant weed management. J Agric food chem., 59(11):5819-29.
 - Guyot L.(1951). Les excréments racinaires toxiques chez les végétaux. B.I.T.59 :315-369.
 - Hallett S. G.(2005). Symposium Where Are the Bioherbicides ? . Weed Science 53 (4) : 404–15.

- Hamadache A.(1995). Les mauvaises herbes des grandes cultures. Biologie, Ecologie, moyens de lutte.ITGC,40p.
- Hanitat R.(2012).Les groupements des adventices des cultures dans la région d'Oran. Mémoire de Magister, Université d'Oran, 92P.
- Harper J.L.(1977). Population biology of plants. Academic Press.Ed Londre, 892p.
- Hoagland R. E., Boyette C. D., Weaver M. A., Abbas H. K.(2007). « Bioherbicides : Research and Risks». Toxin Reviews 26 (4) : 313–42.
- Holzner W.(1982). Concepts, categories and characteristics of weeds. In Biology and ecology of weeds.Eds.holznerW.and Numata M., 3-20.

http://eausecours.org/esdossier/pollution_eau.pdf

- Ibanez M.D and Blazquez M.A. (2019).Phytotoxic effects of commercial Eucalyptus citriodora, Lavandula angustifolia, and Pinus sylvestris essential oils on weeds, crops, and invasive species. Molecules., 24(15):2847.
- Ibanez M.D et Blazquez M.A.(2018). Phytotoxicity of essential oils from Culinary Herbs against seed germination and seedling growth of selected weeds. International Journal of pharmacognosy and phytochemical research., 10(4):123-131.
- Institut français de la vigne et des vins 2010. Maîtrise de l'acidité des sols. *In* Vin du Sud- Ouest. *Les fiches pratiques*. <http://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/maitrise-acidite-sol.php#ancree7>
- Juissiaux PH. Pequignot R.(1962). Mauvaises herbes et technique modern de lute.Ed. Maison Rustique.Paris, 222p.
- Kadra N.(1976).Les mauvaises herbes en grandes cultures.Ing., INA Alger, 59p.
- Khouri R.(1991). Approche phytosociologique de quelques groupements de mauvaises herbes dans la région est de la plaine de la Mitija. Mem.Ing.Agr.I.N.A.Alger,56p.
- Koïou K., Vasilakoglou L., Dhima K.(2020). Herbicidal potential of lavender (Lavandula angustifolia Mill.) essential oil components on bristly foxtail (Setaria verticillata(L)P.Beauv) :comparaison with carvacrol, carvone, thymol and eugenol. Archives of biological sciences.,72(00):16-16.
- Kordali S., Cakir A., Akcin T.A., Mete E., Akcin A., Aydin T., Kilic H. (2009). Antifungal and herbicidal properties of essential oils and n-hexane extracts of Achillea gypsicola Hub-Mor. And Achillea biebersteinii Afan.(Asteraceae). Industrial crops and products.,29:562-570.
- Kordali S., Cakir A., Ozer H., Cakmakci R., Kesdek M., Mete E. (2008). Antifungal, phytotoxic and insecticidal properties of essential oil isolated from Turkish Origanum acutidens and its tree components, carvacrol, thymol and P-cymene. Bioresour Technol.,99(18):8788-95.
- Kouadria M., Hassani A., Ghezali D. (2019). Weed control in fields of direct seeded cereals (Algerian highland region) by using Eucalyptus globulus leaf extract. Revue Marocaine des sciences Agronomiques et vétérinaire., 7(1).
- Koul, O., Walia, S., & Dhaliwal, G. S. (2008). Essential oils as green pesticides: Potential and constraints. Biopesticides International, 4(1):63-84.

