

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les années 1950, le développement de l'agriculture et la volonté d'augmenter les rendements ont conduit à une utilisation croissante des pesticides. La lutte chimique qui, jusqu'alors, était limitée à l'emploi de deux ou trois fongicides et insecticides utilisés contre les ravageurs des plantes, utilise aujourd'hui des milliers de matières actives de produits-pesticides. Ces substances phytosanitaires sont commercialisées un peu partout dans le monde. Environ 25% actuellement consommés dans le monde, le sont dans des pays en développement. La consommation de pesticides progresse parallèlement au développement, on passe progressivement à des quantités plus importantes de produits plus variés (insecticides, fongicides et herbicides) pour toute une série de cultures.

Dans le cadre de l'agriculture intensive, la tendance actuelle consiste à optimiser la production par rapport à la surface cultivée. Ainsi dans certains pays en développement, les quantités de pesticides utilisées sont sans doute nettement supérieures aux quantités correspondant aux besoins phytosanitaires (OMS, 1991). la consommation annuelle est estimée à environ 4 millions de tonnes au niveau mondial. Le marché mondial phytosanitaire a connu depuis 1994 une réelle augmentation pour atteindre 25,38 milliards de dollars, le marché américain restant le premier suivi du Japon et de la France. Le budget recherche-développement représente de 7 à 13 % du chiffre d'affaires global selon les firmes, le coût de commercialisation d'un produit phytosanitaire étant estimé à 80 millions de dollars, dont 20 pour l'homologation.

Plusieurs auteurs ont démontré que les pesticides mal employés peuvent être toxiques pour toutes les composantes de l'environnement, aussi bien pour les animaux, les hommes, les plantes que pour les microorganismes (Renner et Hopfer, 1987; Huynt, 1990; Ramade, 1992). Si la toxicité de ces produits est effectivement indéniable, l'agriculture ne peut, dans l'état actuel des connaissances, s'en passer. En revanche, de nombreux progrès restent à faire pour les utiliser au mieux et limiter les risques qu'ils font courir aux populations et à la nature. Pour cela, les pesticides restent donc une arme à double tranchant car selon l'utilisation qui en est faite, ils peuvent être bénéfiques ou dangereux. Ils provoquent l'augmentation des rendements d'une part, et l'augmentation de la toxicité sur les différentes composantes de l'environnement avec l'installation d'une résistance irréversible des agents pathogènes d'autre part.

Certes l'introduction massive de ces molécules dans l'environnement, a induit de graves conséquences et une problématique de pollution potentielle a été alors soulevée et prend de plus en plus d'ampleur. Les pesticides contaminent les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines. Désormais la contamination des eaux par les produits phytosanitaires est un fait, de nombreuses matières actives sont détectées à des concentrations très variables dans l'espace et dans le temps qui peuvent atteindre des valeurs critiques pour la santé des écosystèmes et les ressources en eau (Andral, 1996). Si l'intérêt s'est porté en premier temps sur la contamination par les pesticides des différents compartiments du sol en raison de fortes concentrations détectées précocement, le problème des eaux superficielles et souterraines du réseau de surface est aujourd'hui pertinent. Leur complexité, les multiples conditions d'emploi, la spécificité des milieux où ils sont épanchés et les nombreux mécanismes biotiques et abiotiques qui agissent sur leur devenir et leurs interactions rendent difficile l'évaluation des risques liés à leur utilisation. Les données ne sont pas toujours disponibles pour des raisons de confidentialité ou à défaut d'une législation harmonisée concernant la santé humaine.

Selon l'OMS (2012), les pesticides seraient responsables du décès de 20.000 personnes environ chaque année, dans le monde. Ils ont été mis évidence dans le sol, les eaux, les fruits, les légumes, les céréales et les produits d'origine animale (les œufs, le lait, la viande, le poisson). A peu près 45% des aliments européens contiennent des résidus de pesticides (N.A.D.D, 2015). Ils existent sous leur forme initiale mais ils peuvent aussi être dégradés, on parle alors de résidus ou de métabolites. La contamination de l'environnement expose tout un chacun à des niveaux de pesticides variables et souvent difficiles à apprécier.

En effet, tous les milieux ne sont pas correctement renseignés et il n'est pas toujours possible d'établir les niveaux d'expositions des populations pour chacun d'entre eux.

L'Algérie à elle seule, utilise environ 6 000 à 10 000 tonnes de pesticides par an (Moussaoui et *al.*, 2001; Bouziani, 2007). Environ 400 produits phytosanitaires sont homologués en Algérie dont une quarantaine de variétés sont largement utilisées par les agriculteurs (Protection Phytosanitaire J.O, 1991). Dans notre pays, les analyses des résidus de pesticides pour évaluer le degré de contamination des milieux naturels (le sol, les cultures, les aliments, les eaux superficielles, eaux souterraines) ne sont pas faites systématiquement. Il y a quelques années déjà, dans certaines régions du pays (Staoueli, Annaba, les concentrations de pesticides dans les aliments, les eaux superficielles, souterraines et dans les fruits étaient élevées. Des doses d'organochlorés et d'organophosphorés (Lindane, Glyphosates) dépassant

les normes admissibles ont été détectées. De surcroît, selon le cadastre national des déchets dangereux, il existe plus de 2300 tonnes de pesticides périmés répartis sur 500 sites (sites agricoles, Onapsa, Asmidal...).

