

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie

Polycopié pour habilitation

Unité d'Enseignement

Ecotoxicologie générale

Destiné aux étudiants de Master I
Toxicologie industrielle et environnementale

Enseignante chargée du cours

Dr AMRANI Amina

Maître de Conférences A

Année universitaire 2022-2023

Syllabus du cours

Intitulé du Master : Toxicologie industrielle et environnementale

Intitulé de la matière: Écotoxicologie générale

Semestre : S2 (M1)

Unité d'Enseignement: Fondamentale

Crédits : 02

Coefficients : 01

Objectifs de l'enseignement :

Cette unité d'enseignement traite de la diversité des toxines ; des substances micropolluantes issues des activités agricoles, industrielles et nucléaires ; de leurs interactions avec les organismes des milieux étudiés.

Connaissances préalables recommandées :

Contenu :

- Communautés aquatiques et pollution ;
- Bio-marqueurs et bio-indicateurs de pollution dans les écosystèmes ;
- Contamination des systèmes aquatiques par les métaux traces
- Chimie des micropolluants et des toxiques dans les écosystèmes ; toxicologie nucléaire
- Toxines de microorganismes: modes d'actions et biotechnologies
- Réponses aux toxiques des organismes et des populations
- Méthodes d'évaluation de la pollution aquatique fondées sur le phytoplancton toxique.
- La réglementation relative aux pesticides et aux toxines: protection des écosystèmes

Mode d'évaluation :

Contrôle de connaissances, exposés, examen de TP.

Enseignante chargée de l'unité d'enseignement :

Dr AMRANI Amina, Maitre de conférence A, spécialité biologie animale, Université Chadli Bendjedid El-Tarf

E-mail : amrani-amina@univ-eltarf.dz

Résumé

De nos jours les écosystèmes subissent de plus en plus de pressions anthropiques qui bouleversent dramatiquement leur fonctionnement. En effet le développement industriel agricole et urbain est accompagné inévitablement par des problèmes de pollution de l'environnement. En outre du fait de l'activité humaine et quel que soit le compartiment initial d'introduction des contaminants, une fraction importante est entraînée très loin de son point d'émission par circulation atmosphérique et hydrique, plusieurs milliers de substances chimique se trouvent dans le milieu aquatique étant donné son statut de réceptacle final. Les effets toxiques de ces composés sur l'individu, les populations ou les écosystèmes peuvent être directs ou indirects vu les complexités de déclenchement de l'action toxique. Ceci a pour résultat le déséquilibre de l'écosystème, altérations des ressources naturelles et aussi menace de la santé humaine.

Mots clés : Ecosystèmes, écotoxicologie générale, Toxique, Contaminants.

Liste des figures

FIGURE 1. HYDROCARBURES FLOTTANT À LA SURFACE DE LA NAPPE	13
FIGURE 2. SCHÉMA EXPLICATIF DU PROCESSUS D'EUTROPHISATION	16
FIGURE 3. SCHÉMA EXPLICATIF DU PROCESSUS D'ACIDIFICATION DES OCÉANS	38
FIGURE 4. CHEMINEMENT D'UNE MOLÉCULE DANS L'ORGANISME	34
FIGURE 5. RÉVERSIBILITÉ ET L'IRRÉVERSIBILITÉ D'UNE ATTEINTE RÉSULTANT D'UNE INTOXICATION	37
FIGURE 6. DIATOMÉES (BACILLARIOPHYCÉES)	40
FIGURE 7. DINOFLAGELLÉS (DINOPHYCÉES)	40
FIGURE 8. PRYMNÉSIOPHYCÉES	41
FIGURE 9. CYANOBACTÉRIES	42

Liste des tableaux

[TABLEAU I. SOURCES INDUSTRIELLES ET AGRICOLES DES MÉTAUX PRÉSENTS DANS L'ENVIRONNEMENT](#)

23

[TABLEAU II. ENDO ET EXOTOXINES](#)

29

Liste des abréviations

HAP :	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
PCB:	Polychlorobiphényle
MOF:	Matières Organiques Fermentes
ETM:	Eléments Traces Métalliques
DMM:	Dose Minimale Mortelle
DL₅₀:	Dose Létale 50
As:	Arsenic
Cd :	Cadmium
Cr:	Chrome
Cu:	Cuivre
Hg :	Mercure
Mn :	Manganèse
Ni:	Nickel
Pb :	Plomb
Zn :	Zinc
Sn:	Etain
OGM:	Organismes Génétiquement Modifiés
OMC:	Organisation Mondiale du Commerce
MOT :	Micro-organismes et Toxines hautement pathogènes

Table des matières

SYLLABUS DU COURS	I
RÉSUMÉ	II
LISTE DES FIGURES	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
INTRODUCTION	10
1 CHAPITRE I. COMMUNAUTES AQUATIQUES ET POLLUTION	11
1.1 DÉFINITIONS	11
1.1.1 <i>Ecologie:</i>	11
1.1.2 <i>La Toxicologie:</i>	11
1.1.3 <i>Ecotoxicologie :</i>	11
1.2 SPÉCIFICITÉ DE L'ECOTOXICOLOGIE	11
1.3 QU'EST CE QU'UN POLLUANT ?	11
1.3.1 <i>Produits d'origine anthropique arrivant en Mer</i>	12
1.4 LE MONITORING DES POLLUANTS	12
1.4.1 <i>Définition du monitoring :</i>	12
1.4.2 <i>Triple finalité du monitoring des polluants</i>	12
1.5 DIFFÉRENTS TYPES DE POLLUTION DE L'EAU	12
1.5.1 <i>Pollution chimique :</i>	12
1.5.1.1 Définition d'un micropolluant:	12
1.5.1.2 Sources :	12
1.5.1.3 Exemple de la pollution par les Hydrocarbures	13
1.5.1.4 Pollution par les pluies acides:	13
1.5.1.5 Nitrates	13
1.5.1.6 Les phosphates	14
1.5.2 <i>Pollution biologique</i>	14
1.5.2.1 Pollution microbiologique des eaux	14
1.5.2.2 Pollution par des sels minéraux nutritifs	15
1.5.2.3 La pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles (MOF)	15
1.6 CONSÉQUENCES DE LA POLLUTION AQUATIQUE :	15
1.6.1 <i>Perte de la biodiversité</i>	15

1.6.2	<i>Eutrophisation</i>	15
1.6.3	<i>Accumulation de grandes masses de plastiques</i>	16
1.6.4	<i>Appauvrissement de l'oxygène et acidification de l'eau</i>	16
1.6.5	<i>Mort et changements physiologiques chez les organismes aquatiques</i>	17
1.7	COMMENT SURVEILLER LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT ?	17
1.7.1	<i>Monitoring des polluants dans les écosystèmes</i>	17
2	CHAPITRE II. BIOMARQUEURS ET BIO-INDICATEURS DE POLLUTION DANS LES ECOSYSTEMES	18
2.1	CARACTÉRISTIQUES REQUISES D'UN BIO INDICATEUR	18
2.1.1	<i>La bioaccumulation :</i>	18
2.1.2	<i>La bioconcentration :</i>	18
2.1.3	<i>La bioamplification :</i>	18
2.1.4	<i>Les Bio-indicateurs :</i>	18
2.2	CARACTÉRISTIQUES D'UN INDICATEUR BIOLOGIQUE IDÉAL	18
2.3	INTÉRÊT DE L'UTILISATION DES BIO-INDICATEURS	19
2.3.1	<i>Limites del'utilisation de bio-indicateurs :</i>	19
	<i>L'utilisation des bioindicateurspose cependant certaines contraintes et limites parmi-elles les points ci-dessous</i>	19
2.4	FACTEURS INFLUENÇANT LA FIABILITÉ D'UN BIO INDICATEUR	19
2.4.1	<i>Facteurs intrinsèques</i>	20
2.4.2	<i>Facteurs extrinsèques</i>	20
2.4.3	<i>Biomarqueurs</i>	20
3	CHAPITRE III. CONTAMINATION DES SYSTEMES AQUATIQUES PAR LES METAUX TRACE	21
3.1	LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES	21
3.2	LES SOURCES NATURELLES DES MÉTAUX LOURDS	21
3.2.1	<i>Les sources anthropiques</i>	22
	<i>Les sources anthropiques sont les suivantes:</i>	22
3.3	LE CADMIUM	22
3.4	LE CHROME	22
3.5	LE NICKEL	22
3.6	LE PLOMB	23
3.7	LE ZINC	23
3.8	LE CUIVRE	23
3.9	CONTAMINATION DE L'ENVIRONNEMENT PARLES MÉTAUX LOURDS	24
3.9.1	<i>Contamination des sols</i>	24
	<i>Le processus de transfert</i>	24
3.9.2	<i>Contamination de l'eau</i>	24

