
Chapitre II : les produits phytosanitaires

Avant l'avènement des produits phytosanitaires, les systèmes de culture étaient conçus pour assurer le meilleur compromis entre le risque phytosanitaire et le potentiel de production de la culture [54] cependant les pertes en rendement des productions agricoles dues aux maladies parasitaires très meurtrières, aux ravageurs et aux adventices pouvaient atteindre des proportions importantes [55] [53]

L'augmentation considérable de la productivité agricole à la veille de la deuxième guerre mondiale n'aurait été possible sans la généralisation des intrants notamment les engrais et les pesticides [57]. Ces derniers ont grandement contribué à l'amélioration de la santé publique en permettant, d'une part, d'éradiquer ou de limiter la propagation de maladies parasitaires et en garantissant, d'autre part, une production alimentaire de qualité [56] [53].

Près de 8000 produits phytosanitaires formulés à partir de 500 substances sont commercialisés aujourd'hui en France. De nouvelles molécules s'ajoutent régulièrement à la liste des substances autorisées de même après évaluation ou réévaluation des substances sont régulièrement radiées de cette liste [58]

Ce traitement par les pesticides est jusqu'à présent le moyen de protection prépondérant et leur utilisation est devenu indispensable [54]. Cependant ces produits peuvent aussi être nocifs et soupçonné de présenter actuellement un risque pour la santé humaine et l'environnement [57].

I. Les produits phytosanitaires :

1. Définition :

Les produits phytosanitaires, plus communément nommés pesticides, ce terme désigne de manière génériques toute substances (molécules) ou produits (formulations) qui éliminent les organismes nuisibles, qu'ils soient utilisés dans le secteur agricole afin d'améliorer les rendements et la qualité des productions agricoles, ou bien dans d'autres applications [54] [57]. La substance ou le microorganisme qui détruit ou empêche les organismes nuisibles de s'installer sur les végétaux, parties de végétaux est dénommée substance active à la quelle sont associés dans la préparation un certain nombre de « formulant » qui la rendent utilisable par l'agriculteur [59] [60].

Le vocable pesticide signifie étymologiquement « tueurs de fléaux » sont des produits obtenus le plus souvent par synthèse chimique et dont les propriétés toxiques permettent de lutter contre les organismes nuisibles [61].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Les pesticides peuvent être désignés de différentes façons : elle regroupe à la fois les produits phytosanitaires pour les firmes qui les fabriquent et les vendent, produits phytopharmaceutiques pour la réglementation européenne et produits agropharmaceutiques pour les scientifiques agronomes [60].

La réglementation européenne et mondiale définit précisément les notions de produits "phytopharmaceutiques" :

Produits phytopharmaceutiques (PPP) (au sens de la Directive 91/414/CE) qui les définit comme étant : les substances actives et les préparations contenant une ou plusieurs substances actives qui sont présentes sous la forme dans laquelle elles sont livrées à l'utilisateur et destinées à :

- protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles ou à prévenir leur action;
- exercer une action sur les processus vitaux des végétaux, pour autant qu'il ne s'agisse pas de substances nutritives (par exemple, les régulateurs de croissance) ;
- assurer la conservation des produits végétaux, pour autant que les substances ou produits ne fassent pas l'objet de dispositions particulières du Conseil ou de la Commission concernant les agents conservateurs ;
- détruire les végétaux indésirables, ou ;
- détruire des parties de végétaux, freiner ou prévenir une croissance indésirable des végétaux [62].

2. Historique :

L'utilisation des PPP en agriculture remonte à l'antiquité. Jusqu'à la 1^{ère} moitié du 20^{ème} siècle, ils regroupent des substances d'origine naturelle : des dérivés minéraux comme les fongicides à base de sulfate de cuivre, insecticides de l'arsenic et encore les produits dérivés du pyrèthre [61] et cela a suivi les progrès en chimie minérale qui s'est développé en fournissant nombreux PPP minéraux [40].