Devant l'ampleur de la situation, il est donc de notre devoir de rechercher des solutions pour diminuer ou éliminer les risques de l'utilisation de ces produits phytosanitaires. L'utilisation des méthodes biologiques reste l'alternative la plus employée. Dans ce contexte, l'objectif de notre travail consiste en l'utilisation des microorganismes dotés de pouvoirs de biodégradation vis-à-vis des pesticides. En effet, l'équipement enzymatique des microorganismes leur permet de métaboliser les substrats y compris les composés-pesticides. Ces microorganismes constituent selon la plupart des chercheurs, un moyen sûr et peu coûteux, voire même unique (Ala-AI, 1992b; Stamper et Tuovinen, 1998 in Savadogo, 2001).

Le but principal de ce travail était d'isoler les espèces microbiennes des eaux superficielles agricoles polluées par les pesticides, de sélectionner les plus significatives et de tester leurs potentialités de bioremédiation. Pour ce faire, nous avons structuré notre travail comme suit:

- dans le premier volet, nous avons évoqué l'état des connaissances bibliographiques se rapportant au thème étudié.
- le second volet, a été consacré à la présentation de la région d'étude, le matériel utilisé et les méthodes employées afférentes à l'appréciation de la pollution par les pesticides sur les caractéristiques des eaux contaminées, l'isolement, l'identification et la sélection des souches microbiennes et l'évaluation de leurs capacités de biodégradation dans des microcosmes « *In vitro* » en culture batch.
- dans le troisième volet, nous avons présenté les résultats et leur discussion.
- enfin, nous avons terminé cette étude par une conclusion générale et dégagé les perspectives.

CHAPITRE I
APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1. APERCU BIBLIOGRAPHIQUE

1. LES PESTICIDES

1.1. Définition

Le terme pesticide désigne toute substance ou mélange servant à empêcher, détruire, repousser des organismes indésirables pour l'agriculture ou l'hygiène publique. Il s'agit d'un terme général englobant une grande variété de produits : herbicides, fongicides, insecticides.

Un pesticide peut être une substance chimique, un agent biologique (tel qu'un virus ou une bactérie), un désinfectant ou tout autre produit luttant contre des « nuisibles » tels que les insectes, les mauvaises herbes, ou les microbes. Les pesticides peuvent être classés en fonction de leurs familles chimiques.

Selon l'OMS, les pesticides sont des produits chimiques utilisés en agriculture pour détruire les ravageurs, les plantes adventices et les agents phytopathogènes. Ces produits peuvent être extraits de végétaux ou obtenus par synthèse. Dans le présent travail, on s'intéresse aux pesticides chimiques de synthèse qui présentent un risque pour l'environnement et la santé publique.

Selon la FAO (1986 a), un pesticide est une substance ou un mélange de substances, utilisé pour empêcher d'agir, détruire ou neutraliser un ravageur, un vecteur de maladie humaine ou animale, une espèce végétale ou animale nocives ou gênantes au cours de la production, de la transformation, de l'entreposage, du transport ou de la commercialisation de denrées alimentaires, de produits agricoles. Le terme de pesticide désigne aussi des produits utilisables comme régulateurs de la croissance végétale, défoliants, dessicants, agents d'éclaircissage contre la chute prématurée des fruits ou encore des produits appliqués avant la récolte pour empêcher la détérioration des denrées en cours d'entreposage ou de transport.

1.2. Classification

Les pesticides disponibles aujourd'hui sur le marché sont caractérisés par une telle variété de structures chimiques, de groupes fonctionnels et d'activités que leur classification est complexe. Devant le nombre considérable de pesticides (plus de 1000 matières actives différentes dans près de 7000 formulations commerciales), (Kesraoui+, 2008).

D'une manière générale, les substances actives peuvent être classées soit en fonction de la nature de l'espèce à combattre (1^{er} système de classification), soit en fonction de la nature chimique (2^{ème} système de classification)

1.2.1. Premier système de classification

Le premier système de classification repose sur le type de parasites à contrôler. Il existe principalement trois grandes familles d'activités que sont les herbicides, les fongicides et les insecticides.

- **Les insecticides** : La lutte contre les ravageurs est indispensable. Les insectes nuisibles sont en effet responsables des pertes de rendement et d'une baisse de qualité de la production viticole (Kreiter *et al.*, 2008).

Les insecticides sont destinés à détruire les insectes nuisibles ; ils se répartissent en trois grands groupes selon leur nature chimique : substances minérales, molécules organiques d'origine naturelle ou produits organiques de synthèse qui sont de loin les plus utilisés actuellement. Autres que les organochlorés (DDT, dieldrin, ...) qui sont bannis actuellement dans la plupart des pays du nord, les insecticides appartiennent à trois grandes familles chimiques : les organophosphorés (diméthoate, malathion, ...), les carbamates (aldicarbe, carbofuran, ...) et les pyréthrinoides de synthèse (bifenthrine, perméthrine, ...)

- **Les fongicides** : Les fongicides servent à combattre la prolifération des champignons phytopathogènes. Ils permettent de lutter contre les maladies cryptogamiques qui causent de graves dommages aux végétaux cultivés. Le mildiou de la pomme de terre, celui de la vigne, les charbons et les rouilles des céréales, représentait autrefois de véritables fléaux. Ces affections sont provoquées par l'invasion des divers tissus des plantes par le mycélium de champignons microscopiques. Les plus anciens fongicides connus sont des sels cupriques, le soufre et certaines de ses dérivés minéraux. Les composés organiques représentent la part la plus importante: carbamates (carbendazine, mancozèbe, ...), triazoles (bromuconazole, triticonazole,...), dérivés du benzène (chlorothalonil, quintozone), dicarboximides (flopel, iprodione,...). Il est intéressant de signaler que le soufre et le cuivre demeurent d'excellents fongicides utilisés jusqu'à nos jours (Calvet *et al.*, 2005).

