

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Polycopié de Cours

Ecotoxicologie



Destiné aux étudiants de Master Eau et Environnement
Socle commun des Sciences de la Nature et de la Vie (SNV)

Dr SMAIL Adel

2019/2020

Introduction	1
Chapitre 1. L'écotoxicologie	3
1-1-Définition de l'écotoxicologie.....	3
1-2-Ecologie et écotoxicologie.....	3
1-3-Domaine d'intervention de l'écotoxicologie.....	4
1-4-La pollution.....	4
1-5-Classification des pollutions.....	5
Chapitre 2. Le problème de la pollution de l'écosphère	6
2-1-Nature et modalités de pollution de la biosphère.....	6
2-1-1-Historique.....	6
2-1-2-Les causes de la pollution de l'écosphère.....	6
a- La production d'énergie.....	6
b- Les activités industrielles.....	7
c- La diversification des polluants chimiques et l'accumulation des déchets.....	7
d- L'agriculture.....	8
2-2-Dispersion et circulation des polluants dans la biosphère.....	9
2-2-1-Circulation atmosphérique des polluants.....	9
2-2-2- Incorporation des polluants dans la biomasse.....	9
2-3-Cas de figure : La pollution de l'eau.....	10
Chapitre 3. Santé humaine et toxicologie environnementale	14
3-1-Définition de la toxicologie.....	14
3-2-Santé humaine.....	14
3-3-Maladies émergentes et recrudescence.....	14
3-4-Pollution environnementale et maladies.....	15

3-4-1-Persistence, bioaccumulation et amplification biologique des agents de contamination environnementaux.....	15
3-4-2-Perturbateurs du système endocrinien.....	16
3-4-3-Les enfants et l'exposition aux produits chimiques.....	17
3-4-4-Identifier les substances responsables du cancer.....	17
3-4-5-Mélanges chimiques.....	18
3-4-6- Cas de figure : Pandémies de grippe dans le passé et dans l'avenir.....	19

Chapitre 4. Effets des produits toxiques (polluants) sur les populations et les écosystèmes.....	20
4-1-Effets sur les populations.....	20
4-1-1-Principaux types d'effets démo-écologiques des polluants.....	20
a-Effets sur des populations végétales.....	20
b-Effets sur des populations animales.....	20
4-1-2-Effets des polluants sur le potentiel biotique.....	20
a-Effets sur la reproduction.....	21
b-Effets sur la mortalité embryonnaire et néonatale.....	21
4-1-3-Effets sur la croissance.....	21
4-1-4- Cas de figure : Effets des pesticides sur les organismes et les écosystèmes.....	22
4-1-5-Adaptation des populations aux polluants: tolérance et résistance.....	23
a-Tolérance aux métaux lourds.....	23
b-Résistance aux pesticides.....	23
b-1- Résistance des insectes aux insecticides.....	23
b-2- Résistance des plantes aux herbicides.....	24
b-3- Autres exemples de résistance aux polluants.....	24
b-4- Résistance aux multixénobiotiques.....	24
4-2-Effets sur les écosystèmes.....	25
4-2-1-Effets des polluants sur la structure des écosystèmes.....	25

4-2-2-Effets sur le fonctionnement des écosystèmes.....	25
4-2-3-Descripteurs des effets des polluants sur la régulation du fonctionnement des écosystèmes.....	26
Chapitre 5. Monitoring des polluants.....	27
5-1-Monitoring des polluants dans les écosystèmes.....	27
5-1-1-Les bio-indicateurs de contamination.....	27
5-1-2-Les caractéristiques requises d'un bio-indicateur.....	28
5-1-3-Utilisation des bio-indicateurs.....	29
5-2-Biomarqueurs.....	29
5-2-1-Réaction des organismes à une contamination par des xénobiotiques toxiques....	29
5-2-2-Principaux types de biomarqueurs.....	30
5-2-3-Principales applications des biomarqueurs.....	30
5-3-Cas d'étude : Le monitoring des OGM.....	31
Chapitre 6. Prise de décision et incertitude: une estimation des risques.....	33
6-1-Coûts et bénéfices de l'analyse des risques.....	33
6-2-Le principe de précaution.....	33
6-3-Estimation des risques écologiques.....	34
6-4- Point de vue équilibré sur les risques.....	34
Conclusion.....	35
Références bibliographiques.....	37

L'homéostasie de la biosphère n'a jamais été menacée par aucune des innombrables espèces vivantes qui l'ont peuplée jusqu'à l'époque très récente, eu égard à la durée des temps géologiques, où se différencia, avec le genre humain, le pire des ravageurs que l'univers ait connu.

Le progrès incessant de la technologie associé à un vertigineux accroissement démographique exercèrent sur le milieu naturel une action destructrice sans égale dans l'histoire de la terre.

L'homme apparaît donc comme l'unique responsable de la dégradation de la biosphère. Au fur et à mesure du développement de la pensée réfléchi et des autres progrès biologiques associés à l'homínisation, notre espèce a mis au point de nouvelles méthodes d'exploitation de la nature, de nouveaux outils, des technologies sans cesse plus perfectionnées, qui lui ont permis d'altérer, à un degré inégalé, la surface du globe. Les progrès de l'intelligence se sont accompagnés, non sans quelques paradoxes, d'une acquisition de comportement psychologiques néfastes.

La perception des dimensions planétaires de la dégradation de l'environnement de l'homme n'a commencé à émerger qu'au cours des années soixante. Il est en définitive rapidement apparu que les pollutions occupaient une place sinon unique du moins prépondérante parmi les divers processus de perturbations anthropogéniques qui affectaient la biosphère. Ainsi, dès 1967, un groupe international d'experts scientifiques très réputés qui s'était réuni à Boston avait identifié les principaux types de dégradations strictement dues à l'action de l'homme qui se manifestaient à une échelle globale. Le rapport de ce groupe d'experts avait entre autre choses déjà évalué l'ordre de grandeur de la hausse des températures terrestres que l'on pouvait attendre de l'usage des combustibles fossiles et l'ampleur des changements climatiques qui en résulterait sur la base de la croissance de la consommation d'énergie mondiale enregistrée à cette époque. L'essentiel de ce document était surtout consacré aux travaux de ce groupe d'experts pour déterminer les principales causes de pollution par des substances toxiques qui pourraient constituer dans un proche avenir une menace à l'échelle globale et les conséquences écologiques désastreuses qui pourraient en résulter pour la biosphère toute entière, voire qui se manifestaient déjà.

Depuis lors, l'importance de l'invasion chimique non intentionnelle et ubiquiste de la biosphère par des substances toxiques a conduit à l'émergence du concept de crise globale de l'environnement. En réalité, un nombre sans cesse accru de sources de pollutions majeures

menace des surfaces continentales et/ou océaniques de plus en plus étendues, voir l'écosphère prise dans son ensemble, compromettant depuis déjà plusieurs décennies les équilibres écologiques globaux.

On peut donc affirmer que les recherches suscitées par la mise en évidence d'une contamination à l'échelle macro-écosystémiques terrestre et océanique et des conséquences biologiques qui en résultent ont joué un rôle considérable dans le développement de l'écotoxicologie contemporaine. La majorité des préoccupations scientifiques afférentes à la problématique de la pollution environnementale s'est regroupée au cours des dernières décennies dans une nouvelle subdivision des sciences écologiques que l'on a dénommée « Ecotoxicologie ».

1-1- Définition de l'écotoxicologie

Comme son nom l'indique, l'écotoxicologie recouvre les domaines de l'écologie et de la toxicologie. La toxicologie a été définie comme «l'étude des effets négatifs des produits chimiques sur les organismes vivants» (Klaassen et Eaton, 1991). La toxicologie s'intéresse aux effets des produits chimiques sur les individus, ou les éléments qui les composent, et plus particulièrement aux mécanismes des effets nocifs et aux conditions dans lesquelles ils se produisent (*American Institute of Biological Sciences* 1978).

La définition originale de l'écotoxicologie est généralement attribuée à Truhaut (1977) : «la branche de la toxicologie qui étudie les effets toxiques provoqués par les substances naturelles ou les polluants d'origine synthétique sur les constituants des écosystèmes animaux, y compris l'homme, végétaux et micro-organismes, dans un contexte intégré».

Une autre définition proposée par Ramade (1977) plus simple et beaucoup plus pertinente est la suivante : «l'écotoxicologie est la science qui étudie les polluants dans les écosystèmes ». Prise en sens strict, l'écotoxicologie peut donc être définie comme la science dont l'objectif est l'étude des polluants toxiques dans les écosystèmes (Ramade 1977, Moriarty 1983) et même dans la biosphère toute entière (Ramade, 1992).

1-2- Ecologie et écotoxicologie

L'écologie est l'étude de la structure et du fonctionnement des écosystèmes. Elle est concernée par les voies et les vitesses des transferts d'énergie et de matière à l'intérieur et entre les constituants de l'écosystème (devenir) et par les effets sur ces constituants (structure et fonctionnement). Les écologues étudient les processus se produisant à différents niveaux d'organisation, organisme, population, communauté, et écosystème. Neuhold (1986) fait la remarque intéressante que, d'une certaine manière, la toxicologie est une subdivision de l'écologie, spécifiquement l'étude de l'individu en relation avec son environnement. La physiologie est l'étude de la structure et du fonctionnement des organismes. L'écologie et la physiologie s'intéressent à la structure et au fonctionnement de systèmes biologiques en conditions «normales», alors que la toxicologie et l'écotoxicologie ont pour objet l'étude des systèmes perturbés.

L'écotoxicologie tire ses principes de l'écologie et de la toxicologie, mais nous estimons qu'il est insuffisant de classer l'écotoxicologie comme une sous-discipline de l'écologie (Moriarty, 1983) ou comme une sous-discipline de la toxicologie (Truhaut, 1977). L'écotoxicologie est

basée sur les principes de l'écologie, de la physiologie, de la chimie, de la toxicologie et d'autres sciences telles que la biochimie et la biologie moléculaire.