Après la seconde guerre mondiale les progrès de la chimie organique et l'introduction de nouvelles familles herbicides de type d'urées substituées, suivi par des herbicides de groupe d'ammonium quaternaire et triazines, de fongicides dits IBS (inhibiteurs de la synthèse des stérols) [40] et encore d'insecticides, qui a permis un accroissement de la production agricole tel que l'évoque une « révolution verte » [58].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

La période 1970-1980 signe l'arrivée de la 2^{ème} génération de pesticides caractérisée par une diminution des doses employées et une meilleure efficacité. Parmi ces nouvelles familles se trouvent les pyréthrinoïdes photostables (deltaméthrine) pour les insecticides et les sulfonyl urées (chlorsulufuron) pour les herbicides. C'est également à cette période que la famille des phosphonate est mise sur le marché avec dans ses rangs un herbicide très célèbre : le glyphosate (Roundup). Les années 1980 marquent un tournant dans la manière de concevoir un produit phytosanitaire de synthèse, c'est le début des pesticides de 3^{ème} génération [63].

L'usage des produits phytosanitaires a connu un très fort développement au cours des décennies passées, les rendant quasiment indispensables à la plupart des pratiques agricoles, quel que soit le niveau de développement économique des pays. De 1945 à 1985, la consommation de pesticides a doublé tous les dix ans [63]. Plus de 20000 spécialités commerciales de pesticides et presque 900 matières actives sont homologuées de par le monde. En France, à ce jour, près de 550 matières actives et environ 2700 spécialités commerciales sont homologués et commercialisés [61].

De nombreuses familles chimiques sont aujourd'hui sur le marché. Le tableau qui suit présente les familles principales et en retrace l'histoire.

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

Figure 03 : évolution des découvertes des substances actives [64]

II. Classification des produits phytosanitaires :

Pour une meilleure gestion, les pesticides ont été classés en plusieurs catégories mais, il existe plusieurs types de classifications. Chacune de celles-ci est faite suivant des critères bien déterminés (cibles, nature, formulation, familles chimiques...).

La classification suivant la famille d'espèce cible est la plus courante. En agriculture, les principales cibles des pesticides sont des organismes vivants variés. Mais les principales sont les champignons (fongicides), les mauvaises herbes (herbicides) et les insectes (insecticides). En plus de ces trois grandes familles d'autres produits existent, pour lutter contre les limaces (les molluscicides), les rongeurs (les rodenticides), les nématodes (les nématicides), les corbeaux (les corvicides), pour désinfecter le sol (les fumigants), etc [65] [57]

Le deuxième système de classification des pesticides tient compte de la nature chimique de la substance active majoritaire qui compose les produits phytosanitaires [53].

1. Classification biologique :

Selon les organismes visés, trois grandes classes de pesticides représentant 90% des produits phytosanitaires se distinguent :

1.1. Herbicides :

1.1.1. Définition :

La gêne occasionnée par la végétation indésirable dans les champs devenait inacceptable c'est pour cela la lutte contre ces plantes adventices s'est imposé dans l'agriculture moderne comme un exercice obligatoire [66].

Les herbicides sont des substances chargées de ralentir la croissance ou de détruire les plantes cibles, nommée adventices ou mauvaises herbes [40].

1.1.2. Classification des herbicides :

Le succès commercial des herbicides a provoqué de nombreuses recherches afin de développer de nouvelles molécules de plus en plus performantes. Dans son compendium mondial, Wood répertorie 595 substances actives herbicides qu'il classe en 42 familles chimiques [67].

1.1.2.1. Classification selon le site et mode d'action :

On peut classer les herbicides en fonction des cibles cellulaires et biochimiques qu'ils perturbent.

Chapitre II : les produits phytosanitaires

La classification de référence est celle de l'HRAC (Herbicide Resistance Action Committee) [5] il est recensé une vingtaine de cibles biochimiques connue d'herbicides désignée chacune par des lettres de A à P, une catégorie Z rassemblant les herbicides de sites d'action encore inconnus (tableau 03) [5].