- **Les herbicides** : Ce sont les plus utilisés des pesticides, ils permettent d'éliminer les mauvaises herbes adventices des cultures. Ils appartiennent à plus de 35 familles chimiques différentes. Les plus représentées sont les carbamates (chlorprophame, triallate,...), les urées substituées (diuron, chlortoluron,...), les triazines (atrazine, simazine,...), les chlorophenoxyalcanoïques (MCPA,...), les amides (alachlore, propyzamide,...).

Tableau 1. Principales familles des insecticides herbicides fongicides

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

1.2.2. Deuxième système de classification

Un produit phytosanitaire tel qu'il est présenté, est une spécialité formulée homologuée pour le traitement d'une culture précise (maïs, blé, tomate, pomme de terre, pois, fraise, etc...). La spécialité formulée est composée d'une ou plusieurs matières actives et d'un ou plusieurs additifs.

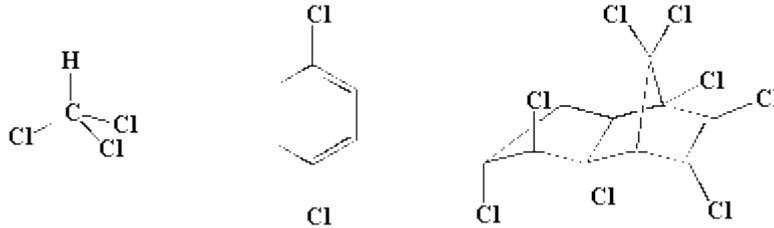
Le deuxième système de classification tient compte de la nature chimique de la substance active qui compose majoritairement les produits phytosanitaires. Compte tenu de la variété des propriétés physico-chimiques des pesticides disponibles sur le marché, il existe un très grand nombre de familles chimiques. Les plus anciens et principaux groupes chimiques sont les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates, les triazines et les urées substituées. Les structures chimiques caractéristiques de certaines de ces familles sont présentées dans le tableau 1.

1.3. Principales familles de pesticides

1.3.1. Les organochlorés

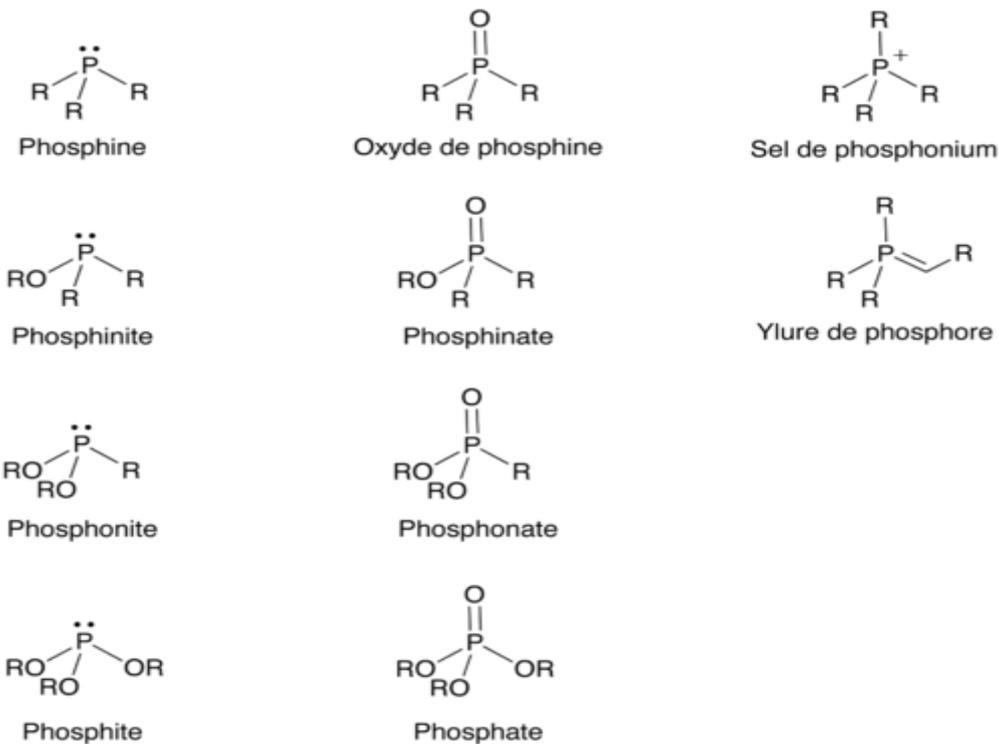
Cette famille comprend un grand nombre de composés chimiques contenant du chlore et quelquefois d'autres éléments.

Les insecticides les plus puissants et les plus efficaces sont des organochlorés. On trouve dans cette famille le DDT, le chlordane, ou en encore le pentachlorophenol. Ils sont très persistants dans les sols, et ils se concentrent également dans les tissus biologiques. Beaucoup de composés de cette famille sont interdits en raison de leur neurotoxicité.