- Lagueyrie A. (2020) : <https://www.rustica.fr/jardin-bio/mauvaises-herbes-varietes,4354.html>
- Le Bourgeois Th.(1993). Les mauvaises herbes dans la rotation cotonnière au Nord Cameroun (Afrique). Amplitude d'habitat et degré d'infestation, phénologie, Th. Doct. Univ. Montpellier II, 249p.
- Lonchamp J.P., Barralis G.(1988). Caractéristiques et dynamique des mauvaises herbes en région de grande culture : le Noyonnais (Oise). Agronomie, EDP Sciences., 8 (9) :757-766.
- Longchamps.J.P.(1977). Seuil de nuisibilité des mauvaises herbes : nuisibilité des mauvaises herbes (généralités) Rev. Phytoma, 288 :7-11.
- Maillet J.(1992). Constitution et dynamique des communautés de mauvaises herbes de France et des Rizières de Camargue.Th.Doc.Etat.Univ. Montpellier, 163p.
- Mamarot J. et Rodriguez A.(2014).Mauvaises herbes des cultures. ACTA.
- Mamy L., Barriuso E., Benoit G. (2011). Impact sur l'environnement des herbicides utilisés dans les cultures génétiquement modifiées.Courrier de l'environnement de l'INRA., 60 :10.<https://www7.inra.fr/dpenv/pdf/C60Barriuso.pdf>
- Marshall A.H., Abberton M.T., Williams T.A., Michaeson-yeates T.P.T., Powell H.G., (2003). Forage quality of *Trifolium repens* L.xT.nigrescens viv. Hybrids. Grass and Forage Sci., 58(3):295-301.
- McCully K., Tremblay R., Chiasson G.(2004). Guide de lutte intégrée contre les mauvaises herbes dans les cultures de fraises. Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Aquaculture du Nouveau- Brunswick (MAPANB), 15 p.
- Mecina G.F., Santos V.H.M., Dokkedal A.L., Saldanha L.L., Silva L.P., Silva R.M.G.(2014). Phytotoxicity of extracts and fractions of *Ouratea spectabilis* (Mart.ex Engl.) Engl.(Ochnaceae). South African Journal of Botany.,95 :174-180.
- Melakhessou Z.(2007). Etude de la nuisibilité directe des adventices sur la culture du pois chiche d'hiver (*Cicer aritinum* L.) variété ILC 3279. Cas de *Sinapis arvensis* L. Thèse de magister, Université El hadj Lakhdar de Batna, 72 p.
- Michel-Michez. (1980) :<https://agronomie.info/fr/capacite-dadaptation-des-mauvaise-herbes/>
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2013. Les Pesticides les plus rencontrés dans les cours d'eau. Observation et statistiques. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/246/211/pesticides-plus-rencontres-cours-deau.htm1>.
- Mithila J., Christopher H.J., Johnson W.G., Kelley K.B., Riechers D.E.(2011). Evolution of Resistance to Auxinic Herbicides: Historical Perspectives, Mechanisms of resistance, and implications for Broadleaf weed management in agronomic crops. Published online by Cambridge university Press., 59(4):445-457.
- Monsango M. (1983). Influence des plantes adventices sur les plantes de culture : quelques résultats. Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée.XXX,1
- Montegut G.(1980). Que sont les mauvaises herbes ? Nuisibilité des mauvaises herbes (généralités). Cultivar., 125 : 9-13.

- Montegut J.(1983). Pérenne et vivace en Afrique du nord. Symposium Alger, I.N.P.V. –I.N.A-E.N.S.H. Versailles., 1-27.
- Morales-Flores F., Aguilar M.I., King-Diaz B., Lotina-Hennsen B.(2013).Derivatives of diterpen labdane-8 α ,15-diol as photosynthetic inhibitors in spinach chloroplasts and growth plant inhibitors. Journal of photochemistry and photobiology B:Biologie.,125:42-50.
- Moussaoui K., Boucherf A., Zekkari I., verdeguer S.M., Djazouli Z.E. (2017). Potentiel allélopathique de bioproduits formulés à base d’huiles essentielles de Pistacia lentiscus (L., 1753) et de Cupressus arizonica (Greene, 1882). Revue Agrobiologia., 7(2) :539-547.
- Nadjar F et Ben Loucif B. (2018).Etude des populations des plantes adventices du blé dur(Triticum durum Desf.)dans deux régions de la wilaya de Guelma,Thèse de master,Université 08 Mai 1945 « Guelma », 68 p.
- Navas M.L. (1993). Dynamique de population des mauvaises herbes pérennes.Cours international de malherbologie C.I.E.H.A.M-E.W.R.S.(18-29 octobre 1993).I.A.M.Z.Espagne,11p.
- Olivier M.J. (2007). Chimie de l’environnement,Les productions Jacques Bernier edition, Collection Sciences et communication de l’environnement, Québec, 313 p.
- Onil S., Dion S., St-Laurent L., Apirl M.H. (2012). Indicateur de risque des pesticides du Québec. 2 édition, Québec, Bibliothèque et archives nationales du Québec, 48 p. 1. (Collection Santé et environnement).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 2000. Annexe 2 Évaluation de la contamination des sols : manuel de référence. In FAO. Archive de documents de la FAO. <http://www.fao.org/docrep/005/X2570F/X2570F08.htm> (Page consultée le 01/12 201).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 2000. Annexe 2 Évaluation de la contamination des sols : manuel de référence. In FAO. Archive dedocuments de la FAO. <http://www.fao.org/docrep/005/X2570F/X2570F08.htm>
- Organization for economic co-operation and development 2005. OECD guideline for testing of chemicals. In OECD. Chemical safety. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/testingofchemicals/34898616.pdf>
- Ozenda P.(1982). Les végétaux dans la biosphère.Ed.Doin,Paris,413p.
- Pacanoski Z.(2015). Herbicides and Adjvants , herbicides, physiology of action, and Safety, Andrew Price, Jessia Kelton and Lina Sarunaite, IntechOpen,DOI :10.5772/60842.<http://www.intechopen.com/books/herbicides-physiology-of-action-and-safety/herbicides-and-adjuvants> .
- Palvadeau L. et Deval Ph. (2020) :<https://ecophytopic.fr/proteger/moyens-biologiques-contre-les-adventices>
- Pavela R. (2016). History, Presence and Perspective of Using Plant Extracts as Commercial Botanical Insecticides and Farm Products for Protection against Insects - a Review. Plant Protection Science 52(4).
- Petitfils O.(1980). Desherbage autre que chimique. Perspect. Agric., Fra, 42: 93-98.