1-3- Domaine d'intervention de l'écotoxicologie

Si on considère le volet «recherche scientifique» de l'écotoxicologie on est très vite confronté à des divergences d'opinion assez surprenantes. La plupart des écotoxicologues considèrent leur travail comme de l'écotoxicologie soit fondamentale, soit appliquée. Mais il y'a deux raisons pour ne pas faire une distinction entre recherche «fondamentale» et «appliquée». La première, commune à toutes les disciplines scientifiques, est que cette distinction est plus apparente que réelle. Dans un éditorial paru en 1991 dans *science*, Koshland écrit ceci:

«La frontière entre la recherche pure et les applications pratiques a toujours été difficile à tracer. Certain aiment bien dire qu'ils font de la recherche pure sans idées d'application, sous-entendant ainsi qu'ils font quelque chose non seulement de plus noble, mais aussi de plus difficile. En face, non moins péremptores, des chercheurs appliqués font remarquer qu'ils travaillent pour le bien de l'humanité, et que d'autres, dans leur tour d'ivoire, se font uniquement plaisir à eux-mêmes. Ces divisions ne devraient plus exister. Bien avisé qui pourrait dire avec certitude quel résultat fondamental n'aura jamais aucune application ou quelle recherche appliquée génèrera de nouveaux concepts, ou encore ce qui a intellectuellement le plus de valeur».

Le deuxième problème dans notre tentative de distinction entre «fondamental» et «appliqué» est propre l'écotoxicologie.

Nous avons découvert que l'écotoxicologie appliquée serait ce qui est à peine de la recherche, à savoir l'exécution de tests classiques sur de nouveaux produits. De telles pratiques perpétuent non seulement l'utilisation d'essais reconnus comme médiocres, mais en plus ils détournent les efforts de recherche et les financements des approches innovantes qui amélioreraient vraiment notre capacité à bien comprendre et contrôler l'usage des produits chimiques dans l'environnement.

1-4- La pollution

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader. Ces vocables ne prêtent pas à équivoque, malgré leur empirisme et bien qu'ils recouvrent des notions fort générales, ils paraissent tout aussi adéquats que les longues définitions données par les experts. Parmi celles-ci, nous retiendrons une définition établie en 1965 par les experts du comité

scientifique du premier comité de la maison blanche pour la protection de l'environnement intitulé « pour restaurer la qualité de notre environnement ».

« La pollution, dit ce rapport, est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature».

1-5- Classification des pollutions

On peut grouper les agents polluants selon leur nature : **physique** (rayonnements ionisants, réchauffement artificiel du milieu ambiant dû à une source de chaleur technologique), **chimique** (substances minérales, organiques abiotiques ou encore de nature biochimique), enfin **biologique** (micro-organismes pathogènes, populations d'espèces exotiques invasives introduites artificiellement par l'homme) et en date récente l'apparition de nouveaux problèmes liés à la pollution de l'espace rural par les OGM. , etc. Enfin on peut encore classer les pollutions de façon écologique, en prenant en considération le milieu (air, eau et sol)-ou le compartiment de la biosphère afférent (atmosphère, hydrosphère, pédosphère)- dont lequel ils sont émis et sur les biocénoses sur lesquelles ils exercent leurs perturbations.

On peut aussi se placer d'un point de vue toxicologique et considérer le milieu ou la manière par laquelle ils contaminent les organismes. On distinguera selon la voie de contamination : chez les végétaux une absorption stomatale, transfoliaire ou une translocation radiculaire. Chez les animaux, on peut distinguer une contamination par inhalation (chez les espèces terrestres), par absorption transbranchiale (chez les espèces aquatiques), par ingestion, ou encore pénétration transcutanée à la suite de contact de la peau ou du tégument avec le polluant.

En réalité, aucune de ces méthodes de classification n'est vraiment satisfaisante car une même substance peut présenter diverses modalités d'action. Le mercure libéré dans les sols passera dans l'atmosphère et les eaux, il peut être à la fois ingéré avec les aliments ou inhalé à l'état de vapeur, etc.

2-1- Nature et modalités de pollution de la biosphère

2-1-1- Historique

A l'encontre d'une opinion fort répandue, le problème des pollutions n'est pas un phénomène récent ou accidentel, ses origines remontent aux époques protohistoriques lorsque se constituèrent les premières cités, avec leurs ruisseaux d'écoulement des effluents domestiques et l'entassement dans les rues de débris divers. Depuis ces temps reculés, on peut affirmer que la pollution urbaine a toujours sévi. Tous ces problèmes résultent de la création par l'homme de déchets qu'il ne cherche pas à détruire ou à recycler, même lorsque l'état actuel de la technologie le permet dans des conditions économiques tout à fait acceptables. En conséquence, tandis que population et pollution croissent de façon ininterrompue, le pouvoir auto-épurateur du milieu naturel suit une évolution inverse en fonction du temps, vers sa saturation sinon vers sa neutralisation complète.

2-1-2- Les causes de la pollution de l'écosphère

a- La production d'énergie

La véritable boulimie énergétique qui s'est emparée des pays anciennement industrialisés, outre qu'elle implique un gaspillage effréné de ressources naturelles à la fois peu abondantes et non renouvelables comme le pétrole, joue un rôle prépondérant dans la contamination de l'environnement par d'innombrables substances toxiques. L'une des dimensions essentielles de la « crise de l'énergie » prise au sens large, autre que celle représentée par l'épuisement des ressources, tient dans les multiples pollutions générées par les divers usages anarchiques, peu soucieux des perturbations qu'ils induisent dans la biosphère qu'en fait la civilisation contemporaine. La satisfaction des besoins énergétiques de la civilisation technologique contemporaine est aujourd'hui encore essentiellement fondée sur l'usage des combustibles fossiles.

Les aéropolluants produits par la combustion soulèvent de très graves problèmes environnementaux. Ces derniers découlent en particuliers des rejets dans l'atmosphère de SO_2 et NO_x , dont résultent les désastreux phénomènes des pluies acides et en outre, pour les seconds, ceux des smogs photochimiques, ainsi que de particules solides dont l'impact est redoutable pour la santé publique.

b- Les activités industrielles

La métallurgie et les activités minières qui lui sont associées constituent historiquement, de même que l'extraction de charbon et son usage comme combustible, la première cause majeure de pollution de l'environnement d'origine industrielle. L'accroissement colossal de la production de métaux non ferreux au cours des derniers siècles s'est fatalement accompagné d'une augmentation faramineuse des quantités de polluants atmosphériques rejetés par ces industries à la fois sous forme particulaire, mais aussi de gaz toxique, en particulier le redoutable SO₂.

L'expression extraordinaire qu'a connue l'industrie chimique au cours du dernier demi-siècle s'est aussi traduite par la mise en circulation dans la biosphère d'innombrables substances minérales et organiques de toxicité élevée.

La métallurgie et l'électronique recourent de plus en plus à des oligoéléments et à des éléments «exotiques», de nature xénobiotique, car ils ne figurent pas comme des constituants normaux de la matière vivante. Parmi les plus redoutables, nous citerons l'arsenic, le molybdène, le vanadium ou le sélénium, le mercure, le cadmium, le plomb, le chrome et le nickel. Ces éléments sont couramment employés dans diverses branches industrielles. En réalité, aujourd'hui encore, on peut estimer que moins du tiers des substances chimiques commercialisées dans le monde avaient été évaluées pour leur impact potentiel sur la santé humaine. Que dire alors des risques et des dangers écotoxicologiques qui leur sont associés ?

c- La diversification des polluants chimiques et l'accumulation des déchets

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, la chimie organique a mis à notre disposition une multitude de nouvelles molécules de synthèse. On estimait dans les années 1990 que 120.000 molécules étaient commercialisées dans le monde et que chaque année étaient mises sur le marché 500 à 1000 substances chimiques nouvelles.

Il est opportun de se demander, à ce propos, quel est l'ordre de grandeur des divers types de pollution et de nuisances que les technologies modernes entraînent à l'heure actuelle ? Les bilans se multiplient chaque jour. Ainsi, aux Etats Unis dans les années 1990, la production de déchets urbains excédait 220 millions de tonnes et celle des déchets industriels plus de 800 millions de tonnes dont environ 275 millions de tonnes de déchets chimiques. La production mondiale de déchets solides industriels atteignait 2,5 milliards de tonnes en 2000 dont 400 millions de tonnes de déchets très toxiques. L'un des aspects les plus redoutables de la pollution globale par les substances chimiques de synthèse tient en la croissance des rejets de polluants organiques persistants (POPs). Par suite de leur ubiquité et de leur stabilité, ces

substances (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), solvants chlorés, polychlorobiphényles (PCB), pesticides organochlorés, dioxines...) se rencontrent, de nos jours, dans les régions les plus reculées de la biosphère, tant continentales qu'océaniques. L'océan constitue, en effet, l'ultime zone d'accumulation de tous les résidus toxiques produits par la technologie moderne. La civilisation technologique contemporaine, occidentale par essence, continue à considérer l'océan à la fois comme une poubelle et comme un garde-manger, usage à priori incompatibles.

d- L'agriculture

Depuis l'avènement d'une agriculture à vocation productive, les différents compartiments de l'environnement ont été progressivement contaminés par les intrants organiques ou chimiques utilisés parfois massivement. Alors que les eaux continentales de surface et souterraines souffrent d'une contamination quasi généralisée par les pesticides, les données relatives à la contamination de l'air et des dépôts atmosphériques restent fragmentaires. Toutefois, elles permettent de mettre en évidence la présence de pesticides dans toutes les matrices atmosphériques (gazeuse, liquide, particulaire), en concentrations variables dans le temps et dans l'espace. Enfin, bien qu'il n'existe pas de dispositif équivalent à ceux relatifs à l'eau et à l'air pour caractériser la contamination des sols par les pesticides, des exemples de contaminations chroniques (cuivre, chlordécone...) sont bien connus. Cette contamination généralisée des milieux par les pesticides soulève de nombreuses questions sur les impacts environnementaux et sanitaires induits (impacts sur la biodiversité, sur les écosystèmes, sur la santé humaine, sur la sécurité sanitaire des aliments, etc.). Les problèmes de contamination et les dangers qui en découlent sont souvent associés à la dispersion ou au transfert des pesticides. Un des leviers pour mettre au point des pratiques agricoles- et plus spécifiquement phytosanitaire- permettant de réduire ces risques de contamination est donc de limiter les transferts des pesticides dans l'environnement, ce qui nécessite l'identification et la compréhension de l'ensemble des processus impliqués dans ces phénomènes (figure1).