3.10	EFFETS DES MÉTAUX LOURDS SUR LE MILIEU AQUATIQUE	24
4	CHAPITRE VI. CHIMIE DES MICROPOLLUANTS ET DES TOXIQUES DANS LES ECOSYSTEMES (TOXICOLOGIE NUCLEAIRE)	25
4.1	INTRODUCTION :	25
4.2	ORIGINE DES POLLUTIONS NUCLÉAIRES :	25
4.2.1	<i>Naturelle</i>	25
4.2.2	<i>Industrielle</i>	25
4.2.3	<i>Militaire</i>	25
4.2.4	<i>Médicale</i>	25
4.2.5	<i>Accidentelle</i>	26
4.3	PRINCIPAUX TYPES DE RADIATIONS IONISANTES :	26
4.3.1.1	Les rayons X :	26
4.3.1.2	Les rayons α :	26
4.3.1.3	Les neutrons :	26
4.4	UNITÉS RADIOBIOLOGIQUES	26
4.4.1	<i>le Curie (C) :</i>	26
4.4.2	<i>le Rad :</i>	27
4.5	EFFETS BIOLOGIQUES DES RADIATIONS IONISANTES	27
4.5.1	<i>Modalités de contamination</i>	27
4.5.2	<i>Radiosensibilités des êtres vivants</i>	27
5	CHAPITRE V. TOXINES DE MICROORGANISMES: MODES D' ACTIONS ET BIOTECHNOLOGIES	27
5.1	LES TOXINES PRODUITES PAR DES BACTÉRIES	27
5.2	LES TOXINES DE MICRO-ALGUES MARINES	28
5.3	NATURE CHIMIQUE ET CONSÉQUENCES	28
5.4	NIVEAU DE TOXICITÉ	28
5.5	NATURE CHIMIQUE ET CONSÉQUENCES	28
5.6	MÉCANISMES D' ACTION - NIVEAU DE TOXICITÉ	29
5.7	COMPARAISON ENDOTOXINE ET EXOTOXINE	29
5.8	LES PHYCOTOXINES ET LE MILIEU	30
5.9	QUELQUES PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES	30
5.9.1	<i>La toxinogénèse</i>	30
5.10	LE RÔLE DES ACTIVITÉS HUMAINES	31
5.11	LES TOXINES DE CHAMPIGNONS	31
5.11.1	<i>Moisissures et mycotoxines</i>	32
6	CHAPITRE VI. REPONSES DES ORGANISMES ET DES POPULATIONS AUX TOXIQUES	33
6.1	COMMENT EST-ON EXPOSÉ À UN TOXIQUE ?	33

6.2	LES DIFFÉRENTES VOIES DE PÉNÉTRATION D'UN TOXIQUE	33
6.2.1	<i>La voie respiratoire (inhalation)</i>	33
6.2.2	<i>La voie cutanée (peau)</i>	33
6.2.3	<i>La voie orale (ingestion)</i>	34
6.3	QUEL EST LE CHEMINEMENT D'UN TOXIQUE DANS L'ORGANISME ?	34
6.3.1	<i>L'absorption</i>	35
6.3.2	<i>Le transport et la distribution</i>	35
6.3.3	<i>La biotransformation (ou le métabolisme)</i>	36
6.3.4	<i>L'excrétion</i>	36
6.3.5	<i>L'atteinte toxique : La Toxicité</i>	36
6.4	LA RÉVERSIBILITÉ ET L'IRRÉVERSIBILITÉ	37
6.5	LA CLASSIFICATION DES EFFETS TOXIQUES	38
6.6	LES FACTEURS POUVANT INFLUENCER LES EFFETS TOXIQUES	39
6.6.1	<i>Facteurs génétiques :</i>	39
6.6.2	<i>Facteurs physiopathologiques :</i>	39
6.6.3	<i>Facteurs environnementaux</i>	39
7	CHAPITRE VII. METHODES D'ÉVALUATION DE LA POLLUTION AQUATIQUE FONDÉES SUR LE PHYTOPLANCTON TOXIQUE.	40
7.1	DÉFINITION	40
7.2	PRINCIPALES CLASSES ALGALES	40
7.2.1	<i>Diatomées (Bacillariophycées)</i>	40
7.2.2	<i>Dinoflagellés (Dinophycées)</i>	41
7.2.3	<i>Prymnésiophycées</i>	42
7.2.4	<i>Chrysophycées</i>	42
7.2.5	<i>Raphidophycées</i>	42
7.2.6	<i>Cryptophycées</i>	42
7.2.7	<i>Chlorophycées</i>	42
7.2.8	<i>Prasinophycées</i>	43
7.2.9	<i>Eugénophycées</i>	43
7.2.10	<i>Eustigmatophycées</i>	43
7.2.11	<i>Cyanobactéries</i>	43
7.3	PHYTOPLANCTON ET ECOTOXICOLOGIE	43
7.3.1	<i>Tests monospécifiques</i>	43
7.3.2	<i>Tests plurispécifiques</i>	44
8	CHAPITRE VIII. LA RÉGLEMENTATION RELATIVE AUX PESTICIDES ET AUX TOXINES: PROTECTION DES ECOSYSTEMES	45

8.1	LES PESTICIDES TUENT	45
8.2	RÉGLEMENTAIRES ET TECHNIQUES	45
8.3	MICRO-ORGANISMES ET TOXINES HAUTEMENT PATHOGÈNES (MOT)	47
	CONCLUSION	48
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49

Introduction

L'accroissement des quantités de pesticides, de détergents ou de métaux lourds déversés dans la biosphère est l'un des revers du développement industriel et agricole de ces dernières décennies.

Ainsi, la prise de conscience du danger que représente ces polluants pour l'Homme et pour l'environnement est d'une grande importance, ce qui a poussé la recherche à se saisir de cette problématique à l'échelle des différents écosystèmes.

Il est estimé qu'aujourd'hui plus de cent mille molécules chimiques sont susceptibles de polluer ou de contaminer les écosystèmes. Dans les cours d'eau, il s'agit des métaux lourds, des pesticides, des médicaments et autres polluants non éliminés à la sortie des stations d'épuration.

1 Chapitre I. COMMUNAUTES AQUATIQUES ET POLLUTION

1.1 Définitions

1.1.1 Ecologie:

L'écologie peut être définie comme la (les) sciences traitant des organismes en interaction avec le milieu naturel.

1.1.2 La Toxicologie:

Selon TRUHAUT, (1976). C'est la discipline qui étudie les substances toxiques (poisons) qui provoquent des altérations biologiques menant à la mort si les perturbations physiologiques sont intenses. La toxicologie est à la fois descriptive et explicative. Elle évalue la toxicité (tests) et précise les mécanismes.

1.1.3 Ecotoxicologie :

L'écotoxicologie est une science dont l'objet est l'étude des modalités de contaminations de l'environnement par des agents polluants naturels ou artificiels produits par l'activité humaine ainsi que leurs effets nocifs sur l'environnement et les êtres vivants peuplant la biosphère.

1.2 Spécificité de l'Ecotoxicologie

Etude des effets directs (ou indirects) et différés des polluants toxiques sur les individus les populations et les biocénoses ;

Etude des polluants directement ou indirectement toxiques (pollution par les gaz à effet de serre, pollution thermique des eaux) ;

Prévision des impacts potentiels de la pollution d'un écosystème donné ou d'une fraction de l'écosystème, individu, population communauté, par un produit chimique nouveau ou par un effluent complexe d'origine industrielle ;

1.3 Qu'est ce qu'un polluant ?

Selon Bang (1980), la pollution est essentiellement un jugement de valeur sur ce que chacun souhaite trouver dans l'environnement ; ce jugement étant ou non étayé par des données scientifiques; Selon Moriarty (1983), le terme polluant se rapporte aux substances présentes dans l'environnement, en partie à cause des activités humaines et qui ont des effets délétères sur les organismes vivants et parmi les polluants les plus étudiés, on peut citer les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Les Polychlorobiphényles (PCB), Les Dioxines, Pesticides, Métaux lourds, Plastifiants, Surfactants non ioniques et Dérivés halogénés ou encore les polluants aquatiques tels que les Marées noires , Déchets en provenance de bateaux , Déchets industriels et nucléaires , Epaves , Station de forage pétrolier, Précipitations atmosphériques (métaux lourds et hydrocarbures) , Déchets urbains, Gaz d'échappement via atmosphère, Engrais , pesticides et Eaux de refroidissement .

1.3.1 Produits d'origine anthropique arrivant en Mer

Chapitre I

Déchets dégradables, essentiellement du matériel organique sujet aux attaques bactériennes et à certains processus oxydatifs ;

Fertilisants: nitrates et phosphates ;

Déchets stables comme les métaux lourds et les halogénés ;

Déchets solides généralement inertes ;

Mer = Réceptacle Final de toute pollution

Environ 5 billions de tonnes de produits chimiques synthétisés annuellement

1.4 Le monitoring des polluants

1.4.1 Définition du monitoring :

Action de recherche et/ou de contrôle dont l'objet est de suivre dans le temps les changements éventuels des principales caractéristiques environnementales, biologiques et écologiques propres à une zone ou à un type d'habitat déterminés.

1.4.2 Triple finalité du monitoring des polluants

Étudier les concentrations et la répartition des polluants dans l'environnement ;

Évaluer les effets de ces polluants, aux concentrations détectées, sur les populations et les écosystèmes exposés ;

Fixer un niveau maximum de rejet au niveau d'un site considéré comme sources d'émission des polluants pour s'assurer que les normes de qualité de l'environnement définies ne sont pas dépassées.

1.5 Différents types de pollution de l'eau

1.5.1 Pollution chimique :

1.5.1.1 Définition d'un micropolluant:

Un «micropolluant» est un polluant présent en quantité très faible dans l'environnement, soit de l'ordre du microgramme par litre ($\mu\text{g/l}$) ou du nanogramme par litre (ng/l), mais toujours en quantité plus élevée que naturellement. On parlera plus spécifiquement de xénobiotique lorsque ce polluant est étranger à la biocénose et donc issu uniquement de l'activité humaine.

On distingue généralement les micropolluants inorganiques, constitués des métaux lourds, des micropolluants organiques comme les pesticides, médicaments, hydrocarbures, biocides, etc.

1.5.1.2 Sources :

On peut distinguer trois sources principales de pollution des eaux de surface par les micropolluants:

Chapitre I

source agricole et forestière

Source urbaine

Source industrielle

Aux quelles s'ajoute des sites contaminés (anciens sites industriels, anciennes décharges, etc.) ainsi que la pollution par les eaux de pluie: les gouttes d'eau lessivent l'atmosphère des particules et des polluants qu'elle contient.