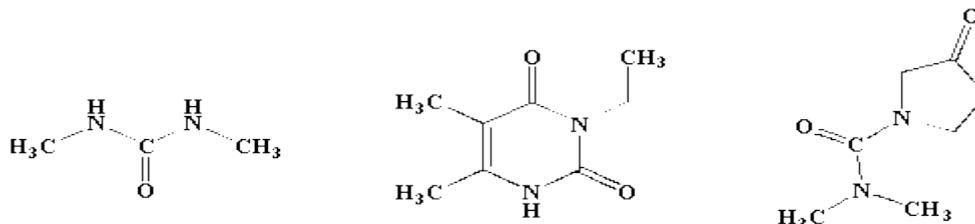
1.3. 2. Les organophosphorés

Les composés organophosphorés se répartissent en différentes classes selon le degré d'oxydation du phosphore et la nature des substituants, notamment la présence d'un atome d'oxygène ou d'un autre chalcogène. Les composés organophosphorés sont rapidement dégradés par le rayonnement solaire, dans l'air, et dans les sols, bien que de petites quantités puissent subsister et se retrouver dans la nourriture et l'eau. Le fait qu'ils se dégradent facilement fait de cette famille une alternative intéressante aux pesticides organochlorés persistants. Cependant, bien que les organophosphorés se dégradent plus rapidement, ils sont plus toxiques, ce qui représente un risque pour les utilisateurs de ces composés.



1.3.3. Les urées

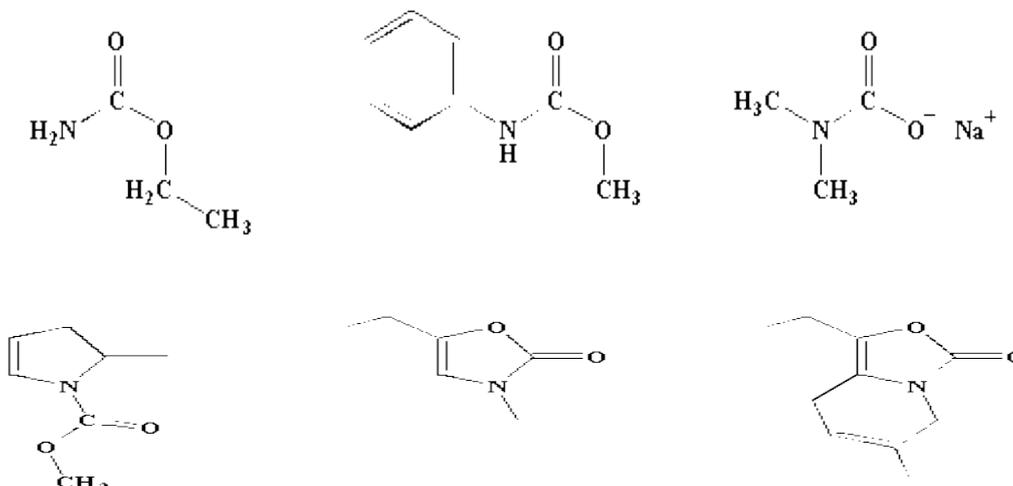
Les urées représentent les molécules renfermant un groupe urée (NH_2CONH_2). Ce groupe peut se trouver à l'intérieur d'un cycle (Forgacz, 2011). Les atomes d'hydrogène liés aux atomes d'azote peuvent être substitués par d'autres atomes, par des chaînes ou par des cycles où constituer un cycle. Les sulfonylurées répondent également à la définition des urées. Cependant, comme la priorité de ce groupe est supérieure à celle des urées, les molécules répondant aux deux définitions seront classées dans les sulfonylurées.



1.3.4. Les carbamates

Les carbamates présentent les mêmes caractéristiques que les organophosphorés, mais avec une toxicité moins importante. Ces composés constituent une famille de pesticides agissant sur l'enzyme acétylcholinestérase (la famille des carbamates agit également sur cette enzyme mais selon un mécanisme différent) (Anne-Antonella, 2015).

Ils opèrent en bloquant irréversiblement l'acétylcholinestérase, essentielle aux transferts nerveux chez les insectes, les humains, ainsi que chez la plupart des animaux. La capacité à bloquer l'acétylcholinestérase (et donc la toxicité) peut varier de façon importante d'un composé à l'autre. Par exemple, le parathion, un des premiers organophosphorés, est beaucoup plus puissant que le malathion, un insecticide utilisé pour combattre la mouche du fruit méditerranéenne et les moustiques dans la vallée du Nil.



1.3.5. Les triazines

Cette famille couvre un grand champ d'utilisation. La plupart sont utilisés comme herbicides sélectifs. Les triazines peuvent être utilisés seuls ou combinés avec d'autres composés afin d'augmenter leur efficacité. Le caractère sélectif des triazines vient du fait que certaines plantes peuvent métaboliser ces composés tandis que d'autres ne le peuvent pas. Les triazines comptent parmi les plus anciens herbicides.

1.3.6. Les pyréthrinoïdes

Les pyréthrinoïdes sont des insecticides de synthèse dérivés du pyrèthre (molécule naturelle). Le pyrèthre est instable à la lumière solaire tandis que les pyréthrinoïdes sont assez stables à la lumière solaire et sont efficaces contre un large spectre d'insectes (Tomlin, 1994). Les pyréthrinoïdes sont classés en générations (Ware, 1994) :

-La 1^{ère} génération est apparue en 1949. Un exemple type en est l'allethrine ;

-La 2^{ème} génération est apparue vers 1967. On peut citer parmi eux la tétraméthrine et la resmethrine ;

-La 3^{ème} génération est apparût vers 1972-1973. Un exemple type est la fenvalérate qui est une molécule très active sur les insectes. Elle est également photostable ;

-La 4^{ème} génération de pyréthrinoïdes apparue après les années 1975 est constituée de pesticides tels que le bifenthrin, la lambdacyhalothrine, la cyperméthrine, la cyfluthrine, la deltaméthrine, l'esfenvalérate, la fenpropathrine et la fluvalinate.