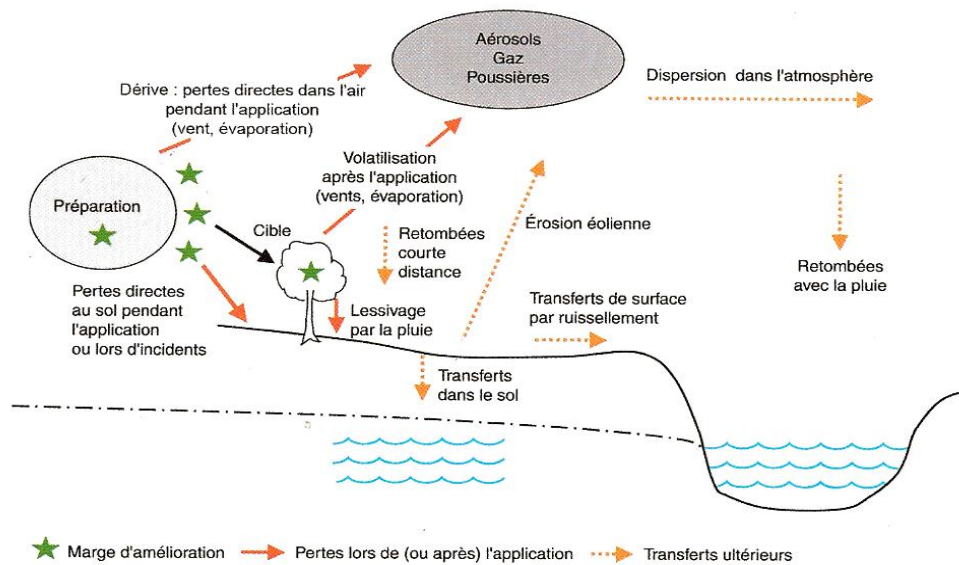


Figure 1. Mécanismes mis en jeu lors des épandages par pulvérisation (Aubertot *et al.*, 2005).

2-2- Dispersion et circulation des polluants dans la biosphère

2-2-1-Circulation atmosphérique des polluants

Le rejet d'agents polluants dans l'environnement est un phénomène complexe. Aucune des substances que l'homme libère dans la biosphère ne reste en place, dans la plupart des cas elles émigrent même fort loin du lieu de rejet.

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la répartition des agents polluants. En effet, qu'il soit gazeux, liquide ou même solide, tout composé organique ou minéral peut, théoriquement, passer dans l'air. Evident dans le cas des gaz, ce passage s'effectue pour les liquides sous forme d'aérosols ou par évaporation si leur tension de vapeur est suffisante. Quant aux solides, ils peuvent tous être entraînés dans l'atmosphère, à condition qu'ils se trouvent réduits à l'état de fines poussières. Ce sont les courants ascendants et les vents qui dispersent les substances polluantes en altitude et assurent ainsi leur circulation troposphérique. Cette contamination de l'atmosphère ne se fait pas au hasard mais selon des mécanismes bien définis liés aux divers paramètres qui contrôlent les phénomènes météorologiques.

2-2-2- Incorporation des polluants dans la biomasse

Toute substance qui contamine le milieu naturel peut être incorporée par les êtres vivants, grâce aux multiples processus métaboliques. Elle va de sorte pénétrer dans les réseaux trophiques de divers écosystèmes, s'intégrer au cycle de la matière dans les biocénoses et

exercer une action néfaste sur d'innombrables espèces végétales et animales qu'elles comportent.

La dilution des agents polluants dans l'air ou les eaux, sur laquelle la civilisation industrielle a trop longtemps compté pour atténuer leurs effets, apparaît comme un phénomène somme toute limité quand on étudie son importance. La capacité réceptrice du milieu sur laquelle les pouvoirs publics, leurs experts et autres responsables du contrôle des pollutions, s'est avérée peu efficace dans le moyen terme.

Un autre aspect encore plus redoutable de la pollution résulte de l'intervention de nombreuses espèces vivantes qui facilitent la dispersion des substances toxiques, bien au-delà des zones de rejet. Ainsi, diverses espèces d'oiseaux d'Amérique du Nord tempérée qui migrent en Amérique tropicale où est située leur aire d'hivernage s'y contamineront par de fortes concentrations d'insecticides organochlorés encore largement utilisés dans ces pays. Ils sont de ce fait à l'origine d'une pollution des chaînes trophiques lorsqu'ils retourneront dans leur aire de nidification.

Les processus évoqués montrent que non seulement les organismes effectuent une dispersion active de nombreux polluants, mais pis encore, peuvent les concentrer dans leur tissus, ce qui accroît les risques toxicologiques. Il existe même dans la nature un ensemble d'espèces animales et végétales qui se comportent en véritables concentrateurs biologiques.

2-3-Cas de figure : La pollution de l'eau

La pollution de l'eau est un problème global dont la gravité et la nature varient d'une région à l'autre. Dans de nombreux endroits, le principal problème est la contamination de l'eau par les germes pathogènes. On classe les polluants de l'eau en huit catégories : les eaux d'égouts, les agents vecteurs de maladies, les matières en suspension, les nutriments minéraux des algues et des plantes, les matières organiques, les produits chimiques non organiques, les substances radioactives et la pollution thermiques. Ces huit types ne sont pas exclusifs : par exemple, les eaux usées peuvent contenir des agents pathogènes, des nutriments minéraux d'algues et de plantes, et des matières organiques.

-Les eaux usées

Le rejet des eaux usées dans les cours d'eau pose plusieurs problèmes. Tout d'abord parce qu'elles véhiculent des agents pathogènes. L'eau polluée par les rejets d'eau usée est ainsi une menace pour la santé publique. Les eaux d'égout génèrent aussi deux problèmes environnementaux sérieux : l'enrichissement de l'eau en matière organique et la baisse de la teneur en oxygène dissous des cours d'eau.

La quantité de matières organiques présentes dans l'eau se mesure en termes de demande biochimique en oxygène (DBO), ou demande biologique en oxygène. La DBO est généralement exprimée en milligrammes d'oxygène dissous par litre d'eau pendant un nombre de jours précis à une température donnée. La DBO d'une eau très polluée par les rejets d'égout est élevée, ce qui signifie qu'il ne reste presque plus d'oxygène dissous dans l'eau (figure 2). Quand les taux d'oxygène dissous sont faibles, les micro-organismes anaérobies produisent des composés malodorants détériorant davantage la qualité de l'eau.

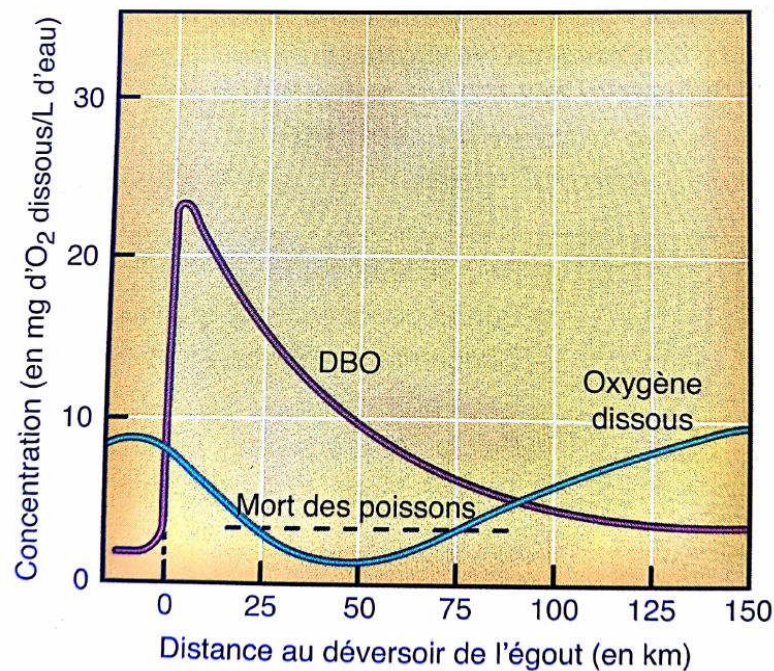


Figure 2. Effet des eaux d'égout sur l'oxygène dissous et sur la demande biologique en oxygène (DBO)

-Les agents pathogènes

Les agents vecteurs de maladies, ou agents pathogènes sont des organismes infectieux qui provoquent des maladies. Ils viennent des déchets d'individus infectés. Les eaux usées d'une ville contiennent en général beaucoup de bactéries, virus, protozoaires, vers parasites et autres agents infectieux qui provoquent des maladies chez l'homme et les animaux.

-La pollution par les matières en suspension

La pollution par les matières en suspension (MES) se définit par des quantités excessives de matières en suspension qui finissent par sédimenter au fond d'une masse d'eau. Les MES proviennent de l'érosion de terrains. Les MES diminuent la pénétration de la lumière dans l'eau, recouvrent les organismes aquatiques, apportent des polluants toxiques insolubles et envasent les voies d'eau. Les MES rendent l'eau turbide (trouble) et réduisent ainsi la profondeur de la pénétration de la lumière. Parce que la base du réseau alimentaire d'un

écosystème aquatique est constituée de plantes et d'algues qui ont besoin de lumière pour la photosynthèse, l'eau trouble réduit la capacité photosynthétique de ces producteurs primaires. Une très forte turbidité réduit le nombre d'organismes aquatiques qui se nourrissent de ces producteurs.

Les sédiments ont un effet néfaste sur la qualité de l'eau en véhiculant des produits chimiques toxiques, organiques ou non, dans l'eau. Des composés insolubles et toxiques adhèrent à la surface des MES et lorsqu'elles pénètrent dans l'eau, les produits chimiques toxiques y pénètrent aussi. Des agents pathogènes fixés aux MES sont aussi transportés dans l'eau.

-Nutriments minéraux des plantes aquatiques et des algues

Les nutriments minéraux des plantes et des algues sont des composés chimiques, comme l'azote et le phosphore. Ils sont essentiels au fonctionnement normal des écosystèmes sains, mais ils sont dangereux à concentration élevée. Les nitrates et les phosphates proviennent des déjections animales et humaines, des résidus végétaux, des dépôts atmosphériques et du lessivage d'engrais épandus sur des terrains résidentiels et agricoles.

-Les matières organiques

Les matières organiques sont des substances composées essentiellement de chaînes de carbone. Voici quelques exemples de matières organiques naturelles : les sucres, les acides aminés et les acides gras. La plupart des milliers de composés organiques qu'on trouve dans l'eau sont des produits chimiques produits par l'Homme ; ces produits chimiques de synthèses comprennent les pesticides, les solvants et autres produits chimiques industriels et les plastiques.

-Les produits chimiques inorganiques

Les produits chimiques inorganiques sont des polluants qui contiennent des éléments autres que le carbone ; par exemple les acides, les sels et les métaux lourds (plomb, mercure, arsenic). Ils ne se dégradent pas ou ne se décomposent pas facilement. Quand ils contaminent une masse d'eau, ils y restent longtemps. De nombreux produits chimiques inorganiques provenant d'usines, des mines, des ruissellements de cultures irriguées, des forages de pétrole et des effluents des réseaux d'eau pluviale arrivent dans les eaux de surface et les nappes phréatiques.

