



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Université Mohamed-Seddik Benyahia – Jijel



Faculté des sciences de la nature et de la Vie
Département des Sciences de l'Environnement
et des Sciences Agronomiques

كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم علوم المحيط والعلوم الفلاحية

Activités Phytopharmaceutiques

Polycopié de cours

Master 2^{ième} année Phytopharmacie Appliquée

Préparé par Dr. Fatiha MEKIRCHA

Grade : MCA

2025/2026

Ref.....

Sommaire

CHAPITRE I : Modes d'action et sélectivité des Fongicides	3
Introduction	3
I-1- Définition des Fongicides	3
I-2-Classification des Fongicides.....	3
I-2-1-Fongicides affectant les processus respiratoires.....	3
a-Inhibiteurs du complexe mitochondrial III	6
b-Inhibiteurs du complexe mitochondrial II.....	7
c-Fongicides affectant la biodisponibilité de l'ATP (Adenosine Tri-Phosphate).....	7
d-Inhibiteurs de la phosphorylation oxydative	8
e-Decouplants.....	8
I-2-2-Fongicides inhibiteurs de la biosynthèse des stérols.....	8
I-2-3-Fongicides anti-microtubules	11
I-2-4-Autres Fongicides.....	12
CHAPITRE II : Mode d'action et sélectivité des herbicides.....	13
Introduction.....	13
II-1-Définition des herbicides	13
II-2-Absorption des herbicides par les végétaux	13
II-2-1-Les herbicides à pénétration racinaire	13
II-2-2-Les herbicides à pénétration aériennes	13
II-3-Sites d'action des herbicides	14
II-3-1-Herbicides inhibiteurs de la photosynthèse	15
II-3-2-Les herbicides auxiniques : une action ``auxin-like ``	16
II-3-3-Herbicides agissant sur les membranes cellulaires	16
II-3-4-Herbicides inhibiteurs de la synthèse des acides aminés.....	17
CHAPITRE III : Les insecticides	20
Introduction.....	20
III-1-Principales familles d'insecticides organiques et conditions d'utilisation	20
III-1-1-Les organochlorés.....	21
III-1-2-Les organophosphorés	21
III-1-3-Les carbamates	22
III-1-4-Les pyréthrinoïdes.....	22

III-1-5-Les néonicotinoïdes	23
III-2-Action des insecticides sur les organismes	23
III-2-1-Action sur le système nerveux.....	23
III-2-2-Régulateurs de croissance de l'insecte.....	24
III-3-Perspectives pour l'utilisation des insecticides.....	24
CHAPITRE IV : Les nématicides.....	25
Introduction.....	25
IV- 1-Familles et conditions d'utilisation.....	25
IV-2-Action des nématicides sur les organismes.....	25
IV-3-Perspectives pour l'utilisation des nématicides.....	26
CHAPITRE V : Les Phytohormones et Régulateurs de Croissance	27
Introduction.....	27
V-1-Usages actuels des régulateurs de croissance.....	27
V-2-Effets physiologiques des principales substances de croissance végétale.....	28
V-3- Effets liés aux interactions biotiques et abiotiques	30
V-3-1- Effets associés à l'interaction plantes-micro-organismes	30
V-3-2- Effets de l'interaction entre les phytohormones et les métaux	30
V-4- Evolution et perspectives d'utilisation des régulateurs de croissance	31

CHAPITRE I : Mode d'action et sélectivité des Fongicides

Introduction

La gestion des éléments nuisibles aux cultures (comme les parasites et les maladies) ou le contrôle des plantes adventices revêt une importance capitale dans les modèles de production végétale agricole. Actuellement, elle s'appuie beaucoup sur l'usage de produits phytosanitaires, qui offrent des avantages indéniables dans les systèmes de production. À l'heure actuelle, la lutte chimique est dominée par trois principales classes de pesticides que sont les herbicides appliqués contre les mauvaises herbes, les insecticides contre les insectes et les fongicides contre les champignons. Pour un chiffre d'affaires mondial d'environ 53 milliards d'euros, ces trois classes représentent respectivement 47%, 29% et 18%. Cette répartition est fonction des zones géographiques (Wood, 2020).

I-1- Définition des Fongicides

Les fongicides agricoles permettent de combattre les champignons phytopathogènes qui sont des eucaryotes susceptibles de provoquer des dégâts sur les plantes cultivées et sur les récoltes. Ils représentent environ 30 % du chiffre d'affaires mondial des pesticides. Les pertes potentielles provoquées par les maladies fongiques sont comprises selon les cultures entre 10 et 30 % (Oerke, 1996). Outre ces effets quantitatifs, les champignons pathogènes peuvent avoir un impact sur la qualité des cultures végétales en raison de la présence de mycotoxines ou par des modifications telles que la casse oxydasique des vins induite par les laccases de *Botrytis cinerea*.

I-2-Classification des Fongicides

Plusieurs critères de classifications des fongicides ont été proposés en fonction de leurs modes d'action biologique (exemple : préventif/curatif), de leurs comportements dans les plantes (exemple : contact, pénétrant, systémique) ou de leurs structures chimiques. Mais, finalement, l'émergence des résistances a conduit les scientifiques, mais aussi les prescripteurs, à classer les matières actives selon leur mode d'action biochimique.

I-2-1-Fongicides affectant les processus respiratoires

En général, à l'intérieur des cellules eucaryotes, les processus respiratoires, qui correspondent à la dégradation oxydative de composés organiques tels que les glucides ou les lipides, produisent de l'énergie sous forme d'ATP (adénosine triphosphate). Les phases terminales s'opèrent à travers une chaîne respiratoire mitochondriale qui est constituée d'un arsenal de transporteurs d'électrons (flavines, quinones, cytochromes). Certains comme le coenzyme Q

ou le cytochrome c sont relativement mobiles alors que d'autres sont inclus dans des complexes protéiques qui ont été séparés en quatre unités fonctionnelles (complexes I, II, III et IV). Enfin, un dernier complexe protéique correspond à l'ATP synthase (figure 1).

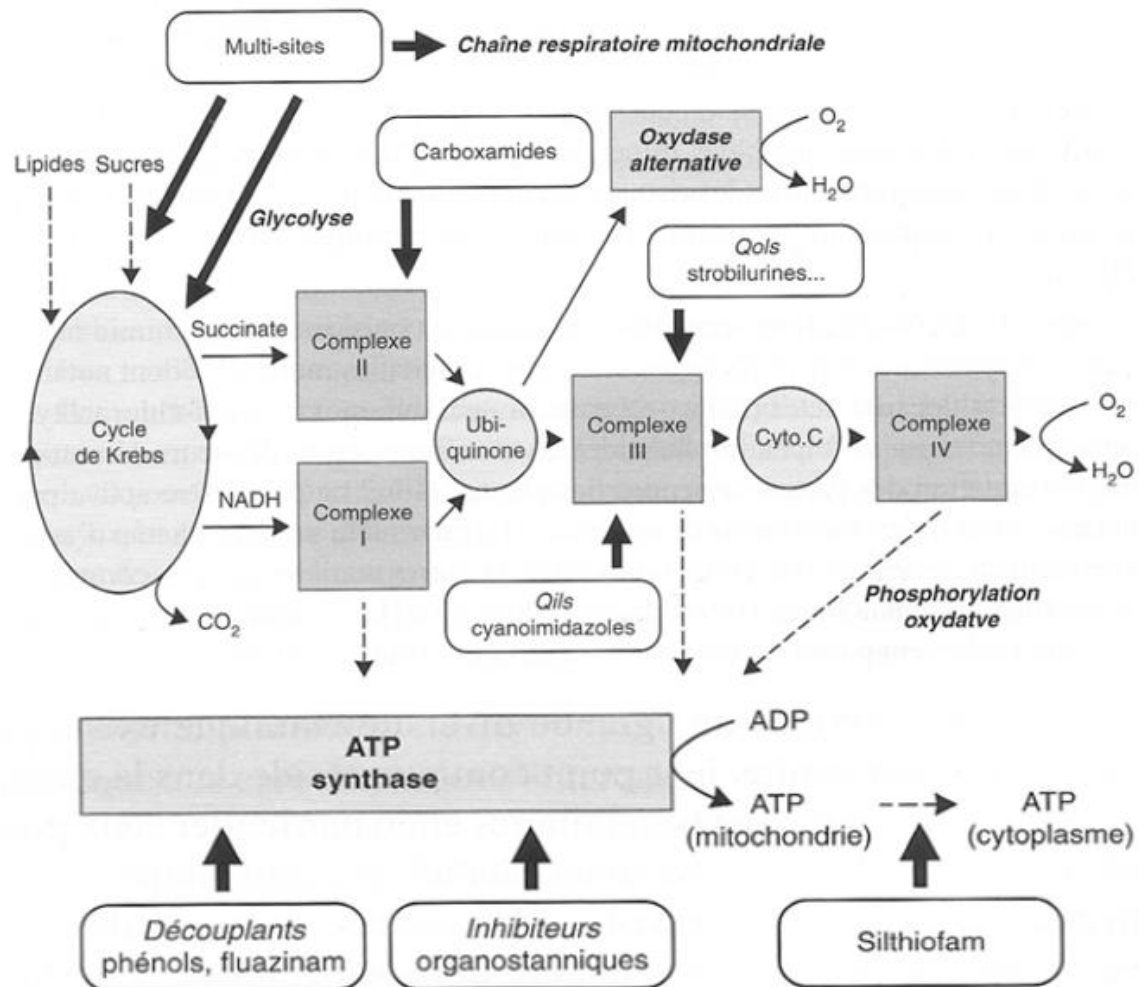
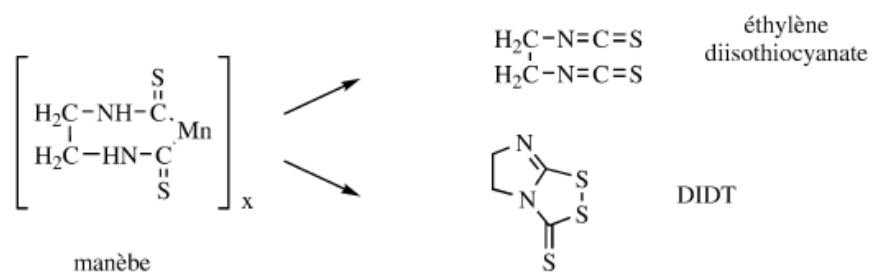
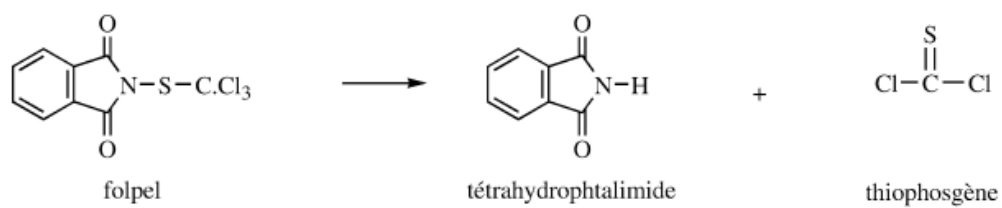