Tous ces derniers sont photostables et peu volatils. Le mode d'action des pyréthrinoïdes ressemble à celui du DDT, mais ils sont en plus des poisons de la cellule nerveuse.

1.4. Utilisation

Les tonnages de pesticides ont constamment augmenté en soixante ans. Toutefois, la tendance semble s'inverser dans certains pays européens. Il faut également considérer qu'à quantité égale, les substances actives actuelles sont beaucoup plus efficaces qu'il y a plusieurs décennies. En 2006, la France restait le troisième plus gros consommateur de pesticides au monde derrière les Etats-Unis et le Japon (Respectivement premier et second). Régulièrement, les substances commercialisées doivent être modifiées afin de contourner la résistance aux produits des organismes cibles, ou pour remplacer des substances interdites en raison de leur toxicité. Les pesticides les plus utilisés (en termes de quantité) sont les herbicides. Le composé le plus utilisé au monde est le glyphosate.

1.5. Formulation

Un pesticide est constitué de nombreuses molécules comprenant :

- Une (ou plusieurs) substance active responsable de l'effet du pesticide.
- Un solvant; Ces solvants sont souvent des huiles végétales dans le cas des liquides, de l'argile ou du talc dans le cas des solides.
- Des additifs n'ayant pas d'activité biologique, mais pouvant modifier les propriétés du pesticide et faciliter son utilisation. Il y a plus de 100000 pesticides commercialisés, fabriqués à partir de 900 substances actives différentes. Chaque année, entre 15 et 20 nouvelles substances actives sont créées.

1.6. Modes d'action des pesticides

Les produits phytosanitaires constituent une catégorie de substances très hétérogène regroupant un grand nombre de molécules qui peuvent être regroupées en familles chimiques et classées selon des critères très rigoureux permettant d'identifier jusqu'à la molécule ou l'isomère actif. C'est ainsi que sur ces critères, on distinguera par exemple les produits minéraux des produits organiques, parmi ces derniers les organochlorés, les organophosphorés et les carbamates, eux-mêmes subdivisés en méthyl ou phényl-carbamates et ainsi de suite jusqu'à la molécule et ses isomères.

Cette hétérogénéité chimique s'explique par la diversité des ravageurs visés (insectes, acariens et espèces voisines, végétaux herbacés ou ligneux, champignons, parasites, bactérie virus et autres micro-organismes, vers, rongeurs et autres prédateurs) et par la multiplication des cibles biologiques susceptibles d'être atteintes (système nerveux, voie métaboliques, synthèse des protéines et des acides nucléiques, noyau, génome, etc.). Dès lors on pressent que les modes d'action de ces substances seront extrêmement divers et en faire une synthèse exhaustive sera très difficile.

Il arrive souvent qu'à l'intérieur d'une même famille chimique (exemple : les carbamates) certains représentants ont une activité sur le système nerveux et s'attaqueront aux insectes et espèces voisines et seront qualifiés d'insecticides, alors que d'autres pourront inhiber certaines voies métaboliques existant à la fois chez les insectes, les végétaux et les champignons et seront considérés comme des herbicides dédiés aux végétaux verts.

Par mode d'action, on entend généralement le mécanisme par lequel la substance va exercer son effet sur la cible biologique du ravageur visé ; mais cette cible peut exister aussi chez

d'autres individus non-cibles. Si on prend par exemple les insecticides carbamates, ils inhibent l'acétylcholinestérase qui est une enzyme intervenant dans le processus de la neurotransmission, cette cible existe aussi chez les mammifères, homme compris, qui sont des organismes non-cibles mais dont le fonctionnement du système nerveux pourra être perturbé lors d'exposition à ces produits peu spécifiques. Il faut noter aussi que chez les organismes cibles et non cibles, ces produits peuvent entraîner d'autres effets sans lien avec le mécanisme d'action principal, mais on ne parle pas dans ce cas de mode d'action, ces effets étant qualifiés de secondaires, ce terme ne préjugant en rien de leur importance biologique (Calvet *et al.*, 2005)

Tableau 2. Modalités d'utilisation des pesticides (Calvet *et al.*, 2005).

Insecticides	
Modalités d'utilisation	Exemples de substances actives
Traitement des parties aériennes des végétaux	Deltaméthrine, parathion, pyrimicarbe
Traitement des semences	Carbofurane, fipronyl
Traitement des sols	Chlorméphos, diazinon
Traitement des locaux de stockage	Dichlorvos, perméthrine
Traitement des bâtiments d'élevage	Cyperméthrine, trichlorfon
Fongicides	
Modalités d'utilisation	Exemples de substances actives
Traitement des parties aériennes des végétaux	Mancozèbe, bénomyl, éthyrimol, tébuconazol, cuivre, soufre
Traitement des semences et des plants	Captane, iprodione
Traitement des denrées entreposées	Diphénylamine, thiabendazol
Traitement des sols	Carbendazime, métalaxyl, manèbe
Traitement des locaux et du matériel	Ammonium quaternaire
Herbicides	
Modalités d'utilisation	Exemples de substances actives
Désherbage des cultures	Simazine, trifluraline, isoproturon, chlorprophame
Défanage	Diquat
Débroussaillage	2,4-D, piclorame, tricopyr
Désherbage des zones non-cultivées	Glyphosate, aminotriazole, diuron
Destruction des mauvaises herbes aquatiques et semi-aquatiques	Chlorthiamide, dichlobényl