1.5.1.3 Exemple de la pollution par les Hydrocarbures

Ce sont des composés issus de la combustion incomplète des produits pétroliers à partir des activités urbaines (chauffage), industrielles et de transports (gaz d'échappement des véhicules). Ce sont des composés peu solubles dans l'eau, ils s'adsorbent sur les matières en suspension et les sédiments et de ce fait se concentrent beaucoup dans le milieu naturel. Ils se bio accumulent dans les graisses, notamment des poissons et des mollusques. Beaucoup d'hydrocarbures sont reconnus cancérigènes notamment le benzo (a) pyrène. Leur origine est donc généralement diffuse. Les hydrocarbures sont les polluants organiques les plus fréquemment rencontrés dans les eaux souterraines (**Fig.1**).

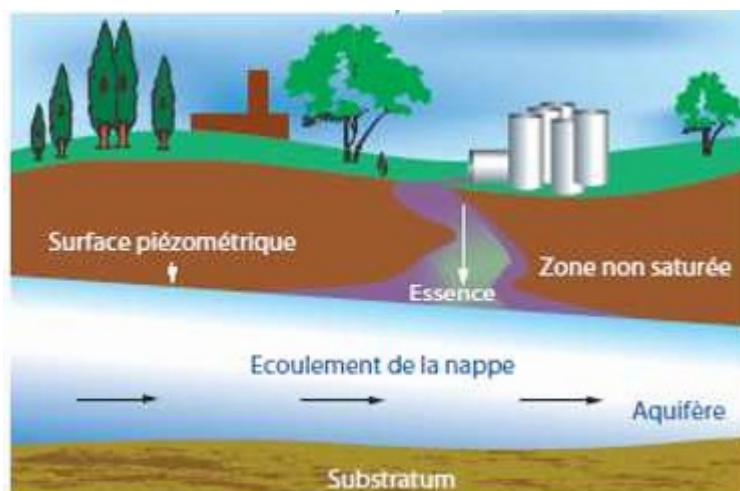


Figure 1. Hydrocarbures flottant à la surface de la nappe

1.5.1.4 Pollution par les pluies acides:

L'acidification, outre les effets biologiques directs de l'abaissement du pH des eaux sur les communautés aquatiques, a pour conséquence d'induire des pollutions secondaires des eaux. Ces dernières résultent de ce que l'acidité forte a pour conséquence de mettre en solution des métaux toxiques et de l'aluminium présents dans les sédiments. Par exemple, des métaux tels le plomb, le cadmium ou le mercure vont se retrouver dans ces eaux acidifiées à des concentrations supérieures à la normale.

1.5.1.5 Nitrates

Plusieurs études ont mis en évidence une haute corrélation entre l'accroissement exceptionnel de la consommation d'engrais nitrés et celui du flux de nitrates dans les cours d'eau. En outre, les concentrations ont tendance à s'élever dans les nappes phréatiques. Les engrais nitrés présentent un effet désastreux sur la qualité des eaux continentales. La concentration maximale admissible dans l'eau potable, définie par l'OMS, est de 9ppm

d'azote nitrique, soit 50 mg.L⁻¹. Les combustions sont également responsables pour une part significative, de l'ordre de 30 MT /an, de l'apport de nitrates aux eaux de surface. Une évaluation globale montre que les fleuves charrient vers l'océan un flux de nitrates d'origine anthropique au moins dix fois supérieur à leur charge naturelle dans les eaux non polluées.

1.5.1.6 Les phosphates

La civilisation moderne a accru la vitesse de circulation du phosphate. En effet, l'agriculture à travers les engrais et les détergents utilisent des quantités élevées de divers phosphates. De même, les eaux résiduaires à la sortie des stations d'épuration peuvent encore renfermer des résidus de phosphates. Celui-ci provient de la minéralisation des matières organiques. Ceci explique la persistance du risque d'eutrophisation des lacs par le rejet d'effluents urbains. Il a été estimé que le flux moyen de phosphates d'origine anthropique transportés par les fleuves vers l'océan est cinq fois supérieur aux flux naturels dans les eaux non polluées.

1.5.2 Pollution biologique

Les agents biologiques de pollution de l'eau sont les micro-organismes et les matières organiques fermentescibles.

1.5.2.1 Pollution microbiologique des eaux

La pollution microbiologique des eaux se traduit par une forte contamination par de nombreux agents pathogènes, bactéries, protozoaires et virus. Elle soulève dans bien des cas de redoutables problèmes d'hygiène publique qui ne sont pas limités aux seuls pays du tiers-monde.

- De façon générale, l'eau de boisson et celle utilisée pour la préparation des aliments constituent la principale cause de pathologie des populations humaines ;
- La pollution par des matières organiques permet à de nombreuses espèces de germes pathogènes de se multiplier dans des proportions élevées : L'utilisation des cours d'eau comme moyen de dilution des effluents urbains présente donc de graves conséquences pour l'hygiène publique
- Les eaux usées des abattoirs par exemple rejettent des germes aérobies et anaérobies, dont plusieurs espèces sont pathogènes.
- Le rejet des eaux d'égouts urbains en mer présente de sérieux risques bactériologiques pour les baigneurs et aussi pour les consommateurs de fruits de mer.

Cette extension incessante de la pollution microbiologique des eaux continentales et littorales a pour conséquence l'augmentation d'affections telles que les colibacilloses ou les hépatites virales, dysenteries, choléra, typhoïde, des shigelloses, des maladies virales entériques. Le fameux pouvoir antibiotique de l'eau de mer, souvent évoqué pour justifier les comportements inadmissibles et irresponsables des collectivités locales ou de pollueurs privés, ne joue que dans certaines limites.

1.5.2.2 Pollution par des sels minéraux nutritifs

De très nombreux sels minéraux sont rejetés dans les eaux continentales ou marines par l'industrie et l'agriculture (engrais chimique). Outre leurs propriétés réductrices, les sels minéraux présentent une action biocide qui n'est pas négligeable et s'ajoute à la déplétion du taux d'oxygène dissous.

1.5.2.3 La pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles (MOF)

Outre le rejet des égouts urbains, il faut mentionner ceux de diverses industries agroalimentaires hautement polluantes : abattoirs, laiteries, fromageries, sucreries, etc.

L'industrie du papier (papeterie) occupe une place de choix dans la pollution des eaux. En effet, elle rejette des lessives riches en glucides, donc hautement fermentescibles. Une papeterie «moyenne » présente une capacité de pollution des eaux par les matières organiques fermentescibles (MOF) comparable à celle d'une ville de 500000 habitants, lorsqu'elle rejette à la rivière ses eaux usées sans épuration préalable. La charge de pollution d'une eau par les MOF s'évalue par la demande biologique d'oxygène en 5 jours (DBO_5).

1.6 Conséquences de la pollution aquatique :

Le fait est que la pollution des mers et des océans ne soit pas toujours faciles à contrôler, mais il faut garder à l'esprit que d'autres facteurs l'aggravent également, comme l'exploitation de la pêche. Ainsi la pollution aquatique aura pour conséquences :

1.6.1 Perte de la biodiversité

Toutes les causes susmentionnées affectent la perte d'espèces aquatiques vivant dans nos mers et océans, ce qui en fait l'effet principal et le plus grave de la pollution marine. Beaucoup de ces espèces sont très importantes, soit parce qu'elles sont de grands prédateurs, soit parce qu'elles jouent un rôle clé dans le système écologique.

1.6.2 Eutrophisation

En fonction du type de substance jetée dans l'eau, notamment par les activités industrielles et agricoles, il peut y avoir de forts pics de nutriments tels que les nitrates et les phosphates qui entraîneront une croissance incontrôlée des colonies d'algues et de bactéries, ce qui conduira à une eutrophisation de l'eau. Ce processus signifie que, en raison de la grande abondance de matière végétale, tout l'oxygène de l'eau est consommé et la lumière de la surface est bloquée, empêchant ainsi de vivre tout organisme qui dépend de l'oxygène ou de la lumière pour se développer.

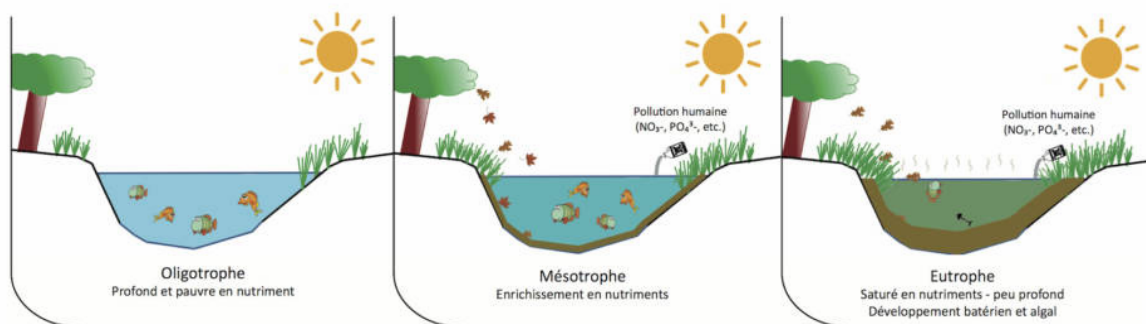


Figure 2. schéma explicatif du processus d'eutrophisation

(www.observatoire-poissons-seine-normandie.fr)

1.6.3 Accumulation de grandes masses de plastiques

Cette situation est causée par les torsions océaniques qui provoquent l'accumulation de plastique jeté à la surface. Des signes de ce processus sont déjà visibles, comme la grande mer de plastique qui s'est formée dans l'océan Pacifique entre Hawaï et la Californie, et qui couvre désormais une superficie équivalente à celle de la France, de l'Allemagne et de l'Espagne réunies. Il s'agit d'une zone avec 10 kilogrammes de plastique par kilomètre, avec un poids total de plus de 80 000 tonnes.