Figure 1 : Cibles des fongicides affectant les processus respiratoires (Leroux *et al.*, 2003)

Ces processus sont influencés par plus d'un tiers des fongicides, qui partagent tous la caractéristique d'inhiber la germination des spores de champignons et de bloquer la mobilité des zoospores d'Oomycota. Ainsi, tous se distinguent par une activité préventive intense. Ces inhibiteurs respiratoires ont joué un rôle déterminant dans l'initiation de la lutte chimique contre des maladies fongiques majeures telles que les mildious et les oïdiums. Bien que ces molécules fongicides présentent une grande diversité chimique, ils sont tous susceptibles d'interagir avec de nombreux systèmes enzymatiques et sont qualifiés de fongicides « multi-sites ». À l'inverse, de nombreuses matières actives possèdent une action plus spécifique ; il s'agit notamment d'inhibiteurs du complexe mitochondrial III (Figure 2).



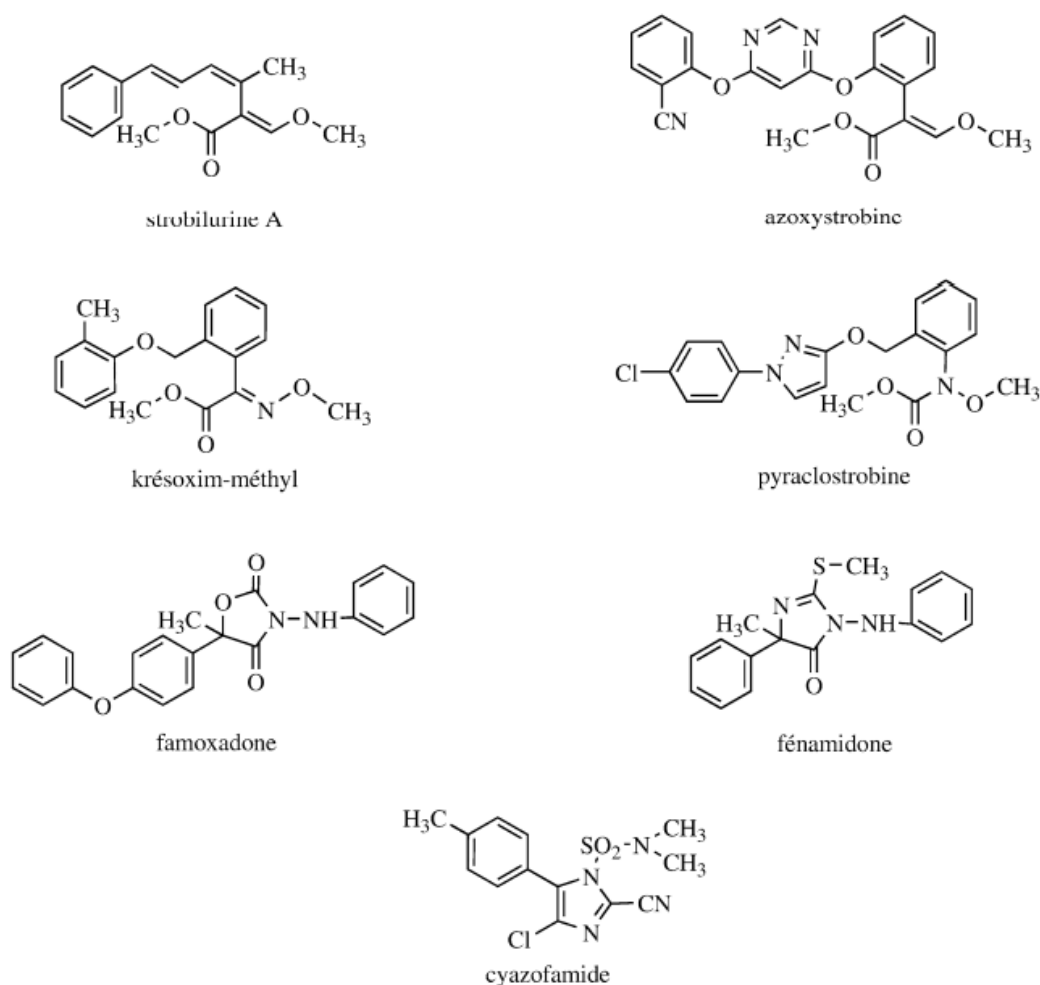


Figure 2 : Structure de fongicides agissant sur la respiration (Regnault-Roger et al ; 2005).

a-Inhibiteurs du complexe mitochondrial III

Le complexe III mitochondrial, composé de plusieurs sous-unités, incluant le cytochrome b, est chargé du transfert des électrons du coenzyme Q vers le cytochrome c. Le cytochrome b, qui est également la seule protéine du complexe III codée par un gène mitochondrial, possède un centre réducteur du coenzyme Q, situé près de la matrice mitochondriale (centre Qi - inside) et un centre d'oxydation du coenzyme Q, qui se trouve à proximité de l'espace intermembranaire (centre Qo -outside). On peut actuellement distinguer deux sortes d'inhibiteurs du complexe III, en fonction de leur fixation sur la face interne (QiI) ou externe (QoI) du cytochrome b.

Le premier QiI utilisé en agriculture a été l'antimycine A, mais en raison de son manque de sélectivité il a été abandonné. Très récemment, un nouveau type de QiI a été introduit, il s'agit de la cyazofamide (figure 2), qui est particulièrement efficace contre divers mildious à des doses inférieures à 100 g.ha⁻¹. L'inhibition du complexe III des oomycètes résulterait d'une liaison covalente de la sulfonamide de ce cyanoimidazole avec le cytochrome b. À ce jour,

aucune souche fongique résistante à la cyazofamide n'a été décelée et cette matière active demeure efficace vis-à-vis de celles qui résistent aux QoI.

Les strobilurines : une nouvelle génération de fongicides QoI, actifs sur de nombreux Ascomycota, Basidiomycota, Oomycota, rencontrés notamment sur le blé, l'orge, le riz, la vigne et le pommier. La dénomination « strobilurines » indique que les matières actives de ce groupe sont des analogues synthétiques de molécules naturelles produites par de nombreux Basidiomycota, appartenant en particulier aux genre *Strobilurus* qui sont des champignons lignicoles rencontrés dans les forêts des zones tropicales et tempérées. Les chercheurs tchèques ont découvert ces strobilurines naturelles à la fin des années 1960, révélant leur mécanisme d'action sur le complexe mitochondrial III. Il est probable que ces métabolites agissent comme un mécanisme de protection des Basidiomycota producteurs contre d'autres organismes s'installant sur les mêmes substrats. Les strobilurines naturelles sont létales pour une variété de champignons phytopathogènes *in vitro*, cependant, leur instabilité sous la lumière et/ou leur caractère volatil entrave leur mise en œuvre pratique. Ces recherches ont notamment abouti à l'azoxystrobine, qui, comme les strobilurines naturelles, renferme comme **toxophore** un méthyl β -méthoxyacrilate. Toutefois, le développement du krésoxim-méthyl et de la métominostrobin et la pyraclostrobine prouve qu'une flexibilité existe autour du toxophore. Sur les céréales, les strobilurines exercent des effets physiologiques se traduisant par un maintien prolongé de la coloration verte des feuilles traitées et entraînent des augmentations significatives de rendement, voire parfois des améliorations qualitatives des récoltes.

b-Inhibiteurs du complexe mitochondrial II

Les crotonalimides (plus généralement les carboxamides) agissent sur la coenzyme Q réductase, qui est l'un des composants de la succinate déshydrogénase, ou complexe II de la chaîne respiratoire mitochondriale.

c-Fongicides affectant la biodisponibilité de l'ATP (Adenosine Tri-Phosphate)

Au niveau mitochondrial, la phosphorylation oxydative permet de générer de l'ATP par l'intermédiaire d'une ATP synthase. Le fonctionnement de cet enzyme est couplé avec les réactions d'oxydoréductions se produisant au sein de la chaîne respiratoire et aussi avec le transfert de protons de l'intérieur vers l'extérieur des membranes mitochondriales internes.

d-Inhibiteurs de la phosphorylation oxydative

Le groupe le plus important d'inhibiteurs de la phosphorylation oxydative est constitué par les organostanniques qui ont des propriétés fongicides ou acaricides. Ainsi, le fentine-acétate et le fentine-hydroxyde sont des fongicides de surface actifs vis-à-vis d'ascomycètes et d'oomycètes.

e-Découplants

Les fongicides de ce type sont des découplants protonophores susceptibles de perméabiliser les membranes mitochondriales aux protons. Ces protonophores comportent une fonction acide faible fournie soit par un groupe hydroxyle pour le dinocap ou par une amine secondaire pour le fluazinam. Le dinocap, appartient à la famille des dinitrophénols dont certains sont des herbicides (dinosèbe, dinoterbe). En fait ce fongicide anti-oïdium est un ester lipophile qui est piégé par la cuticule des plantes mais qui, dans les cellules fongiques, subit une hydrolyse libérant la fonction phénol indispensable à l'effet découplant.