-La pollution thermique

Il y a pollution thermique quand de l'eau chaude produite au cours de certains processus industriels est rejetée dans des voies navigables. Les réactions biochimiques comme la décomposition des déchets, se produisent plus rapidement, consommant plus d'oxygène dissous. De plus, l'oxygène se dissout moins dans l'eau chaude. Quand le taux d'oxygène

diminue, les poissons ventilent plus leurs branchies pour s'oxygéner. Cette situation provoque un gros stress chez ces derniers.

3-1- Définition de la toxicologie

Truhaut (1974) définit la toxicologie comme "la discipline qui étudie les substances toxiques ou poison, c'est à dire les substances qui provoquent des altérations ou des perturbations des fonctions de l'organismes conduisant à des effets nocifs dont le plus graves, de toute évidence, est la mort de l'organisme en question".

3-2- Santé humaine

Au siècle passé, l'espérance de vie humaine et la santé en général ont fait d'énormes progrès. Cela était dû à une meilleure nutrition et à une meilleure médecine, une meilleure compréhension des causes et des traitements des maladies et à une diminution de la pauvreté. Cependant, la génération actuelle des enfants des pays développés sera peut-être la première dans quelques années à avoir une espérance de vie inférieure à celle de leurs parents. Comprendre le système de relation entre la santé humaine et l'environnement naturel physique et construit est nécessaire pour une meilleure santé dans l'avenir.

3-3- Maladies émergentes et en recrudescence

A une époque, on pensait à tort que les maladies infectieuses avaient été vaincues ou sur le point de l'être. Nous savons à présent que ce n'est pas le cas. Les maladies émergentes sont des maladies infectieuses qui n'avaient pas été détectées chez l'homme auparavant ; les maladies émergentes passent d'un animal porteur de la maladie vers l'espèce humaine. Le syndrome d'immunodéficience acquise (SIDA) est l'une des maladies émergentes les plus graves. Les épidémiologistes pensent que le virus HIV a été transmis par des primates vers les humains.

Parmi les autres maladies émergentes on compte la maladie de Lyme, le virus du Nil occidental, la maladie de Creutzfeld-Jacob (Maladie de la vache folle), le syndrome respiratoire aigue sévère (SRAS) et le virus Ebola, pour n'en citer que quelques-unes. De plus de nouveaux virus de la grippe apparaissent chaque année, certains beaucoup plus mortels que d'autres. Afin de pouvoir réussir à enrayer une maladie émergente, les épidémiologistes doivent identifier les symptômes, les agents qui provoquent la maladie et informer les autorités de santé publique. A leur tour, les agents de la santé publique doivent isoler les patients montrant ces symptômes et retrouver toutes les personnes qui ont été en contact avec les patients. Pendant ce temps, les chercheurs mettent au point des protocoles et essaient de

déterminer et d'éliminer les causes de la maladie. Les experts ont déterminé les facteurs principaux impliqués dans l'émergence ou la recrudescence des maladies infectieuses. Les plus importants sont:

- l'évolution dans les organismes infectieux, ils passent donc d'un animal porteur à l'homme ;
- l'évolution de la résistance aux antibiotiques dans les organismes infectieux ;
- l'urbanisation associée aux surpeuplements et à des mauvaises installations sanitaires;
- l'augmentation de la population de personnes âgées qui sont plus prédisposées aux infections ;
- la pollution, la dégradation de l'environnement et le changement des tendances climatiques ;
- l'augmentation des déplacements internationaux et du commerce international;
- la pauvreté et les inégalités sociales.

3-4- Pollution environnementale et maladies

3-4-1-Persistance, bioaccumulation et amplification biologique des agents de contamination environnementaux

Certaines substances toxiques font preuve de persistance et montrent une tendance de bioaccumulation et d'amplification biologique. Ces substances comprennent certains pesticides (comme le DDT ou dichloro-diphényl- trichloréthane), des isotopes radioactifs, des métaux lourds (comme le plomb et le mercure), des ignifugeants (exemple l'éther diphényle polybromé ou PBB) et des produits chimiques industriels (comme les dioxines et les diphényles polychlorés ou PCB).

Les effets du DDT sur de nombreuses espèces d'oiseaux ont été les premières preuves des problèmes dus à ces produits chimiques. Un faisceau de preuves scientifiques montre que l'un des effets du DDT sur des oiseaux est qu'ils pondent des œufs aux coquilles extrêmement fines et fragiles qui se cassent généralement pendant l'incubation, provoquant la mort des oisillons. Après 1972, année pendant laquelle le DDT fut interdit aux Etats-Unis, la reproduction de nombreux oiseaux s'est améliorée (figure 2). Lorsqu'un pesticide n'est pas métabolisé (décomposé) ou excrété par un organisme, il est simplement stocké habituellement dans les tissus adipeux. Au fil du temps, l'organisme peut bioaccumuler ou bioconcentrer de fortes concentrations de pesticides. Les décomposeurs naturels comme les bactéries n'ont pas

encore élaboré de moyen de dégrader la plupart des pesticides synthétiques, ils s'accablent donc dans l'environnement et le long des réseaux trophiques.

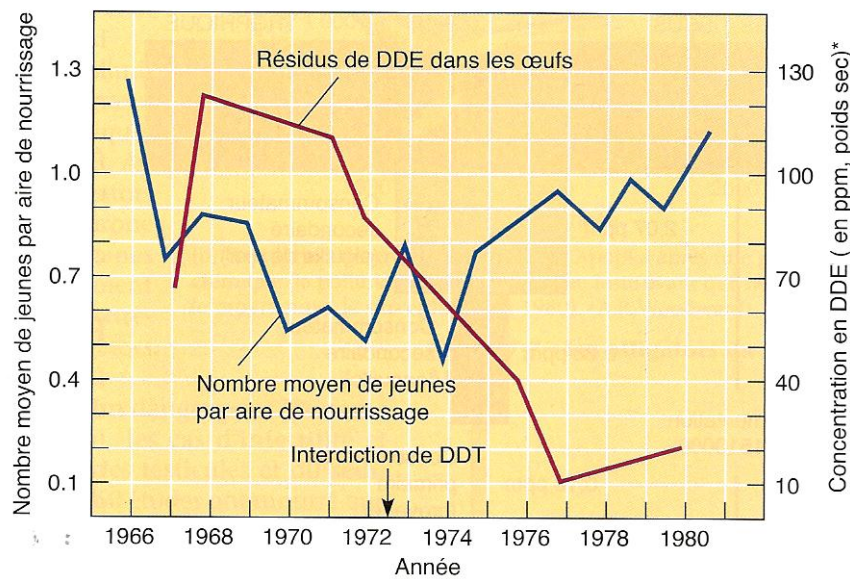


Figure 2. Effets du DDT sur les oiseaux

3-4-2- Perturbateurs du système endocrinien

De plus en plus de preuves indiquent que des dizaines de produits chimiques industriels et agricoles (PCB, DDT, PBB, Dioxines, métaux lourds, pesticides, et certains plastiques ou additifs du plastique comme les phthalates) font preuve de persistance, bioaccumulation et amplification biologique et sont également des perturbateurs du système endocrinien.

Certains perturbateurs endocriniens imitent les œstrogènes, une catégorie d'hormones femelles, et envoient de faux signaux aux corps qui interfèrent avec le fonctionnement normal du système de reproduction. D'autres perturbateurs endocriniens touchent le système endocrinien en imitant des hormones autres que l'œstrogène comme les androgènes (hormones mâles comme la testostérone) et les hormones thyroïdiennes. De nombreux perturbateurs endocriniens modifient le développement reproducteur de différentes espèces animales.

Les perturbateurs endocriniens peuvent aussi être un danger pour l'homme puisque le nombre de troubles de la reproduction, les cas d'infertilité et les cancers liés aux hormones (comme les cancers des testicules et du sein), semblent être en augmentation, ou sont plutôt en augmentation.

Certains phthalates entrant dans la composition des cosmétiques parfums, déodorants, crèmes, vernis à ongles, médicaments et des plastiques couramment utilisés dans divers emballages

alimentaires, dans les jouets et les produits ménagers, ont été responsables de malformations congénitales et d'anomalies du systèmes reproducteurs.

3-4-3- Les enfants et l'exposition aux produits chimiques

Les enfants sont plus sensibles à la plupart des produits chimiques que les adultes car leurs corps sont encore en développement et ne sont pas aussi efficaces pour lutter contre les produits toxiques. Les enfants sont également plus sensibles parce qu'ils pèsent nettement moins lourd que les adultes. Considérons un produit toxique avec une DL_{50} de 100mg/Kg. Une dose mortelle potentielle pour un enfant qui pèse 11,3 Kg est de $100 \times 11,3 = 1130$ mg, l'équivalent d'à peine 1/4 de cuillère à café si le produit chimique est liquide. En comparaison, la dose mortelle potentielle pour un adulte pesant 68 Kg est 6800 mg, soit légèrement moins que deux cuillères à café. Par conséquent, nous devons protéger les enfants de toute exposition à des produits chimiques environnementaux parce que les doses dangereuses sont plus faibles pour les enfants que pour les adultes.

3-4-4- Identifier les substances responsables de cancer

La toxicologie et l'épidémiologie sont les deux méthodes les plus courantes pour déterminer si un produit chimique provoque un cancer. Les toxicologues exposent des animaux de laboratoire, comme les rats à des doses variables des produits chimiques et voient s'ils développent un cancer.

Les épidémiologistes examinent des expositions d'humains au même produit chimique et voient si les groupes exposés montrent des taux de cancer accrus.

La toxicologie présente l'avantage de pouvoir mesurer et administrer des doses en quantité très précises. En général, deux, trois, ou quatre groupes d'animaux sont exposés à différentes quantité de doses parmi lesquelles un «groupe de contrôle» ou témoin n'est pas exposé. A la fin de l'expérience (environ deux ans pour les souris et les rats), les animaux sont disséqués et on répertorie le nombre d'animaux avec tumeurs et d'animaux sans tumeurs de chaque groupe. Les études épidémiologiques présentent l'avantage d'examiner les personnes qui ont vraiment été exposé au produit chimique. Idéalement une cohorte ou groupe d'individus qui ont été exposés au produit chimique, est comparé à un autre groupe similaire qui n'a pas été exposé.

L'épidémiologie est peut être plus représentative que la toxicologie, mais la toxicologie peut être plus précise.