En Algérie, le plastique représente 60 à 80% des déchets déversés dans le milieu marin national".

1.6.4 Appauvrissement de l'oxygène et acidification de l'eau

L'augmentation de la température de l'eau entraîne une diminution de l'oxygène disponible dans le milieu marin. Un exemple très visible de ce processus est celui des récifs coralliens, qui meurent à un rythme de plus en plus rapide et laissent un grand nombre d'espèces sans habitat.

En outre, il existe un autre problème causé par les activités humaines, à savoir l'excès de dioxyde de carbone (CO₂) que nous émettons. Ce processus, appelé acidification des océans, est une modification du pH de l'eau qui est directement liée à une absorption excessive de CO₂.

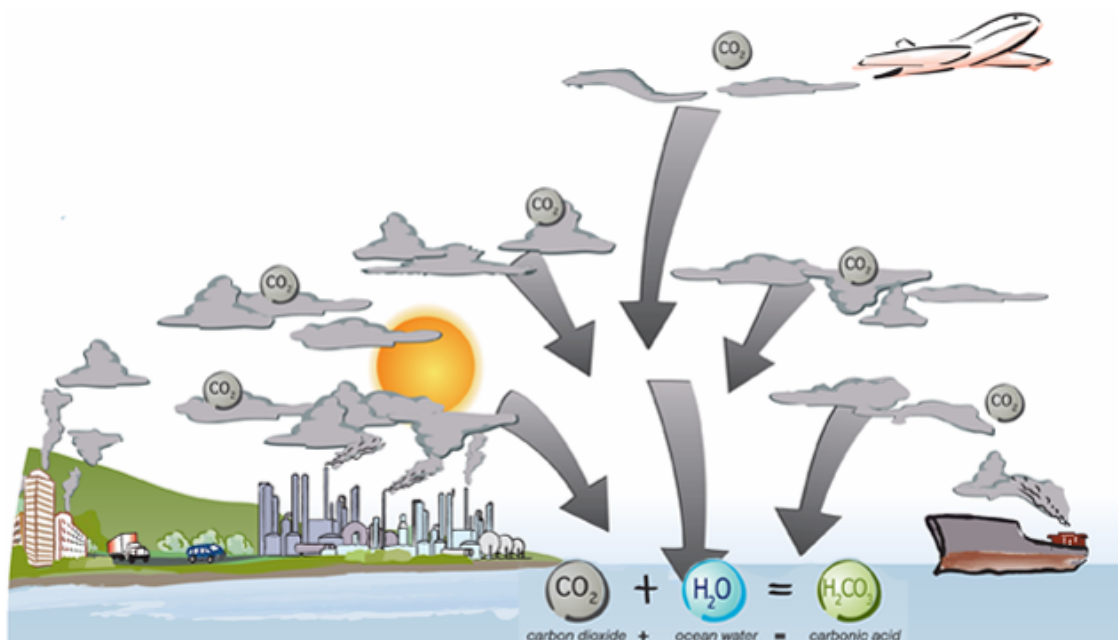


Figure3: schéma explicatif du processus d'Acidification des océans

(www.livingoceans.org)

1.6.5 Mort et changements physiologiques chez les organismes aquatiques

Chapitre I

Les eaux usées et les eaux de pluie sont la principale cause de mortalité ou d'altération physiologique des êtres vivants marins tels que les poissons. En effet, des produits tels que les herbicides, les pesticides, les engrais et même des traces de médicaments anti-inflammatoires (qui ne sont pas traités dans les stations d'épuration), provoquent des altérations du système endocrinien, du foie et même du système reproducteur des poissons et des mammifères.

1.7 Comment surveiller la qualité de l'environnement ?

Pour surveiller l'environnement nous devons tenir compte de deux catégories d'indicateurs :

- Détection des polluants et quantifications dans les milieux physiques et biologiques :
Chimie (monitoring chimique)
- Évaluation des effets des pollutions sur les organismes vivants :
 - Sur les individus
 - Sur les populations et/ou les communautés

1.7.1 Monitoring des polluants dans les écosystèmes

Un monitoring biologique est utilisé pour constater et évaluer le degré d'exposition à certaines substances dangereuses. En général, un monitoring biologique consiste à déterminer la présence de certaines substances ou la concentration de produits de dégradation du produit à risque dans l'urine, le sang ou l'air expiré. L'analyse de ces résultats permet de superviser l'efficacité de la politique de prévention ;

2 Chapitre II. BIOMARQUEURS ET BIO-INDICATEURS DE POLLUTION DANS LES ECOSYSTEMES

2.1 Caractéristiques requises d'un bio indicateur

2.1.1 La bioaccumulation :

Est l'accumulation d'une substance à partir de l'eau et/ou de la nourriture. L'apport de contaminant par voie alimentaire implique donc qu'il y ait eu bioconcentration aux niveaux trophiques inférieurs.

Les lichens sont parmi les meilleurs bio-accumulateurs (métaux lourds, éléments-traces, phytosanitaires, dioxines). On utilise aussi le terme de Bio-cumulatif. (Capacité des organismes à absorber...)

2.1.2 La bioconcentration :

Désigne la tendance d'une substance à s'accumuler dans un organisme vivant à un niveau supérieur à celui du milieu environnant par captation directe à partir de ce milieu. Exemple de bioconcentration : concentration du mercure par les poissons.

2.1.3 La bioamplification :

Désigne l'augmentation cumulative, à mesure qu'on progresse dans la chaîne alimentaire (chaîne trophique), des concentrations d'une substance persistante.

2.1.4 Les Bio-indicateurs :

Les bio-indicateurs ou indicateurs biologiques désignant des espèces végétales ou animales ayant une sensibilité particulière à un facteur physique ou chimique. Très réceptifs, ils accumulent fortement les polluants et leur réaction est rapide et visible ce qui nous permet de détecter et surveiller les modifications abiotiques ou biotiques de l'environnement dues à tel ou tel type d'action humaine (Druart, 2011). Exemple : Lichens, paramécie, abeille.

2.2 Caractéristiques d'un indicateur biologique idéal

- Tous les individus de l'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 l'alimentation, quelles que soient la localisation et les conditions environnementales ;
- L'espèce devrait être capable d'accumuler le polluant sans être tuée ni même que sa reproduction en soit perturbée par les niveaux maximum de polluants observés dans l'environnement ;
- L'espèce devrait être sédentaire afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec la localisation géographique considérée ;

Chapitre V

- L'espèce devrait être abondante dans la région étudiée et si possible devrait avoir une distribution géographique étendue pour favoriser les comparaisons entre zones distinctes ;
- Les espèces à forte longévité sont préférables car elles permettent un échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire. Elles permettent l'exposition à un contaminant pendant de longues périodes ;
- L'espèce devrait être de taille suffisante pour fournir des tissus en quantité importante pour analyse, voire pour permettre des analyses dans des organes spécifiques ;

L'espèce devrait être facile à échantillonner et suffisamment résistante

2.3 Intérêt de l'utilisation des bio-indicateurs

L'intérêt que représente les bioindicateurs peut être résumé en ces quelques points

- Installation rapide et facile avec une faible infrastructure ;
- Grande souplesse au niveau de la modification, extension ou déplacement de ces réseaux ;
- Faible coût, tant au niveau de l'investissement que du suivi ;
- Réalisation d'études préliminaires permettant ensuite de choisir avec précision les emplacements les mieux adaptés à l'implantation de capteurs physico-chimiques ;
- Densification à faible coût des réseaux de capteurs physico-chimiques ;
- Détection des polluants nouveaux ou accidentels non pris en compte par les capteurs en place ;

2.3.1 Limites de l'utilisation de bio-indicateurs :

L'utilisation des bioindicateurs pose cependant certaines contraintes et limites parmi-elles les points ci-dessous

- Disponibilité non permanente pour certaines espèces végétales ;
- Possibilités d'interférences par d'autres stress biotiques ou abiotiques dans les réponses ;
- Fourniture d'informations essentiellement relatives sur les niveaux de pollution atmosphérique (aspect qualitatif) ;
- Pas encore de véritable reconnaissance ni de normalisation des méthodes aussi bien sur la mise en œuvre que sur l'interprétation des résultats (échelle de correspondance), même si les expériences se multiplient à travers le pays ;

2.4 Facteurs influençant la Fiabilité d'un bio indicateur

On distingue deux catégories :

- Facteurs intrinsèques (propre à l'espèce bio-indicatrice + individus qui la composent) ;
- Facteurs extrinsèques (environnement tel que la température, pluviométrie...).
- pour être amenée en laboratoire afin d'effectuer des études de décontamination ;

2.4.1 Facteurs intrinsèques

Propres aux caractéristiques de l'espèce bio-indicatrice et des individus qui la composent :

- les taux d'accumulation et d'excrétion ;
- l'état éco-physiologique des individus ;
- l'interférence entre polluants dans leurs effets toxicologiques sur l'espèce considérée ;