I-2-2-Fongicides inhibiteurs de la biosynthèse des stérols

Les stérols sont largement distribués chez les eucaryotes. Ils représentent des composés essentiels des membranes cellulaires, dont ils régulent la fluidité. Ce sont notamment le cholestérol chez les vertébrés, les stigmastérols chez les végétaux et l'ergostérol chez de nombreux champignons. Les stérols fongiques sont synthétisés dans le cytoplasme et les phases terminales qui vont du lanostérol à l'ergostérol sont catalysées par des enzymes microsomales (figure 3). De nombreux fongicides à usage agricole et médical sont des inhibiteurs de la biosynthèse de stérols (IBS). Ces IBS n'affectent pas la germination des spores seulement mais inhibent fortement l'élongation des hyphes mycéliens.

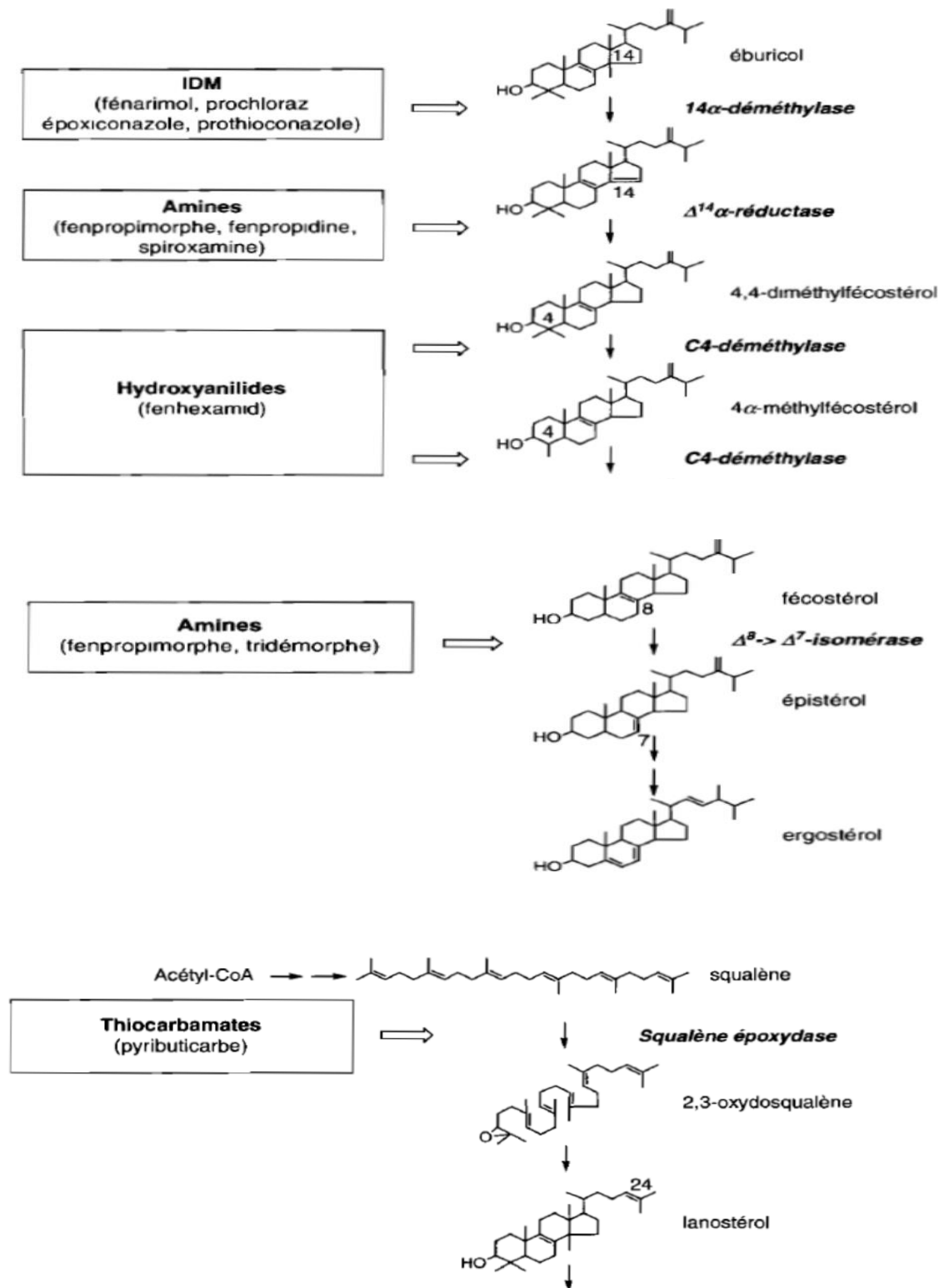


Figure 3 : Cibles de fongicides inhibiteurs de la biosynthèse de stérols (IBS) (Regnault-Roger et al ; 2005).

Les inhibiteurs des stérols agissent à plusieurs niveaux :

- **Les inhibiteurs de la squalène époxydase**

Les inhibiteurs de la squalène époxydase sont principalement utilisés dans le domaine médical ; ils appartiennent à deux familles chimiques, les thiocarbamates (tolnaftate) et les allylamines (naftifine). Quand au pyributicarbe, c'est un thiocarbamate développée sur le riz, à la fois comme herbicide et fongicide. L'inhibition d'une enzyme conduit à une déficience en ergostérol et à une accumulation de ses précurseurs en amont de l'inhibition, deux effets qui entraînent l'altération de la membrane.

- **Les inhibiteurs de la C14 déméthylase**

Ce groupe d'IBS nommé IDM (Inhibiteurs de déméthylase) est très largement utilisé en agriculture. Ces IDM renferment un hétérocycle qui peut être un imidazole (prochlorage), une pyrimidine (fénarimol), une pyridine (pyrifénox) ou un triazole (époxyconazol, tébuconazol). La C14 déméthylation des stérols implique une monooxygénase à cytochrome P450 qui catalyse trois oxydations successives du C14 méthyl de l'éburicol avant son élimination. Les IDM forment un complexe avec le cytochrome P450 qui résulte de la liaison d'une paire d'électrons non liants d'un atome d'azote de l'hétérocycle du fongicide avec le fer hémique. Outre ce ligand, il existe également des interactions de l'IDM avec le site de fixation du substrat stérolique (éburicol) sur l'apoprotéine.

- **Les inhibiteurs de la C14 réductase et de la C8-7 isomérase**

Cette classe d'IBS est constituée de matières actives comportant une fonction amine protonée à des pH biologiques. Cette fonction amine se trouve généralement incluse dans un hétérocycle qui peut être une morpholine (tridémorphe) ou une pipéridine (fenpropidine).

Ce second groupe de fongicides présente des propriétés voisines des IDM avec cependant une spécificité plus marquée pour les oidiums. Ces amines sont susceptibles d'inhiber à la fois la C14 réductase et la C8-7 isomérase. Ainsi pour la tridémorphe, la cible principale serait la C8-7 isomérase, tandis que pour la fenpropimorphe et la spiroxamine, la C14 réductase serait dominante. Quant au fenpropimorphe, selon les champignons, il affecterait l'une ou l'autre

des cibles. Au cours de la C14 réduction et de la C8-7 isomérisation, ils se forment des stérols intermédiaires à haute énergie possédant un carbocation (en position 8 ou 14). Comme ces amines sont susceptibles d'être protonées, donc de présenter une charge positive, elles se comportent comme des analogues structuraux des stérols à carbocation et inactivent ainsi les enzymes en cause.

I-2-3-Fongicides anti-microtubules

Les microtubules sont des constituants majeurs du cytosquelette et du fuseau achromatique. Chez les champignons, les substances interférant avec la formation et le fonctionnement de ces microtubules entraînent un arrêt de l'élongation des hyphes et induit d'importantes déformations. L'un des composants majeurs de ces microtubules est la tubuline, un hétérodimère protéique constitué de deux sous unités α et β . Il semble que la plupart des fongicides anti-microtubules actuels ont la capacité de se fixer sur la β tubuline (figure 4). Le pencycuron (figure 4) est une urée substituée, non systémique, douée d'une grande spécificité puisqu'il n'est efficace que sur *Rhizoctonia solani*. Il s'utilise sur le riz, la pomme de terre et des cultures ornementales et n'est actif que sur certains groupes d'anastomoses.

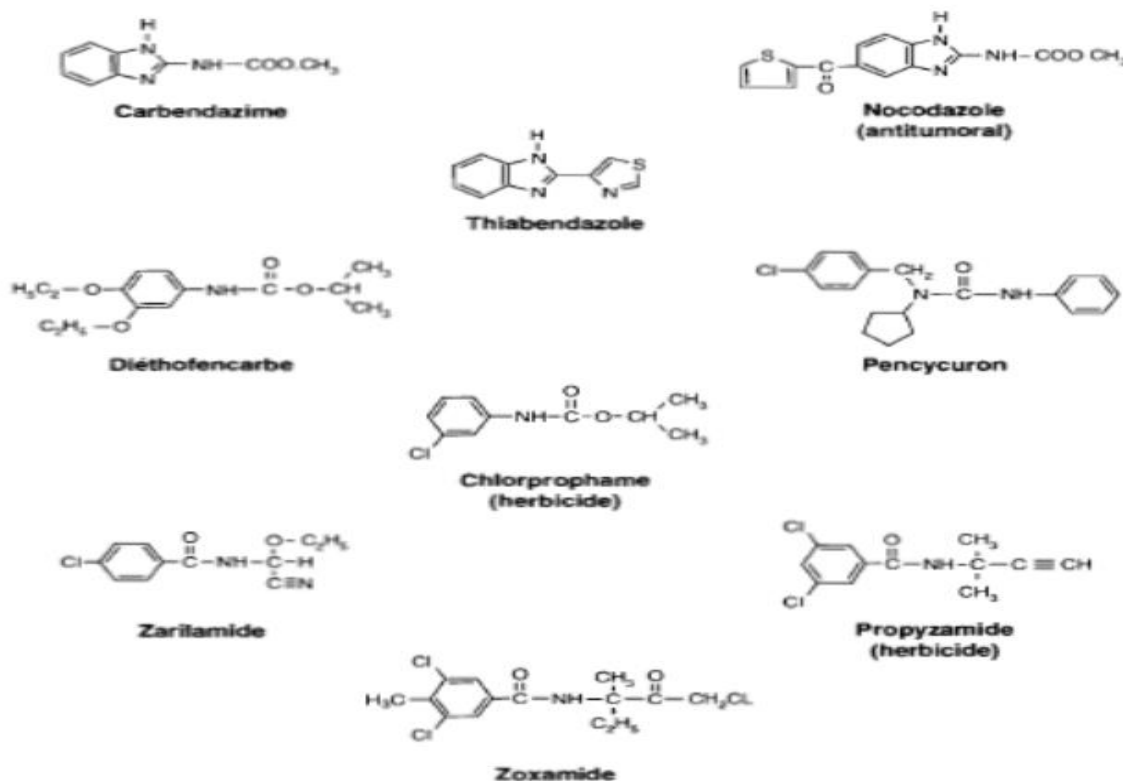


Figure 4 : Fongicides anti microtubules (Leroux, 2005).