Idéalement, les données épidémiologiques et les données toxicologiques peuvent être associées pour produire une image plus claire des causes de cancer. Le tableau 1 compare les avantages et les inconvénients de l'épidémiologie et de toxicologie.

Tableau 1. Avantages et désavantages respectifs des études toxicologiques et épidémiologiques

<i>Epidémiologie</i>	<i>Toxicologie</i>	<i>Le plus efficace</i>
Sujets humains	Sujets animaux	Epidémiologie
Exposition à de multiples produits chimiques	Exposition à un seul produit chimique	Toxicologie
Dosages imprécis	Dosages précis	Toxicologie
Groupes exposés génétiquement variés	Groupes exposés génétiquement homogènes	Epidémiologie
Echantillons de 100 à 10 000 individus	Echantillons de 10 à 100 individus	Epidémiologie

3-4-5- Mélanges chimiques

Les hommes sont souvent exposés à différents mélanges de composés chimiques. Cependant, une très grande majorité des études en toxicologies sont exécutées sur un produit chimique unique plutôt que sur un mélange de produits chimiques. Les mélanges de produits chimiques agissent les uns sur les autres de plusieurs manières augmentant ainsi le taux de complexité d'estimation du risque. De plus, il ya trop de mélanges chimiques pour les évaluer tous.

Les mélanges chimiques agissent les uns sur les autres par additivité, synergie, ou antagonisme. Quand un mélange chimique est additif, l'effet est exactement celui auquel on s'attend, étant donné les effets individuels de chaque composant du mélange. Si un produit chimique dont le niveau de toxicité est de 1, est mélangé à un produit chimique différent au niveau de toxicité de 1, l'effet combiné d'exposition au mélange est de 2. Un mélange chimique synergique a des effets combinés plus grand que ce qui était attendu, deux produits chimiques chacun avec un niveau de toxicité de 1 peuvent avoir une toxicité combiné de 3. Une interaction antagonique dans un mélange chimique a pour résultat un effet combiné plus petit que ce qui était attendu, l'effet combiné de deux produits chimiques, chacun avec des niveaux de toxicité de 1 peut être de 1,3.

Si nous manquons d'études toxicologiques sur les mélanges chimiques, comment les scientifiques désignent-ils les effets des mélanges chimiques? Les toxicologistes désignent

habituellement, les valeurs de risque des mélanges par additivité, en ajoutant les effets connus de chaque composé dans le mélange. Une telle approche sous-estime généralement mais surestime parfois le risque impliqué, mais actuellement, c'est la meilleure approche disponible. L'autre alternative (attendre pendant des années ou des décennies que de nombreuses études soient conçues, financées et achevées) n'est pas raisonnable.

3-4-6-Cas de figures : Pandémies de grippe dans le passé et dans l'avenir

Le virus de la grippe est un danger pour la santé humaine depuis des siècles. Chaque année, une ou plusieurs nouvelles variétés (Souches) du virus apparaissent et se propagent rapidement autour du globe pendant «la saison de la grippe» qui va généralement de la fin de l'automne à tout l'hiver. La saison de grippe de 1918-1919 a tué plus de 850.000 personnes aux Etats-Unis. Le virus de cette grippe était particulièrement virulent. La grippe de 1918 était inhabituelle par le fait que contrairement à la plupart des virus, elle était aussi puissante chez les jeunes en bonne santé que chez les très jeunes, les personnes âgées et les infirmes. Un virus similaire à celui de saison 1918-1919 pourrait être dévastateur. De plus, un tel virus pourrait se propager facilement par avion, scénario envisagé par Paul Ehrlich dans son livre de 1968 *The Population Bomb*.

Autrefois on croyait (et beaucoup le croient encore) que «la solution à la pollution est la dilution». Ce soi-disant paradigme de la dilution signifiait que l'on pouvait se débarrasser de la pollution dans l'environnement et que celle-ci serait suffisamment diluée pour ne poser aucun problème.

Nous savons aujourd'hui que le paradigme de la dilution est faux.

4-1- Effets sur les populations

4-1-1- Principaux types d'effets démo-écologiques des polluants

a- Effets sur des populations végétales

Il existe de nombreux exemples de mortalités massives induites dans des populations végétales par des pollutions.

Les dégâts que les différentes pollutions de l'atmosphère occasionnent aux végétaux peuvent être très variés quant à leurs origines. Les plantes sont également sensibles aux substances toxiques qui se trouvent dans le sol et dans les eaux.

Dans la région méditerranéenne des dépérissements ont été observés chez le pin d'Alep appartenant à des boisements proches d'agglomérations côtières, dus à l'apport d'ozone.

b- Effets sur des populations animales

Il existe un nombre considérable d'exemples d'espèces animales dont les populations ont présenté une mortalité importante à la suite d'exposition aiguës ou à long terme à des polluants toxiques. Ainsi, en Amérique du nord, a-t-on continué à observer une importante mortalité dans les populations de diverses espèces aviennes exposées à des traitements insecticides au cours des dernières décennies. Ainsi, l'usage de semences de riz enrobées d'aldrine ou d'heptachlore a provoqué une forte mortalité dans les populations d'oies des neiges.

4-1-2- Effets des polluants sur le potentiel biotique

Parmi les effets subléthaux des polluants s'exerçant à long terme sur les populations contaminées, les échecs de la reproduction, le ralentissement de la croissance et chez les invertébrés les perturbations de la métamorphose marquent les effets démo-écologiques les plus redoutables.

a- Effets sur la reproduction

Un grand nombre de recherches ont été stimulées par le constat de l'importance des perturbations de la reproduction induites même à de très faibles concentrations des polluants dans l'environnement.

Des causes d'échecs de la reproduction résultant de l'exposition à des polluants peuvent se rencontrer à de nombreuses étapes des processus reproducteurs: gamétogenèse, maturation des gamètes, comportement de reproduction et de nidification, fécondation, développement embryonnaire, éclosion ou parturition, mortalité néonatale.

Les premières études sur les effets néfastes des polluants ont concerné l'impact d'insecticides organochlorés sur la fécondité des oiseaux et furent réalisées en laboratoire par De Witt (1955) ainsi que par Genelly et Rudd (1956).

Dans un mémoire devenu classique, ces derniers auteurs montraient que la dieldrine, le DDT et le toxaphène incorporés à raison de 25mg/kg à 100mg/kg dans l'alimentation de faisans provoquaient une forte baisse du nombre d'œufs pondus et atténuaient la viabilité des jeunes.

b- Effets sur la mortalité embryonnaire et néonatale

L'embryotoxicité intervient dans la diminution du succès de reproduction des populations aviennes exposées à des concentrations de polluants infraléthale pour les adultes. Les polluants peuvent aussi provoquer des échecs de reproduction en provoquant des anomalies morphogénétiques soit des appendices soit des gonades, conduisant à une mortalité intraembryonnaire (défaut d'éclosion) ou périnatale. Un dernier type d'effet par lesquels les polluants diminuent le potentiel biotique résulte de la mortalité néonatale due soit à leur effet embryotoxique et tératogénique, soit à la toxicité pour les jeunes au moment de l'éclosion, quand ils résorbent la vésicule vitelline. De tels effets ont été observés chez les oiseaux et les poissons.

4-1-3 -Effets sur la croissance

Les polluants sont aussi susceptibles d'agir tant dans les biocénoses terrestres qu'aquatiques sur les populations de diverses espèces en altérant leur croissance. Cet effet peut se révéler désastreux s'il induit de façon corrélative un retard dans la maturation sexuelle, dont la conséquence sera de faire éclore les jeunes larves à une période du cycle annuel qui leur serait défavorable. En outre, de tels effets induisent des conséquences synécologiques défavorables, dans la mesure où elles induisent une diminution de la productivité secondaire des écosystèmes considérés. Diverses recherches ont montré que de faibles concentrations de

polluants de l'air, des sols ou des eaux étaient susceptibles de ralentir la croissance d'un grand nombre d'espèces d'invertébrés. Ainsi d'infimes concentrations d'insecticides organochlorés ou PCB perturbent la croissance des mollusques: D'autres effets des polluants ont été mis en évidence.

4-1-4-Cas de figure : Effets des pesticides sur les organismes et les écosystèmes

Mieux évaluer et maîtriser les risques associés à l'utilisation des pesticides nécessite, entre autres, la compréhension des voies d'exposition des espèces cibles et non cibles ainsi que des mécanismes d'action responsables de leurs effets. En outre, il est important de considérer ces espèces dans leurs écosystèmes, qu'ils soient terrestres ou aquatiques. Ces connaissances sont nécessaires pour optimiser l'utilisation des pesticides et réduire les risques de contamination de l'environnement et les impacts écotoxicologiques sur les espèces non cibles. Les pesticides peuvent avoir des effets non intentionnels sur des niveaux biologiques, et des entités écologiques très variés ce qui conduit à multiplier les échelles d'investigation et les approches possibles. L'impact des pesticides sur les organismes dépend en effet, des caractéristiques physico-chimiques des substances employées (famille chimique, liposolubilité, formulation, mode d'action) ; de l'environnement dans lequel les substances sont dispersées, qui conditionne les formes chimiques avec lesquelles les organismes sont en contact, des organismes eux-mêmes. Les modes d'action d'une même catégorie de pesticides peuvent être très divers. Les fongicides peuvent agir en inhibant la respiration ou la division cellulaire, en affectant la biosynthèse des acides aminés ou des protéines, ou encore en perturbant le métabolisme des glucides et des polyols. Certains herbicides peuvent affecter la photosynthèse, d'autres inhibent la division cellulaire, la synthèse des lipides, des acides aminés ou de la cellulose. Les insecticides peuvent présenter des propriétés neurotoxiques, régulatrices de croissance ou encore inhibitrices de la respiration cellulaire. Les effets des pesticides sur les espèces animales et végétales dépendent également et largement des caractéristiques écologiques de celle-ci et des possibilités de dispersion et de refuge que leur offre le paysage agricole. Or, la conduite simultanée de systèmes de culture différents expose potentiellement les habitants, et les écosystèmes qui s'y trouvent, à diverses pressions liées aux modalités de contrôle des bioagresseurs. En conséquence, les sources de variabilité des réponses écologiques sont multiples. Elles dépendent également des échelles spatiales et temporelles considérées.