Tableau 3. Modes d'action des fongicides

<p>Action sur les processus respiratoires</p> <p>Inhibition des complexes II et III</p> <p>Phosphorylation oxydative</p> <p>Inhibition de la germination</p>	<p>Action sur les biosynthèses</p> <p>Biosynthèse des stérols</p> <p>Biosynthèse de l'ARN et l'ADN</p> <p>Biosynthèse des mélanines</p>
---	--

<p>Action sur les microtubules Combinaison avec la tubuline</p>	<p>Autres modes d'action Action sur les membranes et la croissance Inhibition de germination Modification de la perméabilité cellulaire Inhibition de l'élongation des tubes Germinatifs</p>
--	---

Tableau 4. Modes d'action des insecticides et acaricides

<p>Action sur le système nerveux Action sur les synapses et les Neuromédiateurs Action sur la transmission axonale</p>	<p>Action sur la cuticule Inhibition de la chitine</p>
<p>Action sur la respiration Inhibition du transport des électrons dans les Mitochondries Inhibition de la phosohorylation oxydative</p>	<p>Perturbateurs de mue Action sur l'ecdysone Action sur l'hormone juvénile</p>

Tableau 5. Modes d'action des herbicides

<p>Inhibition de la photosynthèse Inhibition du PSI et PSII</p>	<p>Inhibiteurs de la synthèse des caroténoïdes Inhibition de la PDS et de la HPPD</p>
<p>Inhibition de la synthèse des lipides Inhibition de l'enzyme ACCase, des élongases et des enzymes de cyclisation du GGPP</p>	<p>Inhibiteurs de la synthèse des chlorophylles</p>
<p>Inhibition de la synthèse des acides aminés (chloroplastes) Inhibition de la synthèse de la glutamine, des AA aromatiques et des AA ramifiés.</p>	<p>Découplants</p>
<p>Perturbation de la régulation de l'auxine AIA Inhibiteurs de la division cellulaire, blocage de la tubuline, du fuseau achromatique, blocage de la synthèse de l'acide folique.</p>	<p>Perturbateurs de croissance Inhibition du transport auxinique et de la synthèse de la cellulose.</p>

1.7. Doses admissibles et normes

Le décret du 3 Janvier 1989 définit le taux maximum admissible de divers polluants dans les eaux de consommation. La plupart des pesticides ne doivent pas dépasser 0,1 µg par litre, la tolérance étant abaissée à 0,03 µg pour l'aldrine et la dieldrine et 0,01 µg pour l'hexachlorobenzène. Par comparaison la plupart des pesticides qui ont une structure d'hydrocarbures polycycliques sont tolérés jusqu'à 0,2 µg par litre. Ces valeurs ont été choisies avec l'objectif d'assurer la protection de la santé publique

1.8. Devenir des pesticides dans l'environnement

Emportés par les eaux de ruissellement ou diffusés dans les eaux souterraines, volatilisés dans l'atmosphère ou stockés dans les sols, les pesticides se retrouvent dans de nombreux écosystèmes voire dans les aliments. Aujourd'hui de nombreuses recherches s'attèlent à comprendre comment les pesticides contaminent l'environnement et ce qu'ils deviennent au cours du temps, pour évaluer les expositions des populations et des écosystèmes à ces substances. Les matières actives phytosanitaires sont appliquées le plus souvent sous la forme de liquides pulvérisés sur les plantes et/ou sur le sol. Dans certains cas, elles sont incorporées au sol ou y sont injectées ou sont déposées sous forme de granulés, ou encore les graines en sont enrobées.

Le produit de traitement, lors d'une application, se trouve réparti en proportion variant avec le stade de la culture, la formulation, la cible, la technique d'application et les conditions météorologiques entre le sol, le feuillage de la plante ou les résidus de culture et des pertes dues à la « dérive ». Lors des traitements par aéronef, jusqu'à la moitié du produit peut être entraîné par le vent en dehors de la zone à traiter (Pimentel et Levitan, 1986).

Connaître le devenir des produits phytosanitaires après leur épandage en zone agricole est une nécessité car la pollution engendrée par ces matières actives peut avoir des conséquences graves sur la santé et l'environnement. L'ensemble de la communauté scientifique s'accorde sur le danger et la nocivité des produits phytosanitaires et de leurs métabolites sur l'environnement. La contamination s'effectue à tous les niveaux : de l'air à l'eau en passant par les aliments.

Le devenir des pesticides dans l'environnement, c'est à dire leur rétention, leur transport et leur dégradation, dépend de leurs propriétés ainsi que de celles des différents compartiments concernés, le sol, les eaux et l'atmosphère. (Calvet et *al.*, 2005).

Les recherches consacrées à la dispersion des pesticides dans l'environnement ont prouvé la présence de ces produits dans plusieurs points de la biosphère qui n'ont subi aucun traitement (Schomburget *al.*, 1991). Les phénomènes de transfert qui affectent les produits phytosanitaires sont très complexes et les réactions possibles de l'écosystème à leur présence sont largement méconnues (Weber, 1991).