I-2-4-Autres Fongicides

- **Inducteurs de résistance des plantes aux parasites**

En cas d'attaques parasitaires, les plantes mettent en place des systèmes de défense qui sont susceptibles de confiner et parfois de tuer le parasite à son site d'attaque. Cette défense active implique notamment la production de phytoalexines qui sont des métabolites secondaires toxiques pour les micro-organismes. De plus, les parois des cellules végétales peuvent être renforcées par le dépôt de diverses macromolécules (protéines riches en prolines, callose, lignine). Enfin, il y a production d'un grand nombre de protéines de défense dénommées protéines PR (*pathogenesis related*) qui présentent des activités antimicrobiennes. Ainsi, certaines perforent les membranes cytoplasmiques, d'autres sont capables d'hydrolyser des polysaccharides pariétaux (glucanases, chitinases) et quelques-unes peuvent inhiber des enzymes fongiques.

- **Inhibiteurs de l'ARN polymérase 1**

Les phénylamides (bénalaxyl, métalaxyl, ofurace, oxadixyl) sont des fongicides systémiques apoplastiques spécifiques des oomycètes et ils se caractérisent par une excellente activité curative. Leurs premières utilisations remontent au milieu des années 70 et leur découverte résulte du programme de recherche sur des herbicides de la famille des chloroacétanilides ayant abouti notamment au métolachlore. Cette matière active, comme d'ailleurs le métalaxyl, comporte un atome de carbone asymétrique et il a été montré que seul un des deux énantiomères présente une activité biologique.

- **Inhibiteurs de la biosynthèse d'acides aminés**

Le cyprodinil, le mépanipirim et le pyriméthanil (figure 6) sont trois anilinopyrimidines efficaces essentiellement contre des ascomycètes. Elles ont été introduites au milieu des années 90 et s'utilisent à des doses comprises entre 200 et 1 000 g.ha⁻¹. Les maladies visées sont notamment la pourriture grise, la tavelure des arbres fruitiers ; le cyprodinil s'applique aussi sur céréales, contre notamment le piétin-verse. Elles agissent surtout de façon préventive en empêchant la pénétration du champignon dans les tissus des plantes hôtes ; une légère curativité est parfois constatée.

CHAPITRE II : Mode d'action et sélectivité des herbicides

Introduction

Le mode d'action des herbicides est la succession des événements qui concourent à la destruction ou à l'arrêt de croissance des plantes cibles : absorption par ces dernières, éventuelle migration vers les tissus cibles et interaction avec la cible biochimique.

II-1-Définition des herbicides

On nomme herbicides les produits dont l'ingrédient actif induit une action qui diminue la vitalité des espèces végétales que l'on cherche à gérer ou éliminer, appelés aussi adventices ou mauvaises herbes. Certains ne sont pas mortels à la dose d'application ; toutefois, ils inhibent assez la croissance et le développement des plantes affectées pour les empêcher de nuire à la récolte.

II-2-Absorption des herbicides par les végétaux

II-2-1-Les herbicides à pénétration racinaire

L'absorption d'un herbicide par le sol peut se faire par diffusion dans les tissus souterrains des plantes tels que les racines, les graines ou les semis. On évoque ici les herbicides systémiques qui se propagent à travers la plante depuis les points d'entrée jusqu'aux zones d'action. Ces herbicides ont un impact significatif sur la flore puisqu'ils sont répartis dans l'ensemble de la plante ou dans une région spécifique. Il s'agit des traitements de pré-levée.

Un autre mode d'absorption est un flux de masse qui se produit après la pénétration de l'eau dans la zone des poils absorbants. C'est à ce niveau que les herbicides font face à une barrière de diffusion constituée de cellules présentant des parois imperméables. Pour que les herbicides atteignent le centre, ils doivent d'abord passer à travers ces cellules et, par extension, la membrane phospholipidique. Ainsi, les propriétés lipophiles des molécules d'herbicides ont une influence significative. Lors de ce transfert, on privilégie les herbicides neutres et lipophiles en raison de leur capacité à traverser facilement les membranes biologiques des cellules racinaires grâce à ces caractéristiques.

Parmi les familles des herbicides à pénétration racinaire il y a : triazines, urées substituées, triazinones, uraciles, carbamates, thiocarbamates, diphenyléthers et les amides.

II-2-2-Les herbicides à pénétration aériennes

Ce sont des herbicides de contact qui pénètrent dans la plante à travers les feuilles, leur absorption s'effectue par diffusion à travers la cuticule où la pénétration par les stomates est

négligeable. Ils détruisent les première couches de cellules atteintes ce qui bloque toute diffusion aux organes plus lointains.

L'absorption par les feuilles est un processus physique soumis à l'influence de la physiologie de la plante c'est-à-dire l'affinité de la substance pour les cires de la cuticule (lipophilie), son point de fusion (plus celui-ci est bas, meilleure sera la pénétration) et la vitesse à laquelle la substance est métabolisée par la plante (plus ce processus est rapide, plus la pénétration est accélérée). Les applications d'herbicides à pénétration foliaire se font après l'émergence de la plante, ce qui est appelé le traitement de post-levée.

D'autres facteurs influant la pénétration foliaire des herbicides sont ceux qui interviennent au moment du traitement, avec les conditions météorologiques lors de l'application comme le vent, le rosé, ainsi que les caractéristiques de la pulvérisation et la formulation (enjeux phyto). Parmi les familles d'herbicides appartenant à cette classe on peut citer : les nitrophénols, acides phénoxyalcanoïques, sulfonyles, cyclohexane diones, diphényléthers.

II-3-Sites d'action des herbicides

L'action d'un herbicide résulte de son interaction avec une cible biochimique, parfois de plusieurs. La conséquence est généralement le blocage d'une fonction, avec des répercussions dommageables pour la cellule végétale et in fine l'organisme entier. On recense à ce jour dix-neuf cibles connues d'herbicides, désignée chacune par des lettres de A à P (tableau 1).

Code	Cible
A	Acétyl-coenzyme A carboxylase
B	Acétolactate synthase
C	Transfert d'électrons photosynthétique (inhibition)
D	Transfert d'électrons photosynthétique (diversion d'électrons)
E	Protoporphyrinogène oxydase
F ₁	Phytoène désaturase
F ₂	4-hydroxyphénylpyruvate dioxygénase
F ₃	Pigments, cible inconnue
F ₄	1-desoxy-D-xylulose 5-phosphate
G	Énolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase
H	Glutamine synthase
I	7,8-dihydroptéroate synthase
K ₁	Division cellulaire : assemblage des microtubules
K ₂	Division cellulaire : organisation des microtubules
K ₃	Élongation des acides gras
L	Synthèse de la cellulose
M	Membranes cellulaires
N	Élongation des acides gras
O	Récepteur de l'auxine
P	Transport de l'auxine

Tableau 1 : Cibles biochimiques des herbicides (Gauvrit, 1996).

II-3-1-Herbicides inhibiteurs de la photosynthèse

- **Inhibiteurs de transfert d'électrons :**

Les amides, bentazone, nitriles, phénylcarbamates, triazines, triazinons, uraciles et urées substituées, ces herbicides agissant sur le photosystème II de la chaîne de transfert d'électron dans la chloroplaste. Les herbicides inhibiteurs du PSII agissent en s'incorporant au système de transport d'électrons situé dans la membrane des thylacoides. Ils se comportent comme de véritables barrages du courant d'électrons au niveau de la plastoquinone. Ces herbicides agissent donc par compétition avec la plastoquinone pour un site d'affinité localisé dans une protéine : la protéine B.

Ainsi, dans le cadre de la chaîne de transfert d'électrons, la plastoquinone réduite ne peut plus utiliser le site d'affinité situé sur la protéine cible et elle ne transmet pas son électron à l'accepteur suivant. Le transfert est bloqué. L'énergie lumineuse reçue par la chlorophylle n'est plus convertie en énergie électronique. Elle est dissipée sous forme de chaleur. L'inhibition du PSII entraîne dans un premier temps l'arrêt du dégagement d'oxygène et de fixation du CO₂. Mais il ne s'agit pas simplement d'une mort de faim de la plante. En effet, les chlorophylles excitées permettent la production d'oxygène singulet, forme très réactive, normalement inactivée par les caroténoïdes en formant des époxydes qui sont réduits ensuite par le NADPH produit par le transfert non cyclique d'électrons. Les herbicides inhibant le PSII en bloquant le transfert d'électrons, l'oxygène singulet va rester actif et entraînera la destruction oxydative des constituants du thylacoïde, dont les pigments. De plus, l'arrêt du transfert non cyclique entraîne celui de la nitrite-réductase, ce qui génère une accumulation de nitrites toxiques.

- **Inhibiteurs du PSI**

Le principal herbicide inhibiteur de cette fonction fait partie de la famille des bipyridyles dont leur site d'action situé dans les chloroplastes, précisément au niveau du photosystème I (PSI). Les électrons libres du photosystème I interagissent avec l'ion de paraquat produisant ainsi le radical libre. L'oxygène retransforme rapidement ce radical libre en produisant des superoxydes lors de ce processus. Dotés d'une forte réactivité chimique, les superoxydes attaquent les acides gras non saturés de la membrane, provoquant ainsi l'ouverture et la désintégration rapide des membranes et des tissus cellulaires. Le processus ion de paraquat/radical libre se recycle alors, produisant de nouvelles quantités de superoxyde jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'électrons libres.