Tableau 03: classification des herbicides s/elon le mode d'action [68]

Catégorie HRAC	Site d'action cellulaire	Exemple de famille chimique ou substance active
A	Inhibition d'acétyl CoA carboxyl	Aryloxyphenoxy-propionates
B	Inhibition acétolactate synthetase	Sulfonylurées
C1 C2 C3	Inhibition photosynthèse (photosystème II)	Triazines, phenylcarbamates
D	Inhibition photosynthèse I	Diquat, paraquat
E	Inhibition protoporphyrinogène oxydase (PPO)	Phenypyrazoles, Triadозoles
F1	Inhibition phytoène désaturage (PDS)	Pyridazinones
F2	Inhibition 4 hydroxy phényle pyruvate dioxygénase (4-HPPD)	Isoxazoles
F3	Inhibition biosynthèse caroténoïdes	Triazoles, amitrole
G	Inhibition EPSP synthétase	Glyphosate
H	Inhibition glutamine synthétase	Glufosinate ammonium
I	Inhibition dihydroptéroate synthétase	Carbamates
K₁	Inhibition de la division cellulaire assemblage des microtubules	Dinitroanilines Benzamides
K₂	Inhibition de la division cellulaire (mitose)	carbamates, carbétamides
K₃	Inhibition de la division cellulaire (Ac gras à très long chaines)	Acétamides, tetrazolinones
L	Inhibition synthèse de la cellulose	Nitrites, benzamides
M	Découplant	Dinitophénols

Chapitre II : les produits phytosanitaires

N	Inhibition synthèse lipides	Thiocarbamates
O	recepteur de l'auxine	Ac phenylcarboxyliques
P	Inhibition transport de l'auxine	Naptalame

Ils présentent aussi une gamme variés de mode d'action parmi lesquelles : l'inhibition de la photosynthèse, de la synthèse des lipides et d'acides aminés, de la division cellulaire, de l'activité hormonale [70] [40].

1.2. Fongicides :

1.2.1. Définition :

Les fongicides agricoles sont destinés au contrôle des champignons phytopathogènes qui provoquent des maladies lors du cycle de culture du végétal et pendant sa conservation ; ces champignons sont responsables d'un grand nombre de maladies affectant un large spectre de végétaux [71].

Les pertes potentielles provoquées par les maladies fongiques sont estimées entre 10-30%. En dehors des effets quantitatifs, il existe des champignons pouvant affecter les qualités des productions végétales comme la présence de mycotoxines toxiques pour l'homme, ou des altérations organoleptiques [40].

1.2.2. Classification selon le mode d'action :

On classe les fongicides de plusieurs manières selon que l'on considère le stade du champignon sur lequel ils agissent, leur comportement dans la plante ou leur cible cellulaire

1.2.2.1. Les fongicides unisites et multisites :

Les fongicides agissent à différents niveaux cellulaires affectent divers cibles métaboliques. Selon leur mode d'action on distingue d'une part les fongicides multisites qui agissent sur le développement du champignon et sur plusieurs cibles cellulaires et d'autre part les fongicides unisites qui plus spécifiques et interviennent à un stade précis du développement du champignon sur une cible particulière [66].

▪ Fongicides multisites :

Il s'agit de la première classe de fongicides apparus dès le XIX^e aux prémices de la lutte chimique. Sont des produits de large spectre d'action. Ils agissent de façon non spécifique avec les constituants essentiels des cellules vivantes. De ce fait, on n'observe pas ou très peu de résistance de champignons vis-à-vis de ces molécules [70] [72].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Ils sont impliqués dans les mécanismes de base qui se rencontrent chez tous les êtres vivants, en particulier les mécanismes enzymatiques de la production d'énergie du végétal [66]. Du fait de leur faible rémanence, leur application doit être régulièrement renouvelée fréquemment notamment en cas de pluie [70]. Plusieurs familles chimiques appartiennent à cette catégorie. Parmi les plus anciens à avoir été utilisés, les fongicides minéraux à base de cuivre ou de soufre élémentaire. D'autres fongicides de nature organiques ont été synthétisés et commercialisés après la seconde guerre mondiale, à l'essor de l'industrie chimique qui regroupe différentes familles (**voir tableau 02**) les dithiocarbamates ; ceux-ci interagissent avec les enzymes respiratoires métalliques, les sulfénides ont un groupe thiophosgène qui interagit avec le groupement thiol des enzymes respiratoires.