2.4.2 Facteurs extrinsèques

- La température
- Les précipitations (en particulier chez les végétaux)
- Le pH des eaux et des sols
- La salinité
- Les facteurs écologiques abiotiques conditionnent de façon déterminante la bioconcentration des polluants en particulier dans les espèces bio indicatrices
- La température et les précipitations chez les végétaux, la température chez les animaux, le Ph des eaux, leur salinité parmi d'autres facteurs abiotiques en milieu aquatique contrôlent les taux d'accumulation des polluants
- De nombreuses recherches effectuées ont mis en évidence le rôle important de la salinité et le PH dans l'influence du taux de toxicité d'un polluant

2.4.3 Biomarqueurs

Un biomarqueur est défini comme un changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance à caractère polluant. Cette définition peut être complétée de plusieurs critères regroupant les informations importantes qui permettent d'évaluer les forces et les faiblesses de différents biomarqueurs (Stegeman et al., 1992; Van der Oost et al., 2003) :

- La réponse des biomarqueurs doit être rapide afin de pouvoir être considérée comme un paramètre d'alerte précoce ;
- Les niveaux constitutifs et leurs variations, dues aux effets de facteurs physiologiques ou environnementaux, doivent être définis afin de distinguer la réponse induite par un contaminant de la variabilité naturelle ;
- Les mécanismes qui supportent la relation entre la réponse des biomarqueurs et l'exposition aux contaminants doivent être connus. De ce fait, la notion de biomarqueurs est amenée à évoluer avec les connaissances scientifiques
- La signification toxicologique des biomarqueurs, qui peut être décrite comme le lien entre la réponse biochimique et les effets sur les organismes, doit être connue
- Identifier et quantifier la présence des substances chimiques dans l'organisme
- Déterminer quels facteurs sont susceptibles d'expliquer les variations des concentrations observées des biomarqueurs
- Identifier si possible la part contributive de différentes voies ou sources d'exposition (eau, alimentation,...) dans les niveaux d'imprégnation observés (facteurs de risque)

3 Chapitre III. CONTAMINATION DES SYSTEMES AQUATIQUES PAR LES METAUX TRACE

Les éléments métalliques se retrouvent, sous différentes formes, toujours présents au sein de l'environnement. A l'état de traces, ils sont nécessaires voire indispensables aux êtres vivants. A concentration élevée, en revanche, ils présentent une toxicité plus ou moins forte.

La présence de métaux lourds dans l'environnement résulte de causes naturelles et des activités humaines.

Elle pose un problème particulier, car les métaux lourds s'accumulent et ils ne sont pas biodégradables dans l'environnement. Ces métaux lourds ne présentent pas tous les mêmes risques (ils n'ont pas les mêmes degrés de toxicité) en raison de leurs effets sur les organismes, leurs propriétés chimiques, physico-chimiques et biologiques.

Leur toxicité est très variable et leur impact sur l'environnement très différent.

3.1 Les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM) correspondent aux éléments métalliques qui sont présents dans la croûte terrestre à des concentrations inférieures à 0,1% soit 1000 mg.kg⁻¹. Ils sont fréquemment désignés par le terme « métaux lourds » en raison de la forte masse atomique de certains d'entre eux, ou bien « métaux toxiques » du fait de leur caractère toxique. La plupart des ETM ne sont que très faiblement volatiles et ne sont pas biodégradables. Ces deux principales caractéristiques confèrent aux ETM un grand pouvoir d'accumulation dans tous les compartiments de la biosphère.

En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus biologiques) ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants. En nutrition et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo-éléments indispensables à certains organismes, en particulier par leur action catalytique au niveau du métabolisme.

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), le zinc (Zn). Les métaux lourds sont redistribués naturellement dans l'environnement par les processus géologiques et les cycles biologiques.

Les activités industrielles et technologiques diminuent cependant le temps de résidence des métaux dans les roches, ils forment de nouveaux composés métalliques, introduisent les métaux dans l'atmosphère par la combustion de produits fossilifères. Il faut différencier la part qui résulte de la contamination d'origine humaine (anthropogène) et la part naturelle (géogène).

3.2 Les sources naturelles des métaux lourds

Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma.

3.2.1 Les sources anthropiques

Chapitre V

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes

Les sources anthropiques sont les suivantes:

- Activités pétrochimiques ;
- Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment....) ;
- Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations) ;
- Incinération de déchets ;
- Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents) ;
- Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles ;

3.3 Le cadmium

Il est rencontré dans la nature dans les minerais de zinc. Le cadmium est un sous-produit important de la métallurgie du zinc. Les principaux secteurs d'utilisation sont les batteries nickel-cadmium (70%), les pigments (13%), la galvanoplastie (8%) et les stabilisants (7%). Moins de 5% de la quantité de cadmium utilisée par l'industrie est recyclée. C'est à dire que la quasi-totalité du cadmium d'origine anthropique est disséminée dans l'environnement. Les apports de cadmium au milieu naturel sont liés à l'industrie du zinc, à la combustion du charbon, à la sidérurgie et à la fabrication et l'utilisation des engrais phosphatés.

3.4 Le chrome

L'industrie métallurgique est la plus importante utilisatrice de chrome. 80% du Cr extrait est utilisé pour la fabrication d'alliages ferreux et non-ferreux. Le Cr restant est utilisé dans l'industrie chimique sous forme de dichromates pour le tannage des peaux et des cuirs, comme mordant pour teintures, dans la production de conservateurs alimentaires, et comme colorant sous forme de sels de chrome.

3.5 Le nickel

Le nickel est un élément métallique très répandu dans la croûte terrestre. Il est largement utilisé pour la fabrication de l'acier inoxydable et pour la production d'alliages (74%). Les autres formes d'utilisation sont les traitements de surfaces (10%), les batteries Nickel Cadmium et les catalyseurs Nickel-Aluminium. Les sources naturelles telles que la combustion du charbon, les feux de forêts, les volcans, et les sources anthropiques comme l'utilisation des combustibles fossiles et la production de métaux non-ferreux sont considérées comme les principales sources d'émission du nickel dans l'environnement.

3.6 Le plomb

Elément amplement répandu dans la croûte terrestre, le plomb est un des métaux les plus utilisés dans l'industrie. Les principaux secteurs d'utilisation industrielle sont les accumulateurs (67%) et les oxydes de plomb dans l'industrie chimique (12%). Jusqu'à l'année 2000, le plomb, sous forme tétraéthyl, a été largement utilisé dans les carburants. Cette dernière décennie, les émissions de plomb dans l'environnement ont fortement diminué suite à la généralisation de l'utilisation d'essence sans plomb. En milieu urbain, les

peintures à base de plomb sont encore des sources de relargage de plomb, de même que les systèmes de canalisations très anciens.

3.7 Le zinc

Il est naturellement présent dans la nature, principalement sous forme de sulfure. La métallurgie utilise beaucoup de zinc lors de la fabrication d'alliages. Il est également utilisé pour la galvanisation de pièces métalliques, dans la fabrication de pigments pour la teinture, dans les vernis, comme raticide et enfin dans la fabrication de produits phytosanitaires. Les apports de zinc au milieu naturel sont particulièrement dus à la métallurgie (production de métaux non-ferreux, industrie du fer et de l'acier) et à la combustion des bois et des charbons.

3.8 Le cuivre

Il est présent dans la nature principalement sous forme de minerais de cuivre. Il s'agit d'un métal « essentiel ». Le cuivre est très utilisé dans l'industrie pour son excellente conductivité thermique et électrique. Il entre aussi dans la composition de nombreux alliages (laiton, bronze). Sous forme de sels de cuivre, il est utilisé comme fongicide en agriculture, pour les traitements chimiques de surface, le tannage des peaux, entre autres. L'industrie électrique, très consommatrice de cuivre, en rejette de grandes quantités dans les rivières et l'atmosphère dont l'ultime réceptacle est l'océan. De plus, l'utilisation d'oxydes de cuivre comme matière active dans certaines peintures antisalissure constitue une source importante de cuivre en zone portuaire

Tableau I. Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement(Biney et al.,1994)

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

3.9 Contamination de l'environnement par les métaux lourds

3.9.1 Contamination des sols

Tous les sols contiennent naturellement des éléments traces métalliques. On parle de contamination d'un sol lorsque sa teneur en élément trace est supérieure à la concentration naturelle.

La concentration naturelle de l'élément trace dans le sol résulte de son évolution à partir de la roche initiale. On parle de pollution des sols par un élément trace lorsque l'élément trace est présent à une dose constituant une menace pour l'activité biologique ou les fonctions du sol. Les contaminations diffuses, qui affectent les niveaux superficiels des sols, résultent de phénomènes naturels tels que les retombées atmosphériques d'aérosols d'origine volcanique, ou d'actions anthropiques intentionnelles ou non : poussières et dépôts atmosphériques, fertilisants minéraux (cuivre contenu dans les phosphates), pesticides, lisiers et fumiers, boues de stations d'épuration, activités minières, déchets industriels (bâtiments) ou urbains, transports, etc.

Le processus de transfert

Les précipitations et l'irrigation sont les principales sources d'eau des sols. Une partie est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface. Une partie pénètre dans le sol et se dirige alors soit vers les racines des plantes, soit, par gravité, vers les horizons profonds et les nappes phréatiques. Au cours de ces transports, l'eau se charge en éléments en traces dissous.