II-3-2-Les herbicides auxiniques : une action ``auxin-like``

A faible doses, les herbicides auxiniques, dont le dicamba, un acide benzoïque, agissent de manière similaire à l'auxine naturelle (acide indolacétique). A fortes doses, les plantes ne sont pas capables de réguler leur concentration dans les différents tissus, où ils occasionnent alors des perturbations de croissance. On observe des symptômes d'épinastie (courbure des tissus en croissance) qui peuvent être spectaculaires avec de véritables enroulements de la tige. Il se produit aussi des fasciations (épaississements des tiges) qui résultent de proliférations cellulaires dans les cambiums. On considère que cette action est souvent responsable de la mort des plantes traitées car les cambiums étant situés au niveau des systèmes vasculaires, leur développement anarchique comprime les vaisseaux et déprime les mouvements de sève. Dans les cas extrêmes, les déchirures apparaissent sur la tige, par lesquelles pénètrent des microorganismes. Les monocotylédones ne possèdent pas de cambiums, elles sont moins sensibles aux herbicides auxiniques que les dicotylédones. Les herbicides responsables de ce site d'action sont également des acides phénoxy-carboxyliques, acides benzoïques. En plus des inhibiteurs de cette fonction il y a aussi des inhibiteurs de transport de l'auxine nommée **cible P**, dont le naptalame.

II-3-3-Herbicides agissant sur les membranes cellulaires

Les herbicides responsables de cette fonction sont principalement les phénols nitrés (dinitrophénols et hydroxybenzonitriles). L'action de ces substances consiste dans la perméabilisation des membranes végétales également les membranes mitochondriales aux ions H^+ en les transportant à travers ces dernières. Ils produisent une entrée massive d'ions H^+ dans le cytosol qui a un pH neutre ce qui bloque la synthèse d'ATP nécessaire pour le fonctionnement de l'ATPase, régulateur de la neutralité de cytosol (expulsion de H^+ du cytosol) et il en résulte une mort rapide de la cellule.

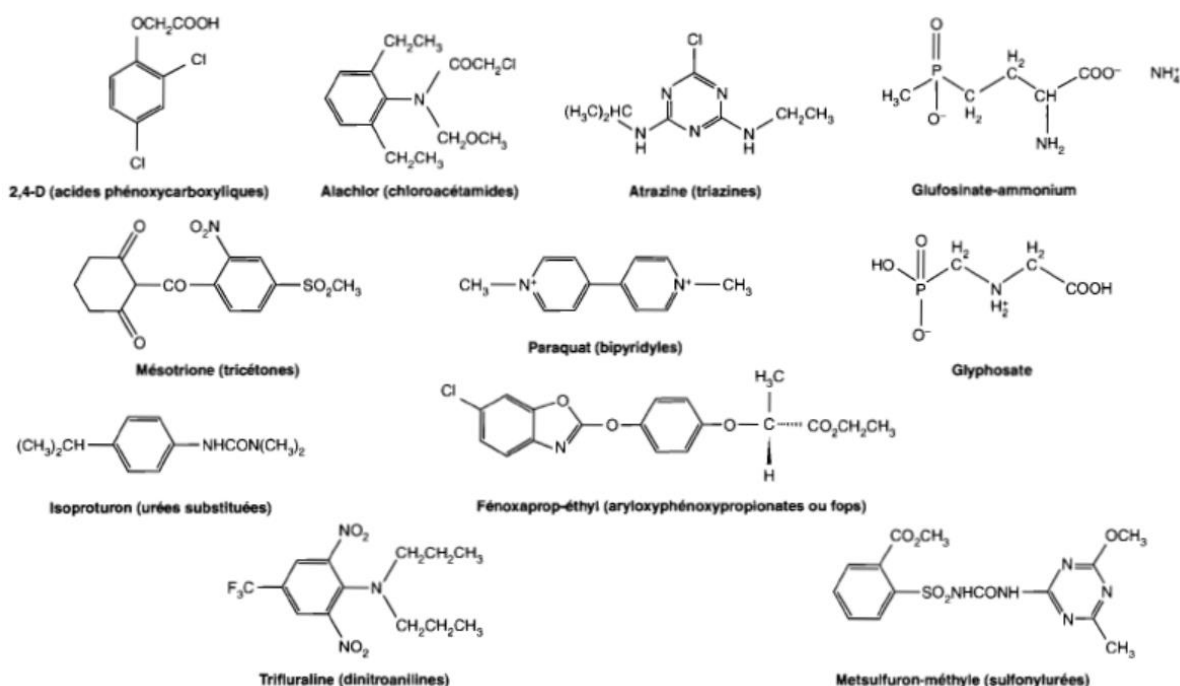


Figure 5 : Principaux herbicides (Gauvrit, 1996).

II-3-4-Herbicides inhibiteurs de la synthèse des acides aminés

- Voies de synthèse des acides aminés les plantes**

L'ammonium, aussi bien issu de la réduction des nitrates que celui provenant du métabolisme photorespiratoire, et de la dégradation des acides aminés, entre dans le métabolisme aboutissant à la formation de glutamine et de glutamate. Tous les autres acides aminés seront synthétisés, essentiellement par transamination, à partir de ces deux acides aminés donateurs d'azote réduit.

Les aminoacides chez les plantes dérivent de précurseurs peu nombreux. Suivant les précurseurs, on distingue plusieurs familles d'acides aminés : famille du glutamate (glutamine, arginine, proline), famille de l'aspartate (asparagine, thréonine, méthionine, lysine, isoleucine), famille du pyruvate (valine, leucine, alanine), famille de la sérine (glycine, sérine, cystéine), famille du shikimate (tyrosine, phénylalanine, tryptophane). Toutefois les voies de synthèse des acides aminés sont complexes, elles sont très souvent branchées, c'est-à-dire que plusieurs acides aminés peuvent être issus d'un même précurseur.

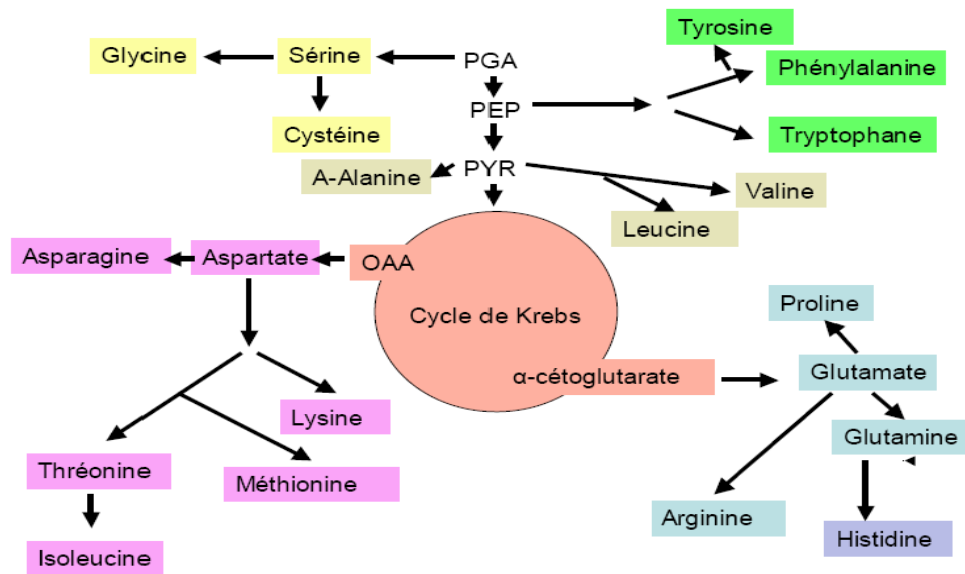


Figure 6 : Voies de synthèse des acides aminés chez les plantes

- **Les inhibiteurs de la glutamine synthétase (GS) :**

Le site d'action de ces inhibiteurs nommés **cible H**, dont l'herbicide responsable est le glyphosate-ammonium (famille des acides phosphoniques). Ce dernier présente des formes cytosolique et chloroplastique, et condense l'ammonium sur le glutamate et qui se fixe sur l'enzyme en compétition avec le glutamate et, une fois lié, il est phosphorylé par l'ATP, ce qui rend sa liaison avec l'enzyme irréversible.

- **Les inhibiteurs de l'acétolactate synthétase (ALS)**

Cette enzyme est située au début des chaînes métaboliques conduisant à la biosynthèse des acides aminés branchés leucine, isoleucine et valine. Plusieurs familles de produits agissent sur l'ALS ou l'acétohydroxyacide-synthétase (AHAS). Il s'agit des sulfonylurées, imidazolinones triazolopyrimidines sulfonates et pyrimidinoloxyméthylbenzoate dont le site d'action est distinct du site de fixation substrat. De manière générale, ces produits sont peu adsorbés par le sol, donc très mobiles : seule une application à faible dose permet d'éviter une contamination importante des eaux.

- **Les inhibiteurs de la synthèse des acides aminés aromatiques**

Le glyphosate inhibe la énoypyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSP), qui intervient dans la synthèse des acides aminés aromatiques (tyrosine, phénylalanine et tryptophane). L'EPSP catalyse la condensation du shikimate-3-phosphate et du phosphoénoypyruvate en 5-

énolpyruylshikimate-3-phosphate. Le glyphosate se fixe sur le site actif du phosphoénolpyruvate et exerce une inhibition compétitive et bloque la synthèse protéique avec des répercussions diverses, par exemple le tryptophane se trouve dans la voie de synthèse de l'auxine, la phénylalanine sert à la production de lignine qui soutient la plante. Le sulfosate est un produit récent voisin du glyphosate dont l'action est similaire.