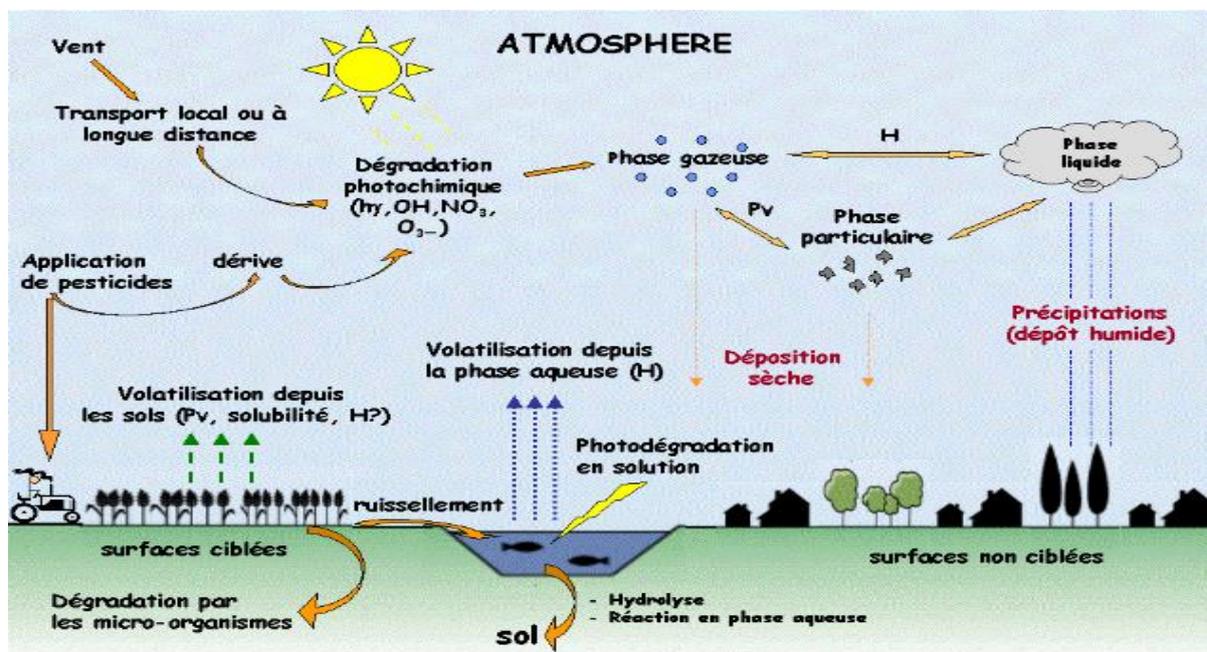


Figure 1. Devenir des pesticides dans l'environnement (El Rachidi, 2012).

1.8.1. Le transfert des pesticides vers les eaux superficielles et souterraines

Le transfert des pesticides vers les eaux de surface et souterraines est réalisé sous forme dissoute et sous forme particulaire. A la surface du sol, le ruissellement qui est responsable de ce transfert peut-être déclenché lorsque la pluie dépasse la capacité d'infiltration au sol ou bien par le débordement de la nappe. Dans ce cas, le transfert s'effectue sous forme dissoute et particulaire (Guigon-Moreau, 2006). Dans le sol, il peut également y avoir un écoulement horizontal de subsurface (hypodermique). La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement et les caractéristiques du sol déterminent l'importance de cet écoulement (Musy, 2005).

L'eau est le principal vecteur des produits phytosanitaires dans le sol. En effet, le transport des pesticides dans la phase liquide du sol a lieu *via* trois principaux phénomènes (Calvet et *al.*, 2005).

- La diffusion moléculaire : c'est le mouvement des molécules dissoutes, créé par un gradient de concentration existant dans l'espace poral du sol. Ce phénomène correspond à

un déplacement du pesticide de la zone où sa concentration est élevée vers la zone où elle est moins élevée.

- La convection : le transport du pesticide se fait au moyen d'un seul déplacement d'une phase liquide : l'eau du sol. Ce type de transport obéit aux lois qui régissent l'écoulement de l'eau dans le sol.
- La dispersion hydrodynamique est la résultante de la combinaison de la diffusion moléculaire dans la phase liquide en déplacement (l'eau du sol) et de la variation spatiale de la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'espace poral. Ainsi, la dispersion traduit la répartition des molécules dans le milieu poreux où la convection a eu lieu (Pot *et al.*, 2005)

Le transport des pesticides concerne généralement les espèces dissoutes mais peut également avoir lieu quand les molécules sont associées aux colloïdes du sol (particules de 1 nm à 1 µm de taille comprenant les argiles, la matière organique et la biomasse microbienne). On parle dans ce cas de transport particulaire. Les particules colloïdales se comportent comme une phase solide mobile qui adsorbe les polluants organiques et qui peut migrer dans le sol de façon similaire ou parfois supérieure à la phase aqueuse (Jacobsen *et al.*, 1997 ; Hesterberg, 1998 ; MacGehan et Lewis, 2002 ; Pot *et al.*, 2005).

1.9. Facteurs influençant le transfert des pesticides vers les eaux souterraines

Les quantités de pesticide transférées vers les eaux souterraines dépendent de divers facteurs relatifs aux propriétés physico-chimiques des produits phytosanitaires et des sols, ainsi que des pratiques culturales et des conditions climatiques (Beigel et Di Pietro, 1999).

1.10. Persistance

Initialement, la notion de persistance a été utilisée pour les pesticides ; elle reflète la capacité de la substance à ne pas être altérée par des processus physiques, chimiques et biologiques. « La persistance correspond donc à la stabilité des composés dans l'environnement, à leur résistance à une décomposition ou à une transformation dans la nature ». Il est important de souligner que les composés issus de la dégradation d'une substance initiale et ne pouvant être détruits dans la nature sont aussi considérés comme persistants mais persistants secondaires voire tertiaires.