3.9.2 Contamination de l'eau

Les métaux présents dans l'eau peuvent exister sous forme de complexes, de particules ou en solutions. Les principaux processus qui gouvernent la distribution et la répartition des métaux lourds sont la dilution, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Certains processus chimiques peuvent néanmoins intervenir également. C'est ainsi que la spéciation selon les diverses formes solubles est régie par les constantes d'instabilité des différents complexes, et par les propriétés physico-chimiques de l'eau (pH, ions dissous, et température). Les métaux lourds subissent de nombreuses transformations: réduction par processus biochimique, méthylation, déméthylation et oxydation d'espèces de métaux isolées des réactions redox peuvent aussi faciliter certaines transformations. Les processus biochimiques sont effectués par des micro-organismes et par des algues. Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes :

- Les eaux usées domestiques et industrielles ;
- La production agricole ;
- Les polluants atmosphériques ;
- Les anciennes décharges ;

3.10 Effets des métaux lourds sur le milieu aquatique

A de faibles concentrations, beaucoup de métaux lourds, dont Hg, Cd, Pb, As et Cu inhibent la photosynthèse et la croissance du phytoplancton. Les effets observés à des niveaux trophiques supérieurs se manifestent notamment par un retard du développement des embryons, des malformations et une perturbation de la croissance des adultes chez les poissons, les mollusques et les crustacés. En outre, tout au long de la chaîne alimentaire, certains se concentrent dans les organismes vivants. Ils peuvent ainsi atteindre des taux très élevés dans certaines espèces consommées par l'homme, comme les poissons. Cette " bioaccumulation " explique leur très forte toxicité.

4 Chapitre VI. CHIMIE DES MICROPOLLUANTS ET DES TOXIQUES DANS LES ECOSYSTEMES (TOXICOLOGIE NUCLEAIRE)

4.1 Introduction :

La pollution nucléaire appelée encore radioactive est particulièrement dangereuse pour l'homme car les radioéléments non biodégradables ont une durée de vie plus ou moins longue et se désintègrent en émettant des rayonnements dangereux créant des tumeurs. Ils ont donc un caractère cancérigène et mutagène.

4.2 Origine des pollutions nucléaires :

Cette pollution a plusieurs origines :

4.2.1 Naturelle

La principale source de la pollution nucléaire est naturelle. 1/3 de l'irradiation reçue est due au radon qui est un gaz naturel radioactif plus abondant dans les régions granitiques provenant de la désintégration de l'uranium. On cite aussi les rayonnements cosmiques, les aliments (radionucléides).

4.2.2 Industrielle

Ce type de pollution aura lieu lors de la production de l'électricité nucléaire, du retraitement des déchets nucléaires et du stockage des produits radioactifs dans l'industrie médicale. Toutes ces sources de pollution créent un certain nombre de déchets radioactifs. D'autres industries notamment alimentaires utilisent les radioéléments pour la stérilisation (en faible dose) et la conservation des produits alimentaires contre les germes bactériens et les insectes nuisibles.

4.2.3 Militaire

Cette pollution se manifeste lors des essais aériens des bombes nucléaires mais aussi avec les épaves de sous-marins atomiques.

4.2.4 Médicale

Cette pollution se déroule par l'utilisation de substances radioactives aux divers examens de radiographies médicales ou dentaires et anticancéreuse.

4.2.5 Accidentelle

Lors d'accidents nucléaires comme Tchernobyl des éléments radioactifs peuvent se disperser parfois très loin de la zone d'accident de manière que les rayonnements atteignent l'organisme dans l'environnement.

4.3 Principaux types de radiations ionisantes :

- **On appelle Radiation** : Energie émise et propagée sous forme d'ondes à travers un milieu ou dans le vide.
- **Ionisant**: capable d'ioniser la matière (capable d'arracher un électron à un atome ou un groupe d'atomes).

Les rayonnements ionisants sont particulièrement dangereux car ils produisent l'ionisation de la matière qu'ils traversent; ils regroupent :

- les rayonnements cosmiques flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie circulant dans le vide d'origine solaire, galactiques ou extragalactiques. Ils sont caractérisé par une grande intensité énergétique et capable de traverser plusieurs couches de roches : exemple les protons ;
- Les ondes électromagnétiques: La lumière visible est un rayonnement électromagnétique, mais ne constitue qu'une petite tranche du large spectre électromagnétique.les plus énergétiques dans ce groupe sont :

4.3.1.1 Les rayons X :

Les rayons X sont produits par des transitions électroniques et sont pénétrants (Imagerie médicale).

4.3.1.2 Les rayons α :

Ce sont des rayons peu pénétrants et qui peuvent traverser plusieurs cm : La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire où le noyau père se scinde en deux noyaux fils dont l'un est un noyau d'hélium.

4.3.1.3 Les neutrons :

Ce sont des particules classées avec les rayonnements ionisants car ils peuvent produire des rayons ionisants.

4.4 Unités radiobiologiques

4.4.1 le Curie (C) :

Est la plus ancienne unité de rayonnement/ il correspond à la désintégration de $3,7 \times 10^{10}$ atomes par seconde.

Les propriétés de tous ces rayonnements dépendent en particulier de la nature des particules et de l'énergie influençant leur pouvoir de pénétration. Par exemple les rayons X et γ peuvent être diffusés a travers plusieurs centaines de mètres dans l'air.

4.4.2 le Rad :

Constitue l'unité fondamentale de la radiobiologie. Elle se définit comme la dose de rayonnement correspondant à l'absorption par l'organisme d'une énergie de 100 ergs (unité de mesure de l'énergie) par gramme de tissu.

4.5 Effets biologiques des radiations ionisantes

4.5.1 Modalités de contamination

- Irradiation externe, due aux rayonnements présents dans le milieu ambiant
- Irradiation interne consécutive à l'inhalation ou l'ingestion de radionucléides provoquant des effets biologiques.

Les cellules vivantes ne sont pas également sensibles aux radiations : les procaryotes sont beaucoup plus résistants que les eucaryotes qui sont des cellules à fort index mitotique présentant une plus grande sensibilité aux radiations.

4.5.2 Radiosensibilités des êtres vivants

En dehors de leurs effets létales et stérilisants, les rayonnements ionisants sont potentiellement dangereux pour l'homme car ils s'éliminent très lentement de l'organisme. Ainsi, on définit la période biologique correspondant au temps nécessaire pour que la moitié d'une substance radioactive soit éliminée naturellement de l'organisme. De ce fait, il se produit pour les substances radioactives un phénomène de bioamplification dans les organismes animaux terrestres et aquatiques nécessitant une surveillance permanente des poissons consommés par l'homme à proximité des installations nucléaires.

La DL_{50} : la radiosensibilité des espèces vivantes est d'autant plus forte que leur degré d'évolution et la complexité de leur organisme est plus grande. La DL_{50} consécutive à une seule irradiation est de l'ordre de million de rads chez les bactéries. Cependant, la DL_{50} de l'homme est de l'ordre de 500 rads.

5 Chapitre V. TOXINES DE MICROORGANISMES: MODES D' ACTIONS ET BIOTECHNOLOGIES

Une toxine est définie comme une "substance toxique synthétisée par un organisme vivant" (bactérie, champignon vénéneux, insecte ou serpent venimeux), auquel elle confère son pouvoir pathogène".

5.1 Les toxines produites par des bactéries

Sont appelées bactériotoxines, celles par les champignons sont dénommées mycotoxines, celles produites par les plantes sont appelées phytotoxines, celles produites par les algues sont appelées phycotoxines, celles par les animaux sont dénommées toxines animales.

5.2 Les toxines de micro-algues marines

Parmi les quelque 5 000 espèces d'algues unicellulaires qui constituent le premier maillon de la chaîne alimentaire, quelques dizaines, soit environ 6 % de la flore phytoplanctoniques, sont capables de produire des toxines, libérées dans le milieu (exotoxines) ou piégées dans la cellule (endotoxines).

Les exotoxines exercent des effets délétères directs sur la flore ou la faune : certaines d'entre elles endommagent la membrane cellulaire, d'autres ont des effets inhibiteurs sur des populations phytoplanctoniques susceptibles de rentrer en compétition. En termes de nuisance, les exotoxines sont surtout une menace importante pour l'aquaculture et bien que certaines soient aussi gênantes pour l'homme.

5.3 Nature chimique et conséquences

- Les exotoxines sont de nature protéique, ceci a plusieurs conséquences sur leur fonctionnement ;
- Elles sont codées par des gènes et donc transmissibles si les gènes sont portés par des plasmides ou des phages ;
- Elles sont thermosensibles: elles sont facilement dénaturées par la chaleur et perdent ainsi leur activité toxique ;
- Elles sont très immunogènes: leur présence dans l'organisme provoque la synthèse d'anticorps antitoxines, capables de bloquer leur activité toxique ;

Ces propriétés sont exploitées en vaccination: il est possible de produire des toxines inactives (= anatoxines) par traitement thermique (40°C, pendant 2 semaines) ou chimique.

5.4 Niveau de toxicité

Elles ont une activité toxique bien supérieure à tous les poisons chimiques et végétaux connus. Exemple :

- Arsenic : valeur de l'indice de toxicité = 0,03
- T diphtérique = 2 000
- T tétanique / botulinique = 700 000

Pour évaluer l'activité d'une toxine, on définit 2 paramètres:

- la DMM (Dose Minimale Mortelle) = la plus petite quantité entraînant la mort d'un cobaye.
- la DL₅₀ (Dose Létale 50%) = dose pour laquelle 50 % du lot de cobayes est tué.

Les endotoxines s'accumulent dans la chaîne alimentaire et parviennent jusqu'à l'homme via les produits marins consommés. Elles constituent un risque potentiel pour la santé humaine et un fléau pour l'économie conchylicole.