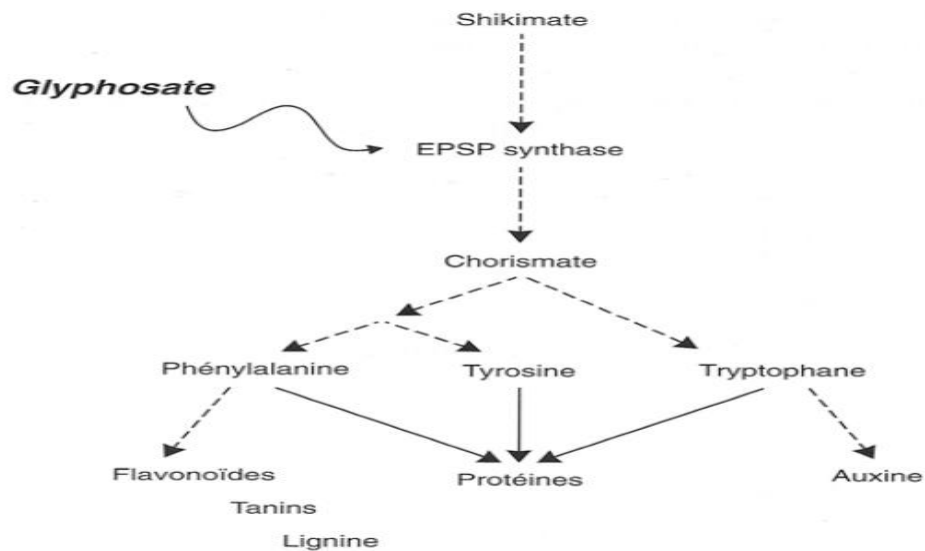


Figure 7 : Site d'action du glyphosate dans la voie du shikimate (Regnault-Roger et al ; 2005)

CHAPITRE III : Les insecticides

Introduction

Un insecticide chimique est un produit issu de la synthèse chimique (composé synthétique ou héli-synthétique) qui a la propriété de tuer les insectes, à court ou à long terme. Les insecticides organiques de synthèse sont des molécules carbonées synthétisées et se distinguent des insecticides inorganiques ou minéraux.

III-1-Principales familles d'insecticides organiques et conditions d'utilisation

Les organochlorés, organophosphorés, carbamates et pyréthri-noïdes représentent la grande majorité des insecticides organiques de synthèse qui ont été employés ou sont utilisés actuellement (figure 8).

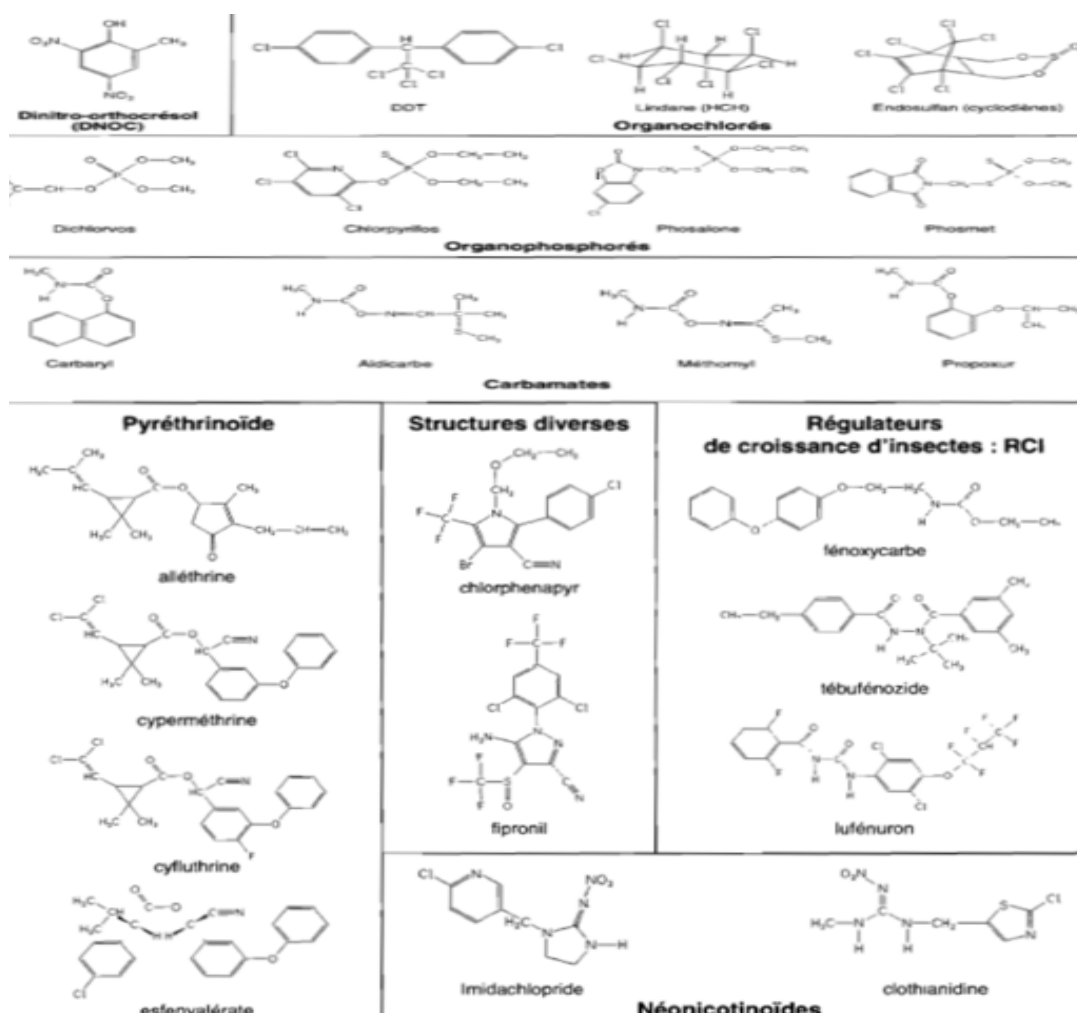


Figure 8 : Principaux insecticides organiques de synthèse (Wood, 2004).

III-1-1-Les organochlorés

Ces insecticides possèdent dans leur structure au moins une liaison carbone chlore. On distingue trois familles d'insecticides organochlorés : celles du DDT et des HCH (hexachlorocyclohexane) ainsi que les cyclodiènes. Les organochlorés ont pris une place prépondérante dans la lutte chimique grâce au succès spectaculaire du DDT, rappelé précédemment. Breveté en 1942 et produit commercialement depuis 1944 (OMS, 1982), le DDT a permis de lutter efficacement contre les arthropodes généralement associés aux concentrations de troupes militaires (poux, tiques, puces) et contre les moustiques vecteurs de malaria, du typhus, de la fièvre jaune et de la peste, contribuant même à l'éradication du paludisme dans le sud de l'Europe et dans plusieurs îles tropicales.

Comme tous les organochlorés, le DDT et ses composés apparentés se caractérisent par leur stabilité chimique, leur apolarité et leur lipophilie. Substances neurotoxiques, ils affectent autant le système nerveux des insectes que celui des autres animaux. Ils sont toutefois séquestrés dans les compartiments lipidiques des organismes.

La deuxième famille est celle des HCH ($C_6H_6Cl_6$). Anciennement ces composés étaient répertoriés comme dérivés du benzène (Benzènehexachloride : BHC). Elle est composée de cinq isomères mais seul le lindane (isomère γ) est actif contre les arthropodes.

Le lindane est plus volatil et soluble que le DDT. C'est un insecticide de contact mais il peut être aussi toxique par ingestion que par inhalation. Moins persistant que le DDT, le lindane semblait devoir échapper aux restrictions (Brooks, 1990), et a longtemps été autorisé comme insecticide. Ce n'est qu'en 2002 que son emploi a été définitivement interdit dans l'Union européenne.

Le groupe des cyclodiènes, qui comprend les chlordane, aldrine, dieldrine, endosulfan, heptachlore et mirex, a été découvert en 1945. Persistants, ces composés ont été utilisés pour combattre les insectes nuisibles du sol et les termites. Ainsi, il a été constaté que des bois traités contre les termites avec de l'aldrine ou du dieldrine dans les années 50 étaient encore exempts de dommage en 2002.

III-1-2-Les organophosphorés

Ils sont tous des dérivés de l'acide phosphorique. La majorité est soluble dans les solvants organiques et insoluble dans l'eau, alors que quelques-uns comme le dichlorvos sont volatils. Neurotoxiques, les organophosphorés regroupent les insecticides les plus toxiques envers les

mammifères. Par contre, ils ne sont pas persistants comme les organochlorés, caractéristique qui leur a permis dès les années 50 de remplacer ces derniers en agriculture contre les insectes et les acariens.

Les organophosphorés restent encore aujourd'hui la famille d'insecticides organiques de synthèse la plus employée sans doute à cause d'un large éventail de modes d'action et de multiples possibilités dans leurs applications. Ils sont en effet utilisés aussi bien pour les traitements foliaires que pour la protection antiparasitaire du bétail. Selon *Pesticide News* (anonyme, 1998), le chlorpyrifos, organophosphoré en usage depuis 1966, est l'insecticide le plus utilisé - en volume cumulé - dans le monde sur plus de 50 cultures dont les maïs, coton, et luzerne.

III-1-3-Les carbamates

Le remplacement des organochlorés a été accéléré par l'apparition et l'utilisation des carbamates, composés dérivés de l'acide carbamique. le carbaryl, insecticide de contact et *per os*, à large spectre d'activité et à toxicité relativement faible envers les mammifères, allait devenir rapidement le carbamate de choix partout dans le monde. Chimiquement, les carbamates peuvent se classer en trois groupes, selon qu'ils sont carbocycliques tel le carbaryl, hétérocyclique comme le pyrimicarbe, ou aliphatiques comme l'aldicarbe.

III-1-4-Les pyréthrinoïdes

Ils présentent le groupe des dérivés du pyrèthre, composé extrait du chrysanthème *Chrysanthemum cinaerarefolium*. Cependant, ce biopesticide n'a jamais pu être utilisé en agriculture à cause de sa labilité en présence de la lumière solaire. La grande majorité des pyréthrinoïdes sont des esters : 49 molécules pour 5 pyréthrinoïdes éthers. Les pyréthrinoïdes sont des neurotoxiques dont le mode d'action s'apparente à celui des organochlorés, affectant à la fois le système nerveux central et le système périphérique. Ce sont des insecticides résiduels de contact. le succès des pyréthrinoïdes de synthèse est dû à trois raisons:

- leur photostabilité ;
- leur plus grande toxicité envers les insectes, ce qui permet d'utiliser des doses plus faibles;
- leur moindre coût comparé à celui des pyréthrines naturelles.