- Phipps R., Park H.J.R.(2002). Environmental benefits of genetically modified crops: global and European perspectives. *Feed Sci.*, 11(1):1–18.
- Plan Air-Climat (2009). Acidification des sols. In [airclimat.wallonie.be. L'acidification](http://airclimat.wallonie.be/L'acidification). <http://airclimat.wallonie.be/spip/Acidification-des-sols.htm1>
- Pousset J.(2003). *Agricultures sans herbicides, principes et méthodes*. Ed. Agri décisions, Paris, 703P.
- Raunkiaer C.(1905). Types biologiques pour la géographie botanique. *Bull. Acad. roy. Sci. Dmemark*, 5 : 347-437.
- Raveau R., Fontaine J., Sahraoui L.H.A. (2020). Essential oils as potential alternative biocontrol products against plant pathogens and weeds : a review. *Foods.*, 9(3):365.
- Rice E.L.(1974). *Allelopathy*. Eds. Academic Press, 353p.
- Rizvi S.J.H et Rizvi V.(2012). *Allelopathy. Basic and applied aspects*. Department of Botany and plant physiology. Rajendra agricultural university, India., 479 p.
- Roberts H.A., Neilson J.E.(1981) .Changes in the soil seed Bank of Four Long-Term crop/Herbicide Experiments. *Journal of applied ecology.*, 18(2):661-668.
- Samuel O., Dion S., St-Laurent L., April M.H.(2012). Indicateur de risque des pesticides du Québec – IRPeQ – Santé et environnement [en ligne]. Québec : ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation/ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs/Institut national de santé publique du Québec, 48 p.
- Singh H.P., Batish D.R., Setia N., Kohli R.K. (2005). Herbicidal activity of volatile oils from *Eucalyptus citriodora* against *Parthenium hysterophorus*. *Annals of Applied Biology.*, 146:89-94.
- Soltys K.D., Krasuska U., Bogatek R., Gniazdowska A.(2013). Allelochemicals as Bioherbicides — Present and Perspectives. *InTech* 20:517-542
- Tateno, M., Nishida, Y., Adachi-Yamada, T. (2000). Regulation of JNK by Src During *Drosophila* development. *Science* 287(5451) :324-327.
- Uddin M.R., Park S.U., Dayan E.F., Pyon J.Y. (2014). Herbicidal activity of formulated sorgoleone, a natural product of sorghum root exudates. *Pest Manag sci.*, 70:252-257.
- Uremis I., Arslan M., Sangun M.K. (2009). Herbicidal Activity of essential oils on the germination of some problem weeds. *Asian Journal of chemistry.*, 21(4):3199-3210.
- Vasilakoglou I., Dhima K., Paschalidis K., Ritzoulis C. (2013). Herbicidal potential on *Lolium rigidum* of nineteen major essential oil components and their synergy. *Journal of Essential Oil Research.*, 25(1):1-10.
- Vasilakoglou I., Dhima K., Paschalidis K., Ritzoulis C. (2013). herbicidal potential on *lolium rigidum* of nineteen major essential oil components and their synergy. *journal of essential oil research.*, 25(1):1-10.
- Verdier J.L.(1990). Travail du sol, mauvaises herbes et désherbage. *Phytoma*, 414:13-22.
- Victoria Government (2010). Volatile Vapour Risk Drift. In Victoria government. *Agriculture*. <http://www.dpi.vic.gov.au/agriculture/farming-management/chemical-use/agricultural->

- Wicks G.A., Stahlman P.W., Tichota J.M., Price T.M.,(2001) Weed shifts in no-till glyphosate-tolerant crops in semiarid areas of the great plain. Proc North Cent Sci Soc Abstr 56:CDROM Computer File 2001.
- Zhao L., Niu J.y., Hu G.F., Dang Z.H. (2012). Allelopathic effects of different concentration root exudates of *Kochia scoparia* on oil flax seed germination. Paratacultural science., S451.
- Zitoune B., Barralis G., Caussanel J.P., Hadj Miloud D.(1988). Influence du travail du sol et du désherbage chimique sur les relations entre mauvaises herbes et blé. Rev.céréaliculture, 20 :4-9.