- les quinones et les hydroxyquinones affectent également les processus respiratoires des cellules fongiques mais ont un mode d'action moins bien connu [40].

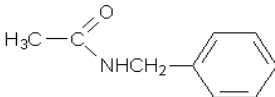
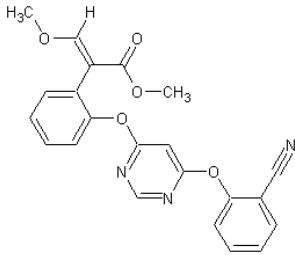
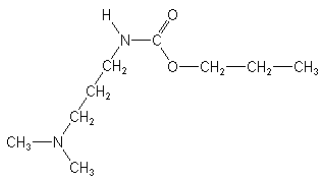
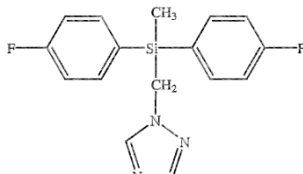
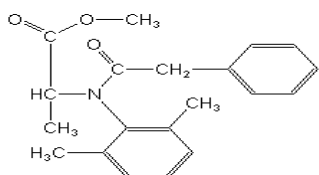
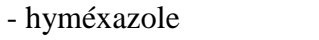
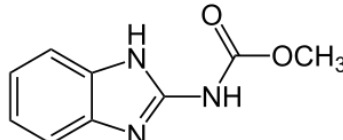
▪ Les fongicides unisites :

Agissent sur une seule cible cellulaire au sein du champignon, mais ces cibles varient en fonction de la substance active considérée certains perturbent la respiration mitochondriale en inhibant la succinate déshydrogénase du cycle de Krebs, d'autres sont actifs sur les membranes en empêchant la formation d'ergostérol ou en perturbant la biosynthèse des parois par inhibition de la chitine synthétase.

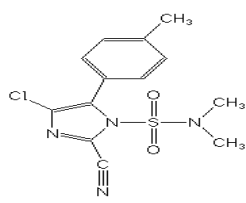
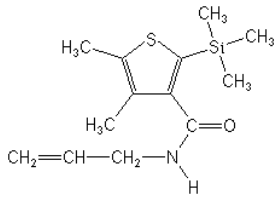
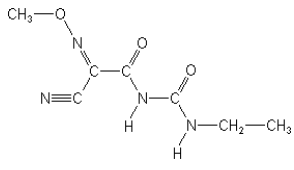
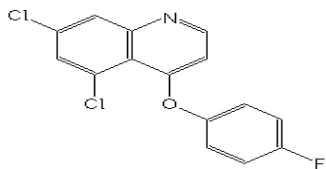
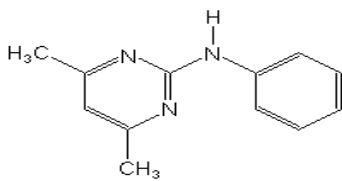
La découverte des fongicides unisites a amélioré la sélectivité des traitements car ils sont souvent systémiques et agissent de manière curative ce qui représente une nécessité des doses plus faibles, qui minimisent les risques environnementaux et sanitaires et s'inscrivent dans les approches de lutte raisonnée ou intégrée [73].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Tableau 04 : cibles biochimiques et cellulaires des fongicides agricoles (d'après leroux [71])

Catégories des fongicides	Cibles biochimiques/cellulaires	Exemple	Structure chimiques
Fongicides unisites (systémiques)	-Respiration mitochondriale	-inhibiteurs du complexes II mitochondriale - inhibiteurs du complexes III mitochondriale	-carboxamides  -azoxystorbins 
	-biosynthèse des lipides	-perturbation de la perméabilité membranaire	-propamocarbe 
	-biosynthèse des stérols membranaires	-inhibiteurs de la 14α déméthylase (IDM)	- Flusilazole 
	-synthèse d'acides nucléiques	-inhibiteurs de la synthèse d'ARN - inhibiteurs de la synthèse d'ADN	- béalaxyl  - hyméxazole 
	-les microtubules	-Inhibiteurs de la synthèse des microtubules	-carbendazime 