4-1-5- Adaptation des populations aux polluants : tolérance et résistance

L'exposition au stress chimiques dus à la pollution d'un biotope provoque chez les individus qui la subissent un ensemble de réponses qui conduisent éventuellement à des modifications génétiques. Il a été mis en évidence, que ces réponses peuvent être comportementales et /ou physiques.

a- Tolérance aux métaux lourds

Plusieurs recherches conduisent à soulever les questions suivantes: à quelle fréquence la pollution environnementale altère-t-elle le pool de gènes des populations exposées et à quelle fréquence rencontre-t-ont une combinaison des effets de la pression de sélection et des adaptations appropriées à cette dernière de sorte que des changements évolutifs se produisent ?

Une tentative de réponse peut être apportée par l'étude du degré de variabilité génétique entre individus en ce qui concerne leur niveau de tolérance ou de résistance aux polluants. L'étude de la tolérance au cuivre de huit espèces de plantes croissant dans des sols non contaminés a mis en évidence de grandes variations spécifiques. Sur huit espèces étudiées, dont les graines furent semées dans une terre polluée par le cuivre, trois ne donnèrent aucune pousse et quatre espèces ont montré une faible potentialité de tolérance. Enfin, deux d'entre elles ont présenté 0,08% ou 0,8% d'individus entièrement résistants au cuivre. En réalité, seuls ces deux dernières espèces se rencontrent aussi sur des stériles de mines (Bradshaw et Mc Neilly in Moriarty, 1983). Ces recherches suggéreraient que de nombreuses espèces seraient dépourvues des allèles leur conférant la possibilité de s'adapter génétiquement à la forte pression de sélection due à la pollution par les métaux toxiques.

b- Résistance aux pesticides

La résistance aux pesticides est un phénomène fort répandu, et dans quelques cas un sérieux problème, mais tous les ravageurs ne deviennent pas résistants à tous les pesticides.

b-1- Résistance des insectes aux insecticides

La résistance aux insecticides constitue le type le plus répandu d'adaptation d'une population naturelle à un polluant après celle des bactéries aux antibiotiques, et sans doute celui qui a été de beaucoup le plus étudié.

Cette résistance est très généralement corrélée à l'existence de gènes susceptibles de dégrader l'insecticide. Tel est par exemple, le cas de la résistance de la mouche domestique (*Musca domestica*) au DDT où existe une parfaite corrélation entre le coefficient de résistance et l'induction de l'enzyme DDT- déhydrochlorinase qui transforme le DDT en DDE, molécule non insecticide.

b-2- Résistance des plantes aux herbicides

Apparue un peut tard que la résistance aux insecticides, celle des plantes adventices des cultures aux herbicides a connu un développement important depuis le milieu des années 1975.

A l'heure actuelle, on connaît de nombreuses espèces de plantes adventices des cultures résistantes aux principales familles chimiques de ces pesticides. Les mécanismes de résistances sont souvent liés à l'apparition de processus rapides de détoxification.

b-3- Autres exemples de résistance aux polluants

Il existe de nombreux exemples d'adaptation d'êtres vivants aux polluants toxiques citons le cas des bactéries résistantes aux antibiotiques ou les *plasmodiums* résistants aux antipaludéens. Mais de tels phénomènes de tolérance voire de résistance apparaissent aussi chez les populations d'espèces non- cibles naturellement exposées à des polluants par suite de la contamination permanente de leurs biotopes.

b-4- Résistance aux multixénobiotiques

On a constaté depuis longtemps que dans certains sites très pollués survivaient divers organismes. Ce phénomène résulte d'une multi résistance des populations des espèces considérées à de nombreux contaminants appartenant à des groupes chimiques différents. Il a été démontré que cette multi résistance résulte d'un système de gènes dit MXR (pour Multixénobiotiques Résistance) de vaste spectre d'action permettant la dégradation ou la neutralisation des substances toxiques. Elle a été mise en évidence chez des mammifères et chez un grand nombre d'espèces d'invertébrés et de vertébrés aquatiques. Ce système de résistance est fondé sur l'existence d'une phosphoglycoprotéine membranaire dénommée Pgp et de façon plus générale à des protéines liées à l'ATP. La Pgp jouerait un rôle protecteur contre les toxines exogènes de l'environnement ou issues de la nourriture.

4-2 -Effets sur les écosystèmes

4-2-1 Effets des polluants sur la structure des écosystèmes

Dans les environnements pollués, l'existence d'un contaminant donné agira nécessairement sur l'étendue de la ressource utilisée par chaque espèce d'une façon ou d'une autre, en fonction du degré de tolérance - ou de sensibilité - de cette dernière. En conséquence, l'équilibre existant entre les divers constituants de la communauté sera perturbé car la présence du polluant provoquera des modifications dans la compétition interspécifique, conduisant au déclin des populations des espèces les plus sensibles. En conséquence, la distribution de fréquence des espèces d'une communauté donnée sera plus ou moins affectée par la pollution chronique de l'écosystème.

L'effet le plus spectaculaire d'une pollution tient en l'élimination totale de toutes les espèces d'une zone contaminée.

4-2-2- Effets sur le fonctionnement des écosystèmes

Les polluants de l'air ou des eaux peuvent agir directement sur la productivité primaire en inhibant la photosynthèse ou en entravant la croissance des organismes autotrophes ou en agissant sur les méristèmes des végétaux supérieurs diminuant la croissance de biomasse photosynthétique.

Parmi des polluants, nous citons le SO₂, les photo-oxydants, l'ozone, de nombreux pesticides et divers composés organochlorés. L'impact de la pollution des biotopes sur la production secondaire des écosystèmes est la conséquence de deux types de processus distincts : l'effet direct à long terme sur les consommateurs invertébrés et vertébrés et l'effet indirect qui peut provenir de la diminution de productivité primaire.

D'autre part, les polluants des eaux et des sols sont tous susceptibles d'interférer de façon directe ou indirecte sur un autre aspect du fonctionnement des écosystèmes : la décomposition des matières organiques mortes et le recyclage des nutriments. Ces effets proviennent essentiellement de l'action toxique de nombreux polluants sur les décomposeurs ainsi que de façon connexe un déséquilibre voire un blocage des cycles biogéochimiques dans les écosystèmes contaminés. Ainsi les polluants atmosphériques, par exemple, en particuliers les pluies acides contaminent les biotopes terrestres soit directement par diffusion gazeuse, soit *via* les précipitations et provoquent par exemple une diminution significative de certaines bactéries ainsi que les invertébrés saprophages de la pédofaune.

4-2-3-Descripteurs des effets des polluants sur la régulation du fonctionnement des écosystèmes

L'impact des polluants sur la santé des écosystèmes se traduit en définitive par de multiples effets qui se manifestent à travers des altérations d'étendue variée de leur structure et de leur fonctionnement. Celles-ci peuvent, en première approximation, se traduire par une réduction de leur biodiversité, une diminution de leur productivité biologique et un affaiblissement de leur homéostasie et de leur résistance qui leur confère une aptitude à retourner à l'état d'équilibre antérieur à la suite d'une perturbation temporaire due par exemple à une pollution.

Les problèmes associés à l'évolution des conséquences des effets des polluants dans l'environnement nécessitent d'être pris en considération dans le contexte des recherches sur la connaissance de la relation entre d'une part la biodiversité des communautés et d'autre part le fonctionnement et la stabilité de l'écosystème. En réalité, il s'agit d'un domaine de la théorie écologique au cours de développement. En conséquence, l'étude de l'action des polluants sur les structures et processus en question, dans les limites de la connaissance actuelle, est tout autant susceptible d'apporter des progrès dans la compréhension de la relation biodiversité-fonctionnement- stabilité d'un écosystème pourrait aider à mieux comprendre cette action.

L'étude de la pollution de l'environnement nécessite une connaissance aussi précise que possible de la distribution des polluants et de leur concentration dans les biotopes ainsi que dans les communauté d'être vivants, enfin de leurs effets sur la santé des populations et des écosystèmes contaminés. Cela nécessite une surveillance permanente de l'environnement tant en ce qui concerne les habitats terrestres qu'aquatiques, autrefois dénommée «suivi écologique» et désignée dans le langage courant, de façon très générale par le terme anglais de monitoring.

Il est parfois d'usage de faire une distinction entre d'une part le monitoring chimique dont l'objet est de déterminer le niveau de contamination par tel ou tel polluants des biotopes et de la biomasse et de l'autre le monitoring «biologique» dont l'objet est d'évaluer l'impact de la pollution.

5-1- Monitoring des polluants dans les écosystèmes

Se limiter à la connaissance des concentrations en polluants dans un biotope donné et/ ou des populations d'espèces critiques sans évaluer leurs effets écologiques conduit à ignorer bien des problèmes majeurs sous-jacents. En effet, connaître la concentration d'un polluant dans un biotope ou dans tel ou tel organisme échantillonné n'apporte aucune information sur l'impact biologique réel de ce dernier. En réalité, un corpus considérable de données expérimentales a montré qu'une même concentration d'un polluant dans l'eau, dans le sol ou encore dans la biomasse peut avoir des conséquences très différentes selon la valeur moyenne des facteurs écologiques dans l'écosystème considéré.

5-1-1- Les bio-indicateurs de contamination

L'avantage d'analyser des êtres vivants plutôt que les composants abiotiques des écosystèmes contaminés résulte de plusieurs particularités.

La plupart des polluants, en particulier les substances persistantes, qu'elles soient organiques ou minérales, se présentent à des concentrations bien supérieures dans les êtres vivants à celles auxquelles ils se rencontrent dans les biotopes par suite des phénomènes de bioconcentration et parfois de bioamplification.

5-1-2- Les caractéristiques requises d'un bio-indicateur

Une des premières problématiques sur laquelle les toxicologues se sont interrogés se rapporte aux caractéristiques que devrait posséder un bio-indicateur idéal.

Ces caractéristiques devraient être les suivantes:

- tous individus d'une espèce bio-indicatrice devraient présenter une corrélation identique et simple entre leur teneur en la substance polluante et la concentration moyenne de cette dernière dans le biotope ou dans l'alimentation qu'elles que soient la localisation et les conditions environnementales;
- l'espèce devrait être capable d'accumuler le polluant sans être tuée ni même sans que sa reproduction ne soit perturbée par les niveaux maximum des polluants observés dans l'environnement;
- l'espèce devrait être sédentaire afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec sa contamination dans le site géographique où elle a été prélevé ;
- l'espèce devrait être abondante dans l'ensemble de l'aire étudiée et si possible avoir une distribution biogéographique étendue afin de favoriser les comparaisons entre zones distinctes;
- les espèces à forte longévité sont préférables parce qu'elles permettent un échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire. En outre, les espèces à forte longévité subissent une exposition à un contaminant pendant de longues périodes ce qui par suite permet de disposer de preuves expérimentales sur les effets à long terme;
- l'espèce devrait être de taille suffisante pour fournir des tissus en quantité nécessaire pour analyse. Cette caractéristique s'avère encore plus importante pour la dissection quand les études sont faites sur l'accumulation dans les organes spécifiques ;
- l'espèce devrait être facile à échantillonner, et l'animal assez résistant pour être amené en laboratoire afin de réaliser par exemple des études de décontamination.