III-1-5-Les néonicotinoïdes

Malgré leur nom, ces insecticides ne sont pas des dérivés de la nicotine, alcaloïde neurotoxique d'origine végétale. Ils sont appelés ainsi en raison de leur mode d'action neurotoxique car ils interviennent au niveau des récepteurs nicotiniques post-synaptiques. Ces insecticides visent à remplacer les organophosphorés et les carbamates comme produits systémiques efficaces contre les insectes phytophages piqueurs-suceurs. Mais ils sont également utilisés contre les insectes vecteurs de maladies affectant les animaux.

III-2-Action des insecticides sur les organismes

III-2-1-Action sur le système nerveux

Les insecticides neuroactifs représentent la grande majorité des composés exploités sur les insectes et dominent le marché depuis un demi-siècle. La neurotoxicité se manifeste par le blocage de la propagation de l'influx nerveux, tant au niveau du système nerveux central (SNC) que périphérique au niveau des neurones et synapses. Les symptômes d'intoxication par les substances neurotoxiques présentent les phases successives : période de latence, hyperexcitation, manque de coordination, tremblements, convulsions, prostration, mort.

- **Action sur la transmission axonale de l'influx nerveux**

Une première cible biochimique est la perturbation de la transmission de l'influx nerveux le long des axones. Cette toxicité résulte de l'action de certains organochlorés comme le DDT ou les cyclodiènes ainsi que des pyréthriinoïdes. Le DDT dérègle l'équilibre entre les ions sodium et potassium. Son site principal d'action est le canal sodium dont l'insecticide ralentit ou bloque la fermeture. Il perturbe la sortie de K⁺. La combinaison de ces deux effets, ainsi qu'une inhibition de l'ATPase associée au fonctionnement de la pompe sodium-potassium, conduit à une prolongation de la phase descendante, ce qui provoque une contraction permanente des muscles, des convulsions et la mort.

Les pyréthriinoïdes de synthèse agissent par des modes d'action similaires au DDT et sont considérés comme des « poisons axoniques ». Ils gardent ouverts les canaux sodium mais se fixent sur un site différent de celui des organochlorés. On distingue deux types d'action des pyréthriinoïdes : les pyréthriinoïdes de type I (alléthrine, tétraméthrine) qui provoquent un tremor et une hyperexcitabilité tandis que le type II (fenvalérate, fluvalinate) conduit à l'incoordination des mouvements.

- **Action sur les synapses**

Le mode d'action le plus ancien qui a été décrit concerne les synapses cholinergiques. En effet, ces synapses sont les cibles de la toxicité des organophosphorés et des carbamates. Ces composés sont des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase. Lorsque les insecticides neurotoxiques atteignent les synapses, ils inactivent l'acétylcholinestérase, et par le fait même, empêchent la dégradation de l'acétylcholine. Ce neurotransmetteur s'accumule alors dans les synapses et provoque une hyperexcitation qui conduit à la mort.

III-2-2-Régulateurs de croissance de l'insecte

Plusieurs catégories de composés sont distinguées selon leurs cibles physiologiques:

- les analogues et mimétiques des hormones juvéniles. Ils ont une structure analogue à celles des hormones juvéniles qui sont des sesquiterpènes avec des groupements époxyde et méthyl-ester ou reproduisent les effets physiologiques des hormones juvéniles.
- les inhibiteurs de mue et les déclencheurs de mue (*moulting disruptant*). Le diofénolan (Aware®, Context®), qui interrompt le développement larvaire de l'insecte, appartient à la première catégorie tandis que les agonistes de l'ecdysone se rangent dans la deuxième et déclenchent prématurément la mue de l'animal.
- Ils existent des familles chimiques d'insecticides qui agissent sur la synthèse de la chitine. Elles interviennent aussi sur des cibles hormonales (ecdysone) ou sur des médiateurs chimiques comme les prostaglandines. C'est le cas des thiadiazinones (<< *thiadiazine-like* ») comme la buprofézine (Applaud®, Maestro®).

III-3-Perspectives pour l'utilisation des insecticides

La lutte insecticide est un outil essentiel de la prévention contre les maladies à vecteurs et de contrôle des insectes nuisibles. C'est même dans certains cas le seul disponible. Des progrès significatifs ont été faits dans la mise au point de méthodes de lutte plus sélectives et impliquant directement les communautés. Les perspectives d'utilisation des insecticides se traduisent par une diminution progressive de l'emploi des produits de synthèse en raison des préoccupations sanitaires et environnementales, au profit de méthodes de lutte alternatives et de produits plus ciblés. Cependant, ils restent essentiels pour certaines applications, notamment la lutte contre les maladies transmises par les vecteurs, où de nouvelles stratégies sont nécessaires pour gérer la résistance. L'avenir verra une intégration de technologies « intelligentes », de variétés végétales résistantes et de méthodes de lutte intégrée.

CHAPITRE IV : Les nématicides

Introduction

L'emploi de nématicides vise avant tout à protéger les plantes en combattant les nématodes phytoparasites qui leur portent atteinte. L'élimination des nématodes requiert l'emploi de quantités importantes de nématicides. En outre, dans la plupart des situations, les nématodes ciblés résident dans le sol, et il est essentiel que les nématicides soient en mesure de leur atteindre.

IV- 1-Familles et conditions d'utilisation

Les produits nématicides utilisés appartiennent à quatre grandes familles chimiques:

- la plus ancienne est représentée par des produits organohalogénés à base de brome ou de chlore. Ces produits sont essentiellement utilisés en traitement de sol comme fumigants mais le bromure de méthyle est également utilisé pour la désinfection des graines.
- la deuxième famille correspond à celle des thiocyanates et dérivés soufrés. Répartis dans ou sur le sol, ils (ou leurs produits de dégradations) diffusent dans le sol sous forme vapeur. Ils sont classiquement désignés comme fumigants ou précurseurs de fumigants ;
- la troisième famille, plus récente, est celle des organophosphorés connus pour leur activité sur les insectes. Ils s'avèrent, pour certains, efficaces contre les nématodes par augmentation des doses ;
- la plus récente correspond à la famille des carbamates avec les mêmes indications de cibles et de doses que pour les organophosphorés ;
- enfin, reste ancestral de certaines matières actives inclassables, on trouve le sulfure de carbone, actuellement présent sous forme de tétrathiocarbonate de sodium qui agit comme fumigant dans le sol par dégagement de ce composé.

IV-2-Action des nématicides sur les organismes

Il existe trois méthodes pour évaluer l'efficacité des nématicides :

- La première consiste à évaluer la mortalité des nématodes provoquée par les applications. L'efficacité des différentes substances actives peut varier, en tenant compte des problématiques associés à l'utilisation des divers types de produits anti-nématodes. Dans les conditions idéales, on peut considérer que la mortalité induite par les nématicides, directe par

les fumigants, directe et indirecte avec les organo-phosphorés et carbamates, est de l'ordre de 80 %. Elle semble être toujours supérieure avec les non-fumigants. Elle peut être considérablement diminuée, dès lors que les conditions d'application et de nature des sols ne sont pas optimales.

-L'efficacité des nématicides peut être déterminée en fonction du rendement amélioré des cultures, qui n'est pas forcément lié à la mortalité causée par la substance active. L'application appropriée de nématicide contre une ou plusieurs espèces nuisibles entraîne nécessairement une diminution des dommages. En outre, il existe le phénomène de phytostimulation par les fumigants. L'efficacité de la phytostimulation est d'autant plus marquée que les interventions se font sur des sols déficients et pauvres en nutriments.

-Enfin, on peut mesurer l'efficacité de ces composés en terme de dynamique des populations. En effet, il faut se poser les questions suivantes : la mortalité engendrée par le traitement est-elle contrebalancée par la multiplication des nématodes survivants sur la plante protégée ? L'expérience montre que, à part le bromure de méthyle, ce n'est pratiquement jamais le cas.

IV-3-Perspectives pour l'utilisation des nématicides

L'usage et l'application de divers fumigants, comme le 1-3 dichloropropène, n'ont pas été impactés par l'interdiction des organochlorés. Cela fait plus de dix ans que la question de l'avenir des fumigants est posée ; le bromure de méthyle en est la principale cible. Les organophosphorés sont aussi visés par les directives européennes mais l'éthoprophos ne semble pas menacé. Les restrictions d'usage sur l'aldicarbe sont devenues extrêmement fortes. En zone d'agriculture tempérée, il convient d'envisager à très court terme l'impossibilité légale de désinfecter un sol de ses nématodes avec d'autres matières actives que celles que l'on trouve encore pour un temps parmi les fumigants et leurs précurseurs. Une désinfection de sol correspond à une opération financière lourde. Il est quasiment impossible d'indiquer un coût donné, tant celui-ci peut varier d'une région à une autre. Au niveau européen, il n'y a pas d'harmonisation des prix et selon le pays où l'on se trouve, une matière active coûtera plus ou moins cher. Des estimations sont cependant envisageables. Le traitement le plus onéreux est indiscutablement celui résultant du bromure de méthyle. Selon les doses, les fourchettes admises pour le coût d'un traitement se situent entre 4500 et 7600 € par hectare. Une désinfection réalisée avec d'autres fumigants, des précurseurs de fumigant, des organophosphorés ou des carbamates voit son coût varier de 450 à 1 500 € par hectare. Dans

ces conditions, le lecteur ne s'étonnera pas qu'une sélection ait été opérée dans les plantes protégées contre les nématodes.

CHAPITRE V : Les Phytohormones et Régulateurs de Croissance

Introduction

L'utilisation des substances de croissance en agriculture est relativement récente. Elle a débuté dans les années 60 avec l'emploi d'anti-germes sur pomme de terre et d'un réducteur de paille en céréales. Ces régulateurs de croissance sont utilisés en agriculture avant tout:

- pour modifier le potentiel de croissance et de rendement de la plante,
- pour faciliter la conduite de la culture,
- pour garantir la qualité de la récolte.