5.5 Nature chimique et conséquences

Les endotoxines sont de nature lipidique. Ceci leur confère des propriétés caractéristiques des lipides:

- Elles sont peu sensibles à la chaleur. On ne peut donc pas les inactiver par chauffage ;
- Elles sont peu immunogènes : Il n'y a quasiment pas d'anticorps produits contre les endotoxines. On ne peut donc pas concevoir de vaccins contre elles ;

5.6 Mécanismes d'action - Niveau de toxicité

Les endotoxines provoquent un choc toxique, (ou choc endotoxinique ou choc septique) responsable de la mort du patient dans 50% des cas. Les principaux symptômes observés sont:

- Une forte fièvre. Les endotoxines sont très pyrétiques ;

Chapitre V

- Des atteintes vasculaires, avec vasodilatation et augmentation de la perméabilité des vaisseaux, d'où la formation d'œdèmes et une chute générale de la pression artérielle ;
- des atteintes de l'hémostase : la dégranulation des plaquettes est activée de façon anarchique dans les vaisseaux, provoquant une « coagulation intravasculaire disséminée ».

Tous ces symptômes sont la conséquence de l'hyperactivation des macrophages : une fois libérée dans le sang, l'endotoxine se lie à une protéine appelée LBP (pour Lipopolysaccharide Binding Protéine) et ce complexe se fixerait sur une molécule réceptrice située à la surface des macrophages (CD14). Ceci aurait pour conséquence la libération de nombreux médiateurs de l'inflammation.

Elles ont une activité toxique qui ne s'exprime qu'à forte dose : il faut une libération massive d'endotoxines pour observer un choc toxique. A faible dose, elles ont globalement un effet bénéfique.

5.7 Comparaison endotoxine et exotoxine

Les deux types de toxine apparaissent très différents. Sur le plan physiologique, l'effet toxique de l'endotoxine nécessite une multiplication importante de la bactérie, alors que l'exotoxine, active à très faible dose, agit même si cette multiplication n'a pas eu lieu.

Tableau II. Endo et exotoxines

	Endotoxine	Exotoxine
Bactéries responsables	Uniquement Gram négatif	Gram positif et négatif
Localisation	Membrane externe de la bactérie	Extracellulaire (plutôt Gram positif) Intracellulaire (plutôt Gram négatif)
Nature biochimique	Lipidique et polysaccharidique	Peptidique ou protéique
Dose pour être active	Forte	Faible
Effets toxiques	Non spécifiques, choc toxique	Spécifiques, très variés selon les germes
Propriétés immunologiques	Faiblement immunogène, réaction non spécifique et spécifique	Fortement immunogène, réaction spécifique
Utilisation comme vaccin	Très peu	Depuis longtemps nombreuses applications
Traitement par sérothérapie	Non, peut-être dans l'avenir	Oui
Multiplication cellulaire nécessaire	Oui	Non
Instabilité (thermique, sensibilité aux solvants...)	Non	Oui

5.8 Les phycotoxines et le milieu

La prolifération des algues toxiques est un phénomène naturel qui a lieu sous pratiquement toutes les latitudes et qui n'a jamais pu être relié à une augmentation des apports terrigènes dans les zones littorales. Généralement, les effets néfastes des toxines algales succèdent à une augmentation du nombre des cellules des espèces incriminées. Cette augmentation peut être modeste, avec quelques milliers de cellules par litre, ou spectaculaire quand elle atteint plusieurs millions de cellules par litre ; on parle alors d'eau colorée ou de « bloom ».

Dans la plupart des épisodes toxiques, ce sont les dinoflagellés qui sont impliqués. Il s'agit de la classe du phytoplancton qui compte le plus d'espèces susceptibles de faire des blooms, mais quelques espèces de diatomées (famille des bacillariacées) sont aussi responsables d'un type d'intoxication par voie alimentaire. Les coquillages filtrants représentent la voie de transfert la plus diversifiée en termes de fréquence et de nature du risque d'intoxication. Ils ne sont pratiquement pas affectés par les différentes toxines connues qu'ils concentrent à des niveaux plus ou moins élevés suivant l'espèce de coquillage et les conditions environnementales (le site géographique, la densité de cellules toxiques, la présence simultanée d'autres espèces phytoplanctoniques non toxiques).

5.9 Quelques propriétés générales

Les substances actives d'origine algale, appelées encore phycotoxines, sont considérées comme des métabolites secondaires car elles ne semblent pas nécessaires à la vie des organismes. Le rôle écologique des phycotoxines de dinoflagellés est mal compris. Leurs propriétés antibactérienne et antifongique sont supposées leur permettre d'inhiber la croissance de ces micro-organismes. Les endotoxines peuvent jouer un rôle dissuasif dans la prédation des espèces productrices mais plusieurs études ont été conduites sur le micro- et macrozooplancton et beaucoup ne sont pas concluantes. Leur propriété allélopathique, c'est-à-dire leur capacité à inhiber la croissance des espèces compétitrices, est très discutée.

5.9.1 La toxinogénèse

C'est-à-dire la production de phycotoxines au cours du cycle cellulaire, et les variations entre différents organismes du même groupe, est assez mal connue mais les études montrent qu'elle est influencée par des facteurs génétiques et environnementaux. En général, à une espèce d'algue correspond une famille de molécules dont la quantité relative est assez stable.

On aurait tendance à considérer cette observation comme une caractéristique de l'espèce mais on observe des exceptions aussi bien dans la quantité que dans la diversité structurale des substances produites. En effet, à l'intérieur d'une même espèce ou d'un même genre, définis par des critères morphologiques décrits par les techniques de microscopie optique et électronique, il peut exister des populations ou des espèces toxiques et d'autres non toxiques.

L'espèce *Alexandrium tamarense*, bien connue pour produire des toxines paralysantes, présente des souches non toxiques ; les genres *Dinophysis* et *Pseudo-nitzschia sp*, respectivement producteurs de toxines diarrhéiques et amnésiantes, comprennent aussi des espèces toxiques et d'autres non.

Suivant leur cible moléculaire, quand elle est connue, on peut distinguer deux classes de phycotoxines :

- Celles qui agissent sur des récepteurs spécifiques et induisent des symptômes caractéristiques. Elles englobent les toxines neurologiques hydrosolubles ;
- celles qui ont une activité plus large provoquant des **syndromes polymorphes**, surtout de type gastrointestinal, mais parfois aussi des effets neurologiques. Leur structure chimique se définit comme des polyéthers, pour la plupart lipophiles ;

5.10 Le rôle des activités humaines

Ces dernières décennies, les épisodes toxiques ont augmenté en fréquence, intensité et extension géographique. Cette augmentation n'est peut être qu'apparente en raison d'une surveillance plus étendue et plus efficace et d'une attention particulière des scientifiques sur les algues toxiques. Toutefois, une augmentation réelle peut être soutenue par des hypothèses impliquant directement ou indirectement des activités humaines. Une stimulation des efflorescences toxiques peut résulter d'une extension de l'aquaculture ou de la croissance des apports anthropiques dans les zones littorales, du changement climatique ou de la contamination de nouvelles zones par le transfert des coquillages ou le largage d'eaux de ballast des navires marchands, deux voies possibles d'introduction de kystes ou de cellules d'espèces toxiques. Parallèlement à l'augmentation des efflorescences toxiques, le nombre de nouvelles molécules actives d'origine phytoplanctoniques n'a cessé d'augmenter grâce aux travaux des chimistes des produits naturels.

À la suite de ces découvertes, il est devenu nécessaire de mettre en place les études requises pour connaître leur mode d'action et la biologie des organismes producteurs ou d'identifier l'agent en cause. Dans ce domaine, les avancées sont plus lentes. D'une part, les études toxicologiques sont notablement gênées dans leur progression par la quantité insuffisante de substance purifiée disponible pour réaliser des essais ; d'autre part, la culture en laboratoire des organismes producteurs n'est pas toujours maîtrisée et le maintien de leur toxicité n'y est pas assuré. Pourtant, la connaissance des effets des phycotoxines et la détection des espèces productrices demeurent des éléments indispensables pour évaluer le risque pour la santé humaine et pour les écosystèmes et fournir de bons outils aux réseaux de surveillance.

5.11 Les toxines de champignons

Imaginons la vie sans champignons : plus de pain ni de vin, ni de fromage parfumé ! Mais disparaîtraient aussi les moisissures, contaminants majeurs de la chaîne alimentaire. Elles s'attaquent en effet à de nombreux substrats (céréales, fruits, jus...) en y déposant des toxines de natures chimiques diverses. Le monde fongique est très inventif et aussi bien les micromycètes (champignons ne donnant que des filaments) que les macromycètes (champignons que l'on cueille en automne) inventent des modèles moléculaires qui les distinguent des organismes végétaux et animaux.

Dans les années 1930, les premières recherches de métabolites secondaires de micromycètes, initiées entre autres par la découverte de la pénicilline par Fleming, ont donné lieu depuis à un nombre considérable d'études mycochimiques. D'abord orientées dans un objectif de découvrir des substances antibiotiques ou jouant un rôle dans le parasitisme de végétaux supérieurs (contrôle biologique), le panel d'activités biologiques recherchées s'est considérablement élargi. Des milliers de molécules ont été isolées et identifiées. Des études ont montré que leur biosynthèse était étroitement liée aux conditions environnementales impliquant un panel enzymatique très développé. L'exemple d'*Aspergillus fumigatus* est particulièrement frappant : à partir de ses cultures sur différents milieux, plus d'une centaine de métabolites secondaires originaux ont été décrits, allant de simples quinones jusqu'à des toxines protéiques en passant par des stéroïdes, des alcaloïdes et des polypeptides cycliques.

Toutefois, du fait soit de leur faible toxicité systémique, soit de l'absence d'investigations quant à leur toxicité aiguë chez l'homme ou l'animal, toutes ces molécules n'ont pas été considérées comme étant des toxines.