En réalité, la liste de ces caractéristiques est si contraignante qu'en pratique il n'existe presque aucune espèce qui puisse répondre à la totalité de ces critères.

Il est évident que l'application de tels critères pour le choix d'espèces bio-indicatrices se heurte à des problèmes immédiats sur le terrain, même si certaines espèces sont susceptibles de présenter plusieurs des caractéristiques précisées.

5-1-3- Utilisation des bio-indicateurs

Le monitoring des polluants dans l'environnement fait largement appel à l'usage des espèces bioaccumulatrices comme indicateurs biologiques de contamination. De telles espèces, ont été identifiées et parfois utilisées à vaste échelle aussi bien dans les écosystèmes terrestres que limniques et marins. Parmi ces espèces, on peut trouver des algues, des bryophytes, des mollusques, des poissons, des lichens, des mousses, des phanérogames, des oiseaux et certains mammifères.

5-2- Biomarqueurs

Le terme de biomarqueurs désigne des changements structuraux ou fonctionnels observables et mesurables, qui prennent place à divers niveaux de l'organisation biologique, depuis la molécule jusqu'à l'organisme pris dans son intégralité, qui traduisent une exposition persistante ou passée d'un individu à une ou plusieurs substances polluantes.

L'intérêt des biomarqueurs tient en ce que ces modifications de structure ou ces réactions métaboliques permettent d'évaluer qualitativement, et même quantitativement, si la concentration du contaminant atteint dans le biotope un niveau où commencent à se manifester des effets clandestins de la toxicité sur les populations pollusensibles exposées.

5-2-1-Réaction des organismes à une contamination par des xénobiotiques toxiques

L'exposition d'un organisme donné à un toxique xénobiotique s'accompagne de réactions cataboliques dont la finalité est d'essayer de l'éliminer et donc, autant que faire se peut, de le dégrader. Pour divers éléments xénobiotiques, en particulier pour les principaux composés organiques de synthèse et pour les métaux toxiques, l'élimination se fait essentiellement par les voies classiques de l'excrétion urinaire et par les fèces lorsque la contamination se fait par injection, une fraction de ce dernier n'étant pas absorbée par l'organisme.

On peut toujours distinguer deux phases lors de la contamination d'un être vivant par un xénobiotique. La phase I est dite phase de biotransformation, la phase II est dite phase de conjugaison. Ces deux phases conduisent à un accroissement progressif de l'hydrosolubilité des métabolites déplaçant le xénobiotique d'une substance initiale lipophile vers un métabolite plus polaire puis vers un conjugué encore plus polaire (donc plus hydrosoluble). En effet la plupart des conjugués chargés négativement (anions) possèdent une hydrosolubilité significative voire importante et sont facilement excrétés par la bile, l'urine ou les branchies (chez les animaux aquatiques).

En définitive, les xénobiotiques s'insèrent en règle très générale dans le métabolisme.

5-2-2- Principaux types de biomarqueurs

La connaissance des étapes de l'action d'un xénobiotique permet de répartir les biomarqueurs en trois groupes :

Les biomarqueurs d'exposition qui signalent l'exposition des individus à un polluant toxique correspondent à la phase I, les biomarqueurs d'effets qui traduisent les conséquences physiopathologiques de l'exposition à un polluant correspondent à la phase II. Enfin, on a plus récemment identifié des biomarqueurs de sensibilité aux effets qui caractérisent les variations individuelles et celle des populations propres à la réponse à l'exposition à un toxique. Ces biomarqueurs impliquent généralement et selon le cas l'intervention de processus propres aux phases I et/ ou II.

5-2-3- Principales applications des biomarqueurs

L'usage des biomarqueurs s'intègre dans les diverses méthodologies utilisées dans l'étude de l'impact écotoxicologique des polluants (figure 3).

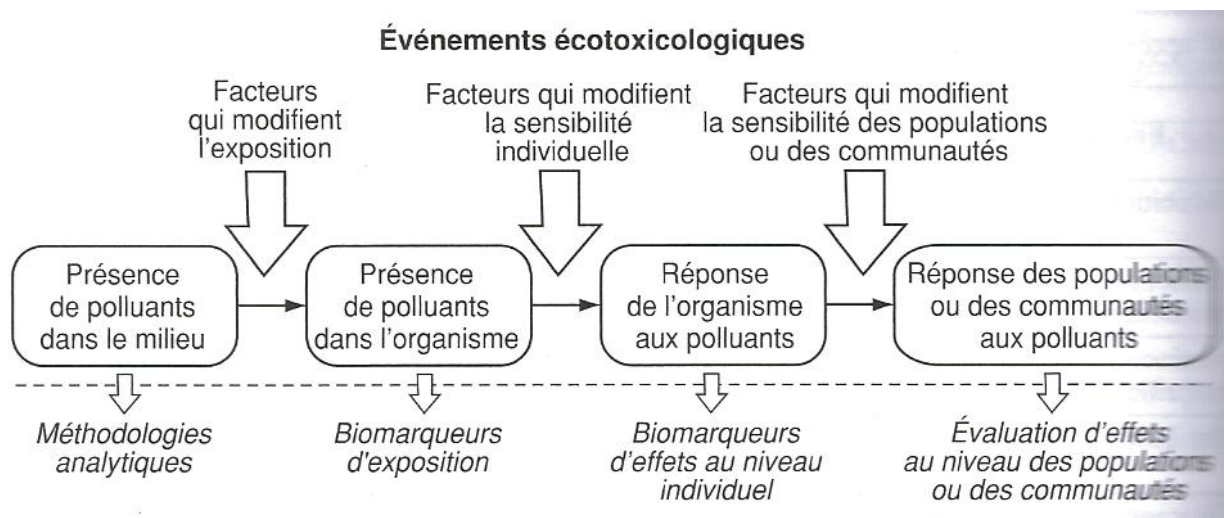


Figure 3. Schéma de la place des biomarqueurs dans la méthodologie d'évaluation de la contamination de l'environnement par les polluants toxiques et dans celle des risques écotoxicologiques qui en résultent dans les populations et les communautés naturelles (d'après Lagadic *et al.* 1997 in Ramade, 2007).

Ce dernier peut se placer à divers niveaux de cette évaluation : les biomarqueurs d'exposition s'intègrent dans le monitoring des pollutions de l'environnement dans la mesure où ils témoignent de la contamination de l'environnement par la présence des polluants dans l'organisme. Il en est de même des biomarqueurs d'effets qui permettent à la fois de participer au monitoring des conséquences de la pollution pour une biocénose donnée mais contribuent

aussi à l'évaluation des effets des polluants, donc des conséquences écologiques des pollutions et en définitive de l'état des écosystèmes. Enfin l'usage des biomarqueurs de sensibilité aux effets contribuent ainsi que les précédents à l'évaluation de la réponse des populations et des communautés aux polluants.

Il existe de nos jours un vaste spectre de biomarqueurs d'exposition utilisés d'une part dans le biomonitoring des polluants dans l'environnement et de l'autre d'effets, lesquels se sont avérés fort utiles dans l'évaluation du risque écotoxicologique. Pour chaque type de xénobiotiques toxiques peut être appliqué un assortiment adéquat de biomarqueurs.

5-3.Cas d'étude : Le monitoring des OGM

De nombreux scientifiques réclament que les OGM soient évalués comme des médicaments ou des pesticides, par le moyen de tests toxicologiques de longue durée. En Europe, ces tests ne sont obligatoires que depuis 2013. Mais leur durée est limitée à trois mois. Le principe d'une étude toxicologique est d'analyser tous les effets néfastes d'une source sur des organismes biologiques. En 2012, celle de Gilles-Eric Séralini a provoqué une large controverse. Difficile à mettre en place, réalisée en secret, financièrement indépendante de tout acteur lié aux OGM, cette étude toxicologique a été réalisée sur des rats nourris pendant deux ans avec un maïs tolérant au Roundup. Une première mondiale.

Chacun se souvient de ses images de rats déformés par de grosses tumeurs. Les chercheurs ayant participé à cette étude ont constaté beaucoup de pathologies rénales et hépatiques. En réalité, cela n'avait rien d'étonnant car le foie et les reins sont des organes de détoxification. L'étude de Gilles-Eric Séralini constatait cinq fois moins de tumeurs chez les rats témoins. Une différence qui a intrigué ce chercheur. Avec son équipe, il a donc analysé treize échantillons de croquettes réglementaires données aux rats dans cinq continents du monde. Le résultat est étonnant : cette nourriture contient des pesticides, des OGM et des métaux lourds, contrairement aux croquettes issues d'aliments naturels donnés aux rats témoins dans le cadre de son étude. Cette découverte est fondamentale. Elle remet en cause toute la toxicologie réglementaire.

Pour ces chercheurs, un point essentiel est souvent négligé : il ne suffit pas de contrôler l'OGM, mais également le pesticide associé. Aujourd'hui, une plante génétiquement modifiée n'est pas évaluée avec l'herbicide qu'elle tolère. C'est une plante faite pour absorber les pesticides, comme une éponge, souligne Gilles-Eric Séralini. La plante classique en meurt. En mangeant ces plantes tolérantes aux herbicides, nous mangeons plus de pesticides car ce sont des pompes à pesticides. Voilà ce que nous avons prouvé à travers nos différentes études. Les

pesticides sont des spam de la vie. Ils empêchent les cellules de communiquer entre elles. Les premières grandes maladies de la communication sont les tumeurs. Mais cela peut coïncider n'importe où, c'est comme si vous accumuliez du sable dans un moteur : la maladie de Parkinson ou celle d'Alzheimer peut se déclarer, mais aussi des allergies ou des malformations congénitales.

Plusieurs travaux de leur laboratoire ont montré qu'il fallait bien analyser la plante modifiée avec l'herbicide commercial et non avec le seul principe actif. Dans le cas du Roundup, les formulants (adjuvants), c'est-à-dire les autres produits contenu dans cet herbicide, seraient plus toxiques que le glyphosate, le principe actif déclaré par l'industriel. Aujourd'hui, lorsqu'un pesticide est évalué, seul le principe actif est pris en compte, et non les autres formulants.