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Fongicides multisites (non systémiques)	-Respiration mitochondriale	-inhibiteurs du complexes II mitochondriale - inhibiteurs du complexes III mitochondriale -inhibiteurs de la production d'ATP	- cyazofamide  -silthiofam 
	-paroi cellulaire	-	-cymoxanil 
	-protéine G	- inhibiteurs de la traduction des signaux	-Quinoxylène 
	-biosynthèse de méthionine	-inhibiteur de la biosynthèse de méthionine	-pyriméthanol 

1.3. Insecticides :

1.3.1. Définition :

Les insecticides sont des substances actives ayant la propriété de tuer les insectes, Ils interviennent en éliminant ou empêchant le développement des insectes ou des espèces voisines : les acariens, les pucerons, l'éclosion des œufs et altèrent le développement normal des larves [74]. Suivant ces espèces on peut citer les familles suivant : les acaricides, aphicides, les ovocides, les larvicides ainsi que les némantocides contre les nématodes [75].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

C'est le plus important groupe de pesticides qui englobe plusieurs familles chimiques aux quelles appartient les insecticides organiques de synthèse (**tableau 05**) [62,40].

1.3.2. Classification selon mode d'action : différents types existent comme

- **Les neurotoxiques** : les premiers insecticides utilisés au XVIIIème siècle ciblaient déjà le système nerveux. Un des insecticides neurotoxiques le plus connu est le DDT (1944) de la famille des diphénylétanes, interdit depuis les années 70, qui perturbe la transmission de l'information au niveau de l'axone [76] [77]. La neurotoxicité de ces insecticides se manifeste par le blocage de la propagation de l'influx nerveux au niveau des neurones et des synapses, tant au niveau du système nerveux central que périphérique. Les symptômes d'intoxication par les substances neurotoxiques sont les suivants : période de latence, hyperexcitation, manque de coordination, tremblements, convulsions, prostration, mort.
- **Régulateurs de croissance** : Parmi ces produits se trouvent des analogues et mimétiques des hormones juvéniles (fénoxycarbe et pyriproxyfène) : ils ont une structure analogue à celle des hormones juvéniles et agissent en perturbant la physiologie de reproduction de l'insecte, son cycle de développement au niveau du développement embryonnaire et de sa métamorphose. On trouve aussi Les benzoyl-urées qui inhibent la production de chitine, qui est un élément constitutif majeur de l'exosquelette des insectes. D'autres, de la famille des benzhydrazides (1993 ; 2001), remplacent l'hormone de mue des insectes l'ecdysone, déclenchant prématurément la mue. Enfin certaines molécules perturbent la synthèse de la chitine, polysaccharide essentiel au développement de la cuticule des arthropodes [76].
- **Ceux agissant sur la respiration cellulaire** : La plupart des molécules inhibant le processus respiratoire sont des acaricides. La famille des arsénicaux a été la première à exploiter cette cible [76]. Les familles des quinazolines (fenazaquin), des pyridazinones (pyridabène), des pyrazolcarboxamides (tébufenpyrad) et des phénoxy-pyrazoles (fenpyroximate) sont des inhibiteurs du site I de la chaîne mitochondriale (coenzyme Q oxydo-réductase) tandis que l'hydraméthylnon inhibe le complexe cytochrome bc1. Une autre cible biochimique du système respiratoire cellulaire est la phosphorylation oxydative : les dérivés stanniques (qui comprennent de l'étain) inhibent la phosphorylation oxydative

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Tableau 05: classification selon le mode d'action (publiée par l'ACTA 2003, 2004) [78]