5.11.1 Moisissures et mycotoxines

Actuellement, le terme de mycotoxines décrit des métabolites secondaires de faible poids moléculaire, toxiques pour les vertébrés et produits par des micromycètes filamenteux, excluant donc les toxines des macromycètes. Selon cette définition, on recense aujourd'hui entre 300 et 400 mycotoxines dont seule une douzaine de groupes posent régulièrement des problèmes dans des intoxications humaines ou animales. Elles sont produites par des moisissures appartenant principalement à trois genres : *Aspergillus*, *Penicillium* et *Fusarium*. Les principales mycotoxines sont des molécules très oxygénées et peu azotées, possédant souvent une fonction ester ou lactone.

Les biotechnologies sont des technologies mettant en œuvre des organismes vivants ou leurs composants (essentiellement des enzymes) afin de produire ou de dégrader des molécules, de développer des connaissances scientifiques ou des services. Les organismes vivants, qui peuvent être des animaux, des plantes ou des micro-organismes, sont employés pour leurs propriétés naturelles ou sont génétiquement modifiés. Ils sont exploités dans de nombreux secteurs. On distingue :

- Les biotechnologies dites rouges, utilisées dans le secteur de la santé : développement d'outils de diagnostic, mise au point de thérapies géniques ;
- Les biotechnologies dites blanches, appliquées au secteur industriel : synthèse biologique de molécules ou d'actifs cosmétiques, dégradation des déchets ménagers ;
- Les biotechnologies dites vertes, exploitées dans le secteur agricole et agroalimentaire : dégradation des lisiers et autres déchets agricoles, production de denrées alimentaires ;
- Les biotechnologies dites ocre, employées dans le secteur de l'environnement : dépollution des sols et des eaux ;
- Les risques professionnels associés à ces nouvelles technologies sont semblables à ceux que l'on retrouve habituellement dans les différents secteurs d'activité concernés. Il s'agit notamment de risques biologiques, chimiques, mécaniques, électriques, d'incendie-explosion... S'ajoutent à cela des risques spécifiques aux biotechnologies tels que la conception d'organismes génétiquement modifiés (OGM) et l'usage de bioréacteurs nécessaires à la multiplication des micro-organismes ;

6 Chapitre VI. REPONSES DES ORGANISMES ET DES POPULATIONS AUX TOXIQUES

6.1 Comment est-on exposé à un toxique ?

L'exposition d'un organisme à une molécule toxique induit une réponse biologique appelée : toxicité. Cette molécule toxique peut agir au point de contact (effet local) avec la surface exposée, à exemple des acides et des produits caustiques qui causent des brûlures chimiques graves, ou pénétrer dans l'organisme (effet systémique), la molécule doit pénétrer dans l'organisme pour entraîner des effets toxiques à travers les principales voies d'absorption dont la voie respiratoire, la voie cutanée et la voie digestive.

6.2 Les différentes voies de pénétration d'un toxique

6.2.1 La voie respiratoire (inhalation)

C'est la voie de pénétration la plus fréquente en milieu professionnel. Les polluants en suspension dans l'air, sous forme de fumées, vapeurs, aérosols, poussières, pénètrent facilement dans les poumons en même temps que l'air inspiré.

De nombreux facteurs sont à considérer dans l'absorption d'un produit par les poumons. Pour les gaz et les vapeurs, il s'agira de :

La concentration

La durée d'exposition

La solubilité dans l'eau et les tissus

La réactivité

Le débit sanguin

Concernant les particules (ex. : poussières, fibres, fumées, brouillards, brume, pollen, spores), les caractéristiques physiques (le diamètre, la forme, etc.) et l'anatomie de l'arbre respiratoire sont à prendre en considération.

6.2.2 La voie cutanée (peau)

La peau est une barrière imperméable qui recouvre toute la surface du corps et qui le protège. Cette enveloppe protectrice fait obstacle à la pénétration de nombreux contaminants. Toutefois, cette barrière n'offre pas une protection complète, car elle présente des failles, dont la base des poils et les pores. C'est un passage important, puisque plusieurs toxiques peuvent pénétrer dans l'organisme en traversant la peau à la suite d'un contact avec un liquide, un solide ou des vapeurs (ex. : certains solvants employés pour nettoyer des pièces mécaniques ou encore des diluants ou des décapants utilisés sans protection). L'absorption cutanée est influencée par de nombreux facteurs tant physico-chimiques (ex. : pureté, taille de la molécule, solubilité) qu'individuels (ex. : hydratation de la peau, présence de lésions cutanées) et anatomiques (ex. : endroit du corps mis en contact avec le toxique).

6.2.3 La voie orale (ingestion)

En milieu professionnel, l'ingestion n'est généralement pas considérée comme une voie d'exposition importante. Il ne faut cependant pas la négliger, car des méthodes de travail inadéquates peuvent conduire à une ingestion accidentelle. De plus, de mauvaises habitudes peuvent également être à l'origine d'une exposition par ingestion, notamment manger, boire ou fumer dans des lieux de travail contaminés.

6.3 Quel est le cheminement d'un toxique dans l'organisme ?

Un produit qui pénètre dans l'organisme peut avoir des effets bénéfiques (médicaments) ou néfastes (toxiques). Inversement, l'organisme peut agir sur ce produit : c'est ce qu'on appelle le métabolisme. La réponse de l'organisme vis-à-vis d'un toxique dépend, entre autres, de sa concentration dans un tissu ou un organe. Plusieurs facteurs interviennent dans les processus d'action toxique, notamment les phases toxicodynamiques et toxicocinétiques.

- La toxicodynamie s'intéresse aux effets d'un toxique sur l'organisme et aux facteurs qui interviennent dans la réponse toxique.
- La toxicocinétique s'intéresse à l'influence de l'organisme sur un toxique. Cette influence découle d'un ensemble de processus (l'absorption, la distribution, le métabolisme ou biotransformation et l'élimination) qui gouvernent le cheminement du toxique dans l'organisme. (Figure 4)

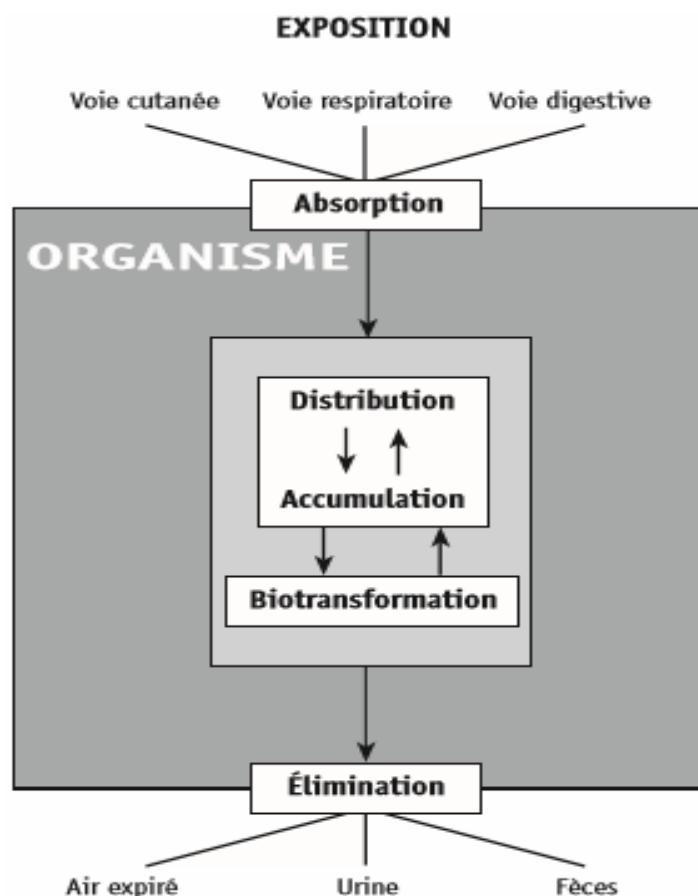


Figure 4. Cheminement d'une molécule dans l'organisme

6.3.1 L'absorption

On appelle absorption le processus de pénétration d'un produit dans l'organisme. Il s'agit d'une étape importante, car, tant qu'il n'a pas pénétré dans la circulation sanguine, un produit ne peut causer d'action toxique systémique, c'est-à-dire à des endroits éloignés du point de contact initial. Divers facteurs peuvent influencer le processus d'absorption d'un produit : sa nature, sa solubilité, la perméabilité des tissus biologiques au point de contact, la durée et la fréquence de l'exposition, etc.

6.3.2 Le transport et la distribution

Après avoir atteint la circulation sanguine, le produit peut être transporté dans tout l'organisme. C'est ce qu'on appelle la distribution.

Les polluants peuvent alors entrer en contact avec des cellules et se fixer dans certains tissus. Ainsi, les pesticides organochlorés comme le DDT se concentrent dans les tissus adipeux. Ils peuvent y rester emmagasinés sans causer d'effets toxiques pendant une période plus ou moins longue. En revanche, ils peuvent causer des effets toxiques dans d'autres tissus ou organes où ils sont présents en quantités moindres.

La nature, l'intensité et la localisation de ces perturbations dans l'organisme diffèrent d'un produit à l'autre et dépendent souvent de la dose.

6.3.3 La biotransformation (ou le métabolisme)

Pendant ou après son transport dans le sang, le toxique peut entrer en contact avec différentes cellules de l'organisme qui ont la capacité de le transformer. L'ensemble des réactions de la transformation métabolique est appelée biotransformation, tandis que les produits de la biotransformation sont appelés métabolites. Il peut en résulter un produit moins toxique (détoxification) ou plus toxique (activation), l'accumulation ou l'élimination du produit et de ses métabolites.

La transformation des toxiques est surtout effectuée par le foie, véritable