Pour régler ce problème crucial d'expertise et d'évaluation, deux réformes simples pourraient être mises en place. Tout d'abord, il conviendrait que les études ne soient plus financées directement par les industriels. Un fond public financé par les semenciers pourrait être créé afin de réaliser des tests indépendants.

Autre mesure nécessaire : les études ne doivent plus rester confidentielles. Tous les scientifiques, tous les médecins pourront analyser les données. Ils verront bien que ce n'est pas sérieux. Le système ne pourra pas résister à la pression internationale.

Au-delà de la question très sensible et essentielle de la santé, un autre point suscite l'interrogation : à quelle fin créer des OGM ? Sont-ils vraiment utiles ? Les citoyens sont prêts à courir les risques inhérents à certaines innovations ; encore faut-il qu'elles présentent des avantages...

L'analyse du risque est un outil utilisé pour aborder les systèmes environnementaux complexes. L'analyse du risque nous permet également de penser à des échanges entre différentes activités. La gestion du risque est le processus d'identification, d'estimation et de réduction des risques. L'estimation du risque est utilisée de plusieurs manières dans la réglementation environnementale. Une agence de contrôle peut établir une norme de risque maximal. Par exemple, cette agence peut décider que les gens ne devraient rencontrer pas plus d'un risque de cancer sur un million à cause du trichloréthylène (TCE, agent de contamination courant qui est un solvant utilisé dans le nettoyage des métaux, dans l'industrie du caoutchouc, des produits d'entretien, des peintures et vernis) contenus dans l'eau potable municipale. Si nous connaissons la concentration cancérigène du TCE et si nous connaissons la qualité d'eau bue en moyenne par une personne, nous pouvons calculer la concentration maximale autorisée de TCE.

6-1- Coûts et bénéfices de l'analyse des risques

L'estimation du risque est aussi un facteur important dans l'analyse des coûts et bénéfices. Dans une analyse des coûts et des bénéfices, le coût estimé d'une réglementation pour réduire les risques est comparé aux bénéfices potentiels associés à cette réduction du risque.

L'analyse du coût et des bénéfices est une méthode importante pour aider les décideurs à élaborer les lois environnementales, mais elle n'est pas plus efficace que les données et suppositions sur lesquelles elle est basée. Les estimations collectives du coût pour contrôler la pollution sont souvent beaucoup plus élevées que le coût réel. Au cours du débat sur la suppression de l'essence avec plomb en 1971, l'industrie pétrolière avait prédit que pendant la transition le coût serait de 7 milliards de dollars par an, mais le coût réel fut de moins de 500 millions de dollars par an. En résumé, les analyses du coût et des bénéfices et les estimations des risques sont utiles pour évaluer et régler les problèmes environnementaux, mais les décideurs doivent reconnaître les limites de ces méthodes quand ils élaborent de nouvelles réglementations.

6-2- Le principe de précaution

D'après le principe de précaution, quand une nouvelle technologie ou un nouveau produit chimique est soupçonné de constituer un danger pour la santé ou l'environnement, de mesures de précaution devraient être prises, même si l'envergure du danger reste incertaine. Le principe de précaution peut aussi être appliqué à des technologies existantes quand une nouvelle

preuve montre qu'elles sont plus dangereuses que ce que l'on pensait au départ. Lorsque des observations et des expériences ont montré que les chlorofluorocarbones (CFC) étaient néfastes pour la couche d'ozone dans la stratosphère, le principe de précaution a mené à la suppression de ces composés. Les études faites après cette suppression confirmèrent cette démarche.

6-3- Estimation des risques écologiques

Le domaine de l'écotoxicologie est directement concerné par les estimations des risques écologiques. Tout comme les estimations des risques sur la santé humaine, l'estimation des risques écologiques comprend l'identification du danger, l'estimation dose-réponse, l'estimation de l'exposition et la caractérisation des risques. De telles analyses sont délicates parce que les effets peuvent se produire sur une grande échelle, allant d'individus animaux ou végétaux dans une région limitée jusqu'à des communautés écologiques dans une région vaste. Étant donné les risques et les niveaux d'exposition de facteurs de stress environnementaux provoqués par l'homme, les effets écologiques évoluent de bons à mauvais, ou d'acceptable à inacceptable. L'utilisation de la connaissance scientifique dans les prises de décisions environnementales est remplie d'incertitude car de nombreuses répercussions écologiques ne sont pas complètement comprises ou sont difficiles à mesurer. Il existe un réel besoin de quantification des risques encourus par l'environnement et de développer des stratégies pour faire face à l'incertitude.

6-4-Point de vue équilibré sur les risques

Certaines menaces pour notre santé, en particulier celles provenant des produits chimiques toxiques, défrayent la chronique. D'autres menaces, bien que supérieures d'un point de vue de l'estimation du risque, passent inaperçues. Cela ne veut pas dire que nous devrions ignorer les produits chimiques que les hommes introduisent dans l'environnement, Ceci joue un rôle important en faisant avancer la réglementation gouvernementale servant à nous protéger des dangers de notre monde technologique et industriel. Elles reflètent la méfiance à l'égard de l'industrie et du gouvernement dans leur gestion des risques et par conséquent donnent des occasions pour améliorer ces institutions.

Le changement est comme un fleuve, si puissant que certains ont depuis belle lurette sorti les rames de l'eau, parce qu'ils ont décidé qu'il est plus aisé de se laisser porter, qu'il n'y a qu'à profiter de la balade et à espérer que les choses tourneront au mieux, même si les courants nous poussent de plus en plus vite vers les rapides qui rugissent si fort que nous ne nous entendons même plus réfléchir.

L'ignorance et les erreurs sont évidemment les ennemies du progrès, tout comme le savoir, l'intégrité et la personnalité sont fondamentaux pour rencontrer le succès. Mais l'évolution de nos comportements collectifs et l'émergence d'une véritable compréhension du fait que nos destins sont intimement liés à la santé de l'écosystème terrestre dépendront des choix que nous faisons quant à la structure des systèmes que nous utilisons. La façon dont nous mesurons ce que nous faisons et le résultat de nos actions, la manière dont nous communiquons entre nous, les incitations ou les mesures dissuasives que nous introduisons dans nos systèmes politiques, économiques ou sociaux, tout cela aura une influence déterminante sur le futur.

En l'absence de connaissances théoriques plus précises sur l'interaction des effets biologiques à divers niveaux d'organisation, nous n'arriverons pas à donner un sens, même aux données les plus normalisées et les mieux harmonisées. Quelques modèles prédictifs ont été proposés, permettant une certaine prédiction des effets observés, mais il y a un besoin urgent de meilleurs modèles théoriques des processus écotoxicologiques. En terme de réponse biologique aux polluants, une grande variété de modèles a été développé par les écologues, les biologistes de l'évolution et les biogéochimistes, qui pourraient et devraient être utilisés, et même améliorés par les écotoxicologues. Il n'ya pas de réponses simples aux difficiles problèmes scientifiques, politiques et économiques auxquels nous devons faire face. Il est d'une importance vitale que les écotoxicologues soient bien formés et que les décisions de gestion, les lignes directrices et les décisions réglementaires soient véritablement prises sur la base de principes scientifiques sains.

En définitive et dans ce sens, j'ai jugé urgent de tirer l'attention sur l'un ou le plus grand pollueur de tout les temps, en l'occurrence le géant Américain Monsanto. Comment cette firme emblématique de la saga de l'agrochimie mondiale a-t-elle pu commettre autant d'erreurs fatales et répandre sur le marché des produits aussi nuisibles à la santé humaine et à l'environnement ? Comment Cette entreprise a-t-elle réussi à mener son business comme si de rien n'était, en étendant à chaque fois un peu plus son influence et sa fortune, alors que son histoire est jalonnée d'événements dramatiques ? Comment est-elle parvenue si

tranquillement à dissimuler les faits, à tromper le monde ? Comment la société Monsanto est-elle devenue un des principaux empires industriels de la planète ? En inscrivant à son pedigree rien moins que la production à grande échelle de quelques-uns des produits les plus dangereux de l'ère moderne : les PCB (ou pyralène), qui servent de liquide réfrigérant et lubrifiant et dont la nocivité est dévastatrice pour la santé humaine et la chaîne alimentaire, interdits après constat de contamination massive ; la dioxine, dont quelques grammes seulement suffisent à empoisonner une grande ville et dont la fabrication sera aussi interdite, développée à partir d'un insecticide de la firme, lequel sera à la base du tristement agent orange, le défoliant déversé sur les forêts et les villages vietnamiens (ce qui permettra à Monsanto de décrocher au Pentagone le plus gros contrat de son histoire) ; les hormones de croissance laitière et bovine – premier banc d'essai des OGM -, dont l'objectif est de faire produire l'animal au-delà de ses capacités naturelles malgré les conséquences avérées sur la santé humaine ; le désherbant Roundup, présenté à longueur d'écrans publicitaires comme biodégradable et favorable à l'environnement, affirmation sèchement contredite par des décisions de justice aux Etats-Unis comme en Europe.

La leçon pour les scientifiques est claire. Rien ne peut remplacer des explications claires et répétées des aspects scientifiques accompagnées de réfutations des attaques de détracteurs. Les preuves deviendront plus évidentes d'année en année. Les obstructionnistes se retrouveront comme sur une banquise en pleine fonte. Le vent politique finira par tourner.

Charbonnier E., Ronceux A., Soubelet H. et Barriuso E., 2015. Pesticides. Des impacts aux changements de pratiques. Ed. *Quae*. 400p.

Forbes VE et Forbes TL., 1997. Ecotoxicologie théorie et applications. Ed. *INRA*. 256P.

Nordhaus William., 2019. Le casino climatique. Risques, incertitudes et solutions économiques face à un monde en réchauffement. Ed. *Nouveau horizon*. 351p.

Ozenda Paul., 1982. Les végétaux dans la biosphère. Ed. *Doin* .431p.

Rabhi Pierre et Duquesne Juliette. 2018. Les semences. Un patrimoine vital en voie de disparition. Ed. *J'ai lu*.153p.

Ramade François. 2005. Eléments d'écologie. Ecologie appliquée. Ed. *Dunod* 864p.

Ramade François., 2007. Introduction à l'écotoxicologie. Fondements et applications. Ed. *Lavoisier* .618p.

Raven P.H., Berg L.R., Hassenzahl D.M., 2009. Environnement. Ed. *De boeck*. 687p.

Robin Marie-Monique., 2008. Le monde selon Monsanto. Ed. *La découverte/ ARTE Editions/ Editions Socrate*. 365p.