Mode d'action		Famille chimique
Insecticides agissant sur le système nerveux	Action sur les synapses agissant sur les neuromédiateurs	-Avermectine, carbamates, organophosphorés
	Action sur la transmission axonale	-carbinols, pyréthrinoides
	Action inhibitrice sur la prise de nourriture	Pyridine-azométhrine
Insecticides agissant sur la respiration	Inhibition du transport des électrons dans la mitochondrie	Roténone, pyridazinone, Quinazolines,
	Inhibition la phosphorylation oxydative	Dérivés stanniques sulfores sulfonates
Insecticides agissant sur la mise en place de cuticule	Inhibition de la chitine	Benzoyl-urée
	Agoniste de l'ecdysone	Benzhydrazides

2. **Classification chimiques :** cette deuxième classification tient compte de la nature chimique substance active qui compose majoritairement les produits phytosanitaires [75], les principaux groupes chimiques sont :

2.1. Les pesticides inorganiques :

Ils sont peu nombreux mais certains sont utilisés en très grande quantité comme le soufre ou le cuivre. Ce sont des pesticides très anciens dont l'emploi est apparu bien avant la chimie organique de synthèse. De cette époque ne subsistent aujourd'hui : aucun insecticide, un seul herbicide employé en tant que désherbant total (chlorate de sodium) et quelques fongicides à base de soufre et cuivre comme la bouillie bordelaise ($[\text{Cu}(\text{OH})_2]_x$, CaSO_4) [78].

2.2. Les pesticides organo-métalliques :

Ce sont des fongicides dont la molécule est constituée par un complexe fait d'un métal comme le zinc ou le manganèse et d'un anion organique dithioarbamate (exemple : mancozèbe avec le zinc, manèbe avec le manganèse) [78].

2.3. Les pesticides organiques :

Ils sont très nombreux et appartiennent à diverses familles chimiques. Selon le Pesticide Manual, une famille chimique ou classe chimique correspond à l'ensemble des molécules dérivées d'un groupe d'atomes qui constituent une structure de base [79]. Cependant, il n'existe pas de relations univoques simples entre une famille chimique et les propriétés des molécules qui ne peuvent être comprises qu'à partir de la connaissance de toute leur composition et de leur structure. Il existe actuellement plus de 80 familles ou classes chimiques dont leurs appellations sont parfois arbitraires et peuvent donc être différentes d'un ouvrage à un autre.

Il faut souligner la très grande diversité chimique des pesticides due, à la fois, aux éléments chimiques qu'ils contiennent mais aussi aux diverses fonctions chimiques présentes dans les molécules. Elle explique l'étendue des propriétés et des usages des pesticides.

Cependant, la compréhension de cette classification nécessite des connaissances avancées en chimie dont ne sont pas pourvus tous les utilisateurs de pesticides. Ils lui préféreront donc les classifications biologique ou par usage qui sont bien mieux adaptées à leurs activités [63].

Chapitre II : les produits phytosanitaires

Tableau 06: principales familles d'insecticides, de fongicides et d'herbicides [80]

Insecticides	Herbicides	Fongicides
Minéraux		
composés arsenicaux	Sels de NH ₄ , de Ca, de Fe, de	Sels de cuivre à base de soufre
Soufre	Mg, K, Na	Composés arsenicaux
Composés fluorés	Sous forme de sulfates, de	Huiles minérales
Dérivés de mercure	nitrate, chlorures,	
Dérivés de sélénium	chlorates,.....	
Composés à base de silice		
Quartz, magnésie, Huiles de pétrole		
Organiques		
Organochlorés	Phytohormones	Carbamates et
Organophosphorés	Dérivés de l'urée	Dithiocarbamates
Carbamates	Carbamates	Dérivés du benzène
	Triazines et Diazines	Dérivés des quinones
	Dérivés de pyrimidines	Amides
	Dérivés des dicarboximides	Benzonitriles
	Dérivés de l'oxyquinoleine	Toluidines
	Dérivés des thiadiazines et Thiadiazoles	organophosphorés
Divers		
Pyréthroïde de synthèse	Dicamba	Carboxines
Produits bactériens	Piclorame	Chloropicrine
Répulsifs	Paraquat	Doguanide
		Formol