Effectivement, ces substances peuvent favoriser ou limiter le développement végétatif des parties aériennes, altérer leur ramification et également moduler la croissance et le rendement des organes reproductifs. Ces composés sont particulièrement bénéfiques pour la préservation des fruits post-récolte, car en altérant le processus métabolique des produits récoltés ils aident à réduire l'incidence et l'intensité des pathologies physiologiques.

V-1-Usages actuels des régulateurs de croissance

Ces molécules sont appliquées selon différents modes, sur tout ou partie de la plante à certains moments de son développement, en grandes cultures et en cultures légumières, arboriculture, viticulture, cultures décoratives et forestières, mais aussi dans les espaces herbacés cultivés ou non. Leur application a plusieurs objectifs:

- favoriser ou inhiber la germination, le bourgeonnement ou les repousses;
- faciliter la multiplication végétative, le bouturage et la transplantation;
- modifier le développement du système aérien, en hauteur, force et ramification, jusqu'à la défoliation;
- maîtriser la reproduction des plantes pour améliorer la qualité et/ou la quantité des produits, depuis l'induction florale jusqu'au stockage des organes récoltés.

Les molécules contenues dans les spécialités homologuées et utilisées en agriculture comme régulateurs se répartissent en 3 groupes principaux:

- les molécules à activité biologique naturelle, mais issus de synthèse chimique:

acide indolacétique, acide indolbutyrique (AIB), les acides gibbérelliques (GA3, GA4, GA7), et la zéatine. Elles sont utilisées comme hormones végétales;

- les molécules à propriétés auxiniques perturbantes comme l'ANA, le 2,4-D, le MCPA, l'acide 2,4,5-trichlorophénoxy-acétique (2,4,5-T) et l'acide méthylchlorophénoxypropionique (MCP), employées à faible concentration et utilisées à l'origine comme herbicides.

V-2-Effets physiologiques des principales substances de croissance végétale

La régulation physiologique des plantes est contrôlée par les phytohormones et d'autres molécules endogènes comme les polyamines. Ces molécules sont sous la dépendance d'événements génétiques et environnementaux qui influencent l'équilibre de ces métabolites.

• Effets des auxines

L'auxine est la première hormone à être découverte dans les plantes et un des premiers agents, sur une longue liste, de signalisation chimique qui régleme le développement des plantes. La forme d'auxine la plus courante survenant naturellement est – l'indole 3 -acétique (IAA).

Les conséquences physiologiques lors de l'usage agronomique sont les suivantes :

- stimulation de la rhizogenèse qui constitue la principale application des auxines destinées à favoriser le bouturage. Toutefois, l'application trop prolongée à la base de la bouture inhibe la croissance racinaire ;
- action sur la dominance apicale car l'auxine endogène issue du bourgeon terminal, ou son apport exogène, réprime le développement des bourgeons latéraux (ramification) ;
- effet sur le développement des fruits puisque l'auxine participe au développement du péricarpe des fruits charnus. L'ovaire sécrète de l'auxine en grande quantité après la pollinisation et induit la prolifération des tissus du péricarpe. Dans certains cas, l'apport d'auxine peut remplacer la pollinisation et permet d'obtenir des fruits parthénocarpiques (sans fécondation donc sans graine). Plusieurs herbicides à propriété auxinique sont utilisés pour favoriser le bouturage, le pincement chimique, la ramification, le retard à la maturation, ou encore la multiplication végétative et la culture *in vitro*. Leur utilisation est cruciale en pépinière et en horticulture.

- **Effets des cytokinines**

La zéatine, première cytokinine naturelle, est isolée à partir de semences de *Zea mays* ; depuis cette date, plus de 30 cytokinines ont été identifiées et isolées. Ces substances, combinées à l'auxine stimulent la division cellulaire végétale et orientent la différenciation cellulaire. Dans les plantes, les cytokinines sont libres ! ou associées à du ribose, ou liées à l'extrémité 3' de l'anti-codon des acides ribonucléiques de transfert (ARNt). La benzylaminopurine très active ne se lie pas ou peu aux ARNr. Les cytokinines sont impliquées dans la synthèse des protéines en activant l'ARN polymérase. Les régions de l'apex racinaire sont les sites essentiels de synthèse des cytokinines entraînées dans la plante par la sève brute. Les cytokinines sont complémentaires de l'auxine pour la croissance, mais antagonistes de l'auxine pour la différenciation des bourgeons et des racines. L'équilibre entre ces hormones contrôle la division cellulaire, la différenciation des plastides, l'inhibition de la sénescence des feuilles, et favorise le remplissage des grains de maïs. La dégradation par l'activité cytokinine oxydase (CKO) est importante dans la régulation de leurs teneurs chez les plantes.

- **Effets des gibbérellines**

Actuellement, 89 structures différentes ont été identifiées chez les végétaux, mais seulement 4 sont actives et appliquées en agriculture. Leur nomenclature va de GA1 à GA89, et leur biosynthèse a lieu dans les tissus en division comme les apex de jeunes pousses et de racines, les jeunes feuilles et l'embryon. Les gibbérellines peuvent migrer par le phloème et le xylème, et leur transport n'est pas polarisé. Elles peuvent être mises en réserve de façon temporaire sous forme de glycosides. Les principaux effets exploités en agriculture sont :

- l'allongement des entre-nœuds en stimulant à la fois la division et l'élongation cellulaire. Cet effet s'exerce aussi sur les tissus corticaux et épidermiques, insensibles à l'auxine. L'application de gibbérellines sur la canne à sucre induit une augmentation de rendement en sucre de l'ordre de 1 T/ ha ;
- la levée de la dormance des semences avec induction de la synthèse d'amylase dans les graines, et des bourgeons chez le pêcher ou le groseillier;
- l'entrée en dormance des bourgeons à l'automne par interactions avec l'acide abscissique
- l'augmentation de la taille des fruits, sur les variétés de raisin apyrène car les variétés avec pépins sont insensibles. Un apport de gibbérellines avant la nouaison, augmente la taille des fruits, et les pulvérisations au stade préfloral ou floral favorisent

l'élongation des pédoncules, réduisent le nombre de baies et augmentent la taille des fruits restants ;

- la stimulation de la croissance des feuilles et de la formation des fruits (pommes, poires, agrumes) par l'application de GA3 utilisée seule ou en association avec l'auxine.

V-3- Effets liés aux interactions biotiques et abiotiques

La racine est le support de l'interaction entre la plante, les bactéries et les minéraux du sol. Les micro-organismes saprophytes ou pathogènes du sol puisent leur source carbonée dans la rhizodéposition de la plante et entrent en compétition avec celles-ci pour les prélèvements minéraux. Certaines bactéries nommées PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria), peuvent pénétrer dans les racines, coloniser le système racinaire et modifier le métabolisme du végétal pour exercer un effet favorable à la croissance et au développement des plantes par des échanges métaboliques profitables pour les partenaires.

V-3-1- Effets associés à l'interaction plantes-micro-organismes

Les études actuelles dans ce domaine montrent des effets multiples sur la croissance et la santé des plantes. L'effet stimulateur de certaines bactéries peut s'opérer dès la germination des graines en activant la division cellulaire. L'inoculation de la bactérie *Azospirillum brasilense* au champ s'est traduite par :

- un avancement de l'épiaison et de la floraison chez le blé ;
- une augmentation du poids sec, des panicules chez le millet et des épis et des graines chez le maïs ;
- l'augmentation du rendement chez le soja ;
- l'élévation du contenu en azote des grains chez le maïs

V-3-2- Effets de l'interaction entre les phytohormones et les métaux

Les interconnexions entre les métaux et l'éthylène, que ce soit au niveau de sa biosynthèse ou de sa voie de signalisation, ont été démontrées en mettant en évidence une intervention du fer dans certaines étapes de la biosynthèse de l'éthylène. Des études biochimiques indiquent que l'enzyme ACC oxydase requiert la présence de fer comme cofacteur enzymatique de la synthèse d'éthylène et la perception de l'éthylène par la plante est dépendante des métaux de transition comme le cuivre.

V-4- Evolution et perspectives d'utilisation des régulateurs de croissance

Le développement des espaces verts et des jardinerie, lié à la politique de l'environnement, et à l'augmentation du temps de loisir, modifie les tendances de l'emploi des régulateurs.

L'augmentation de la demande en fourniture de plants d'ornement (cultures florales arbustives ou herbacées) pour les grandes villes, ou par les particuliers, se répercute sur les besoins en régulateurs de croissance intervenant sur le bouturage, l'enracinement ou la ramification. La conduite culturale en pépinière est soumise à des contraintes de marché saisonnier, et selon les circonstances, l'usage de substances de croissance est requis pour la défoliation ou la levée de dormance des ligneux. Pour contrôler la maturité des fruits, on peut, selon les cas, appliquer une gibbérelline, l'éthylène ou une auxine. Les études indiquent que l'existence d'interconnexions entre les différentes voies de signalisations hormonales aboutit à la synergie, ou au contraire, à l'antagonisme entre ces molécules. Ainsi, l'apport d'un régulateur de croissance aura non seulement des conséquences sur la balance hormonale de la plante, mais également sur l'assimilation des nutriments et sur la microflore rhizosphérique bénéfique ou pathogène pour la plante.

Améliorer la capacité d'absorption des solutés grâce à un meilleur enracinement des plantes par l'application de régulateurs de croissance ou d'inoculum de bactéries du sol bénéfiques, pourra constituer une solution pour lutter contre la sécheresse, conséquence attendue du changement climatique. Accélérer le développement des jeunes plantes peut aussi permettre au végétal d'éviter les stress hydriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gauvrit, C. (1996). *Efficacité et sélectivité des herbicides.*

Leroux, P. (2003). *Mode of action of agrochemicals towards plant pathogens. Plant biology and pathology : (326), 9-23.*

Regnault-Roger, C., Fabre, G., Philogene, B.J. (2005). *Phytosanitary issues for agriculture and the environment (pp.1075).*

Regnault-Roger, C., Philogène, B. J., & Vincent, C. (2005). *Biopesticides of Plant Origin (pp. -313).*

Vansuyt, G ., Vert, G., Larcher, M. (2010). *Growth factors in agriculture.*

Wood, C. S. (2004). *Insecticides. Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology, 859-876.*