On fait par ailleurs une différence entre la persistance voulue et non désirée, dans le sens où la persistance non désirée induit un effet au-delà du temps prévu initialement (typiques des composés organochlorés comme le DDT). Cependant « il n'existe pas de mesure absolue

de la persistance des composés. » On s'appuie plus sur des comparaisons entre différents composés. On s'aide alors des caractéristiques physicochimiques liées à la stabilité ou la réactivité des substances (comme la vitesse de réaction, le temps de demi-vie) (Bliefert et Perraud, 2001).

1.11. Formation de résidus liés

Avec l'augmentation du temps de résidence, des liaisons se forment entre la matrice et les molécules et entraînent une diminution de la désorption voire l'irréversibilité de l'adsorption (Barriuso et *al.*, 2008). Les résidus liés sont en partie à l'origine des phénomènes d'hystérèse.

Les résidus liés sont définis comme : « des composés dans le sol, la plante ou un animal qui restent dans la matrice sous la forme originelle ou de métabolite après extraction »(Führ et *al.*, 1998). De manière générale, la présence de résidus liés est considérée comme un processus de stabilisation, cependant ils peuvent être remobilisés sous certaines conditions (Barriuso et Houot, 1996).

1.13. Toxicité des pesticides sur l'homme

Les pesticides ne sont pas seulement nocifs sur les animaux et les plantes mais ils sont également sur l'homme. Ainsi, 15 à 20% de ces produits chimiques sont cancérigènes et la plupart d'entre eux sont des perturbateurs endocriniens. (Meyer et *al.*, 2003)

C'est une biologiste américaine, Rachel Carson, qui en 1962 tire pour la première fois la sonnette d'alarme avec la publication de son livre Printemps silencieux. L'ouvrage montre alors l'effet délétère des pesticides sur l'environnement et particulièrement chez les oiseaux.

Le DDT (insecticide interdit par la suite en 1972) amincirait les coquilles d'œuf chez les oiseaux entraînant une hausse de la mortalité et des problèmes de reproduction. Les chercheurs s'aperçoivent également que des pesticides modifient le sexe de certains batraciens ou provoquent des difficultés de reproduction d'invertébrés.

L'homme et les animaux en général, absorbent les pesticides et leurs produits dérivés via la nourriture, l'eau, l'air respiré ou par contact avec la peau ou les cuticules. Les agriculteurs et les ouvriers qui préparent les mélanges et réalisent les traitements ont plus de risque que le reste de la population d'être atteints par contact de la peau ou par inhalation. Ainsi, chez les agriculteurs, malgré une espérance de vie plutôt supérieure à la moyenne du fait d'une sous-mortalité par maladies cardiovasculaires et par cancers en général (Viel et *al.*, 1998), il a été remarqué que la mortalité et l'incidence de certains types de cancers ont augmentés. Il s'agit

en général de cancers peu fréquents voire rares tels que les cancers des lèvres, de l'ovaire, du cerveau, de mélanome cutané et de la plupart des cancers du système hématopoïétique (leucémies, myélomes, lymphomes). Le cancer de la prostate et de l'estomac, cancers nettement plus fréquents, seraient également concernés (Meyer et *al.*, 2003).

Il s'est également avéré que des produits de dégradation des pesticides peuvent être aussi toxiques, ou même plus toxiques, que la molécule d'origine (Guillard et *al.*, 2001 ; Forman et *al.*, 2002).

Les pesticides et leurs sous-produits ont été également identifiés en tant qu'agents susceptibles de porter atteinte au processus de fertilité masculine, via une toxicité testiculaire (Sanchez-Pena et *al.*, 2004). Des études faites sur des rats ont clairement montré les effets nocifs du méthyl-parathion sur le système de reproduction (Joshi et *al.*, 2003). Il a été remarqué que chez des femmes exposées à des pesticides, le risque de mortalité intra-utérin augmentait et que la croissance fœtale diminuait. A noter aussi que des pesticides ont été retrouvés dans le cordon ombilical mais aussi dans le lait maternel, ce qui pourrait expliquer le mauvais développement du fœtus, les malformations congénitales et les anomalies du système nerveux central (Levario-Carillo et *al.*, 2004).

Mais tous ces liens entre les produits phytosanitaires et certains cancers ne sont que des suppositions. De nombreuses études toxicologiques se contredisent à ce sujet. Il n'est pas exclu que d'autres facteurs de risque présents en milieu agricole (comme le tabagisme, le rayonnement solaire, l'alimentation...) puissent jouer un rôle important dans le déclenchement de ces cancers (Kelley et *al.*, 2003).

Le plus souvent, le toxique est ingéré sous forme de résidus présents dans la nourriture ; mais l'absorption peut se faire dans l'eau de boisson, par l'air inhalé ou par contact de la peau avec le produit (Spear, 1991). Les agriculteurs et les ouvriers qui préparent les mélanges et réalisent les traitements risquent plus que le reste de la population d'être atteints par contact de la peau ou par inhalation. Aux États-Unis, 99% des gens stockent du DDT (ou des dérivés de cet organochloré) dans leurs tissus adipeux, et ce à raison de 4 ppm. On a trouvé beaucoup de pesticides dans le lait humain, parfois en quantité supérieure à la DJA pour le nourrisson (Jensen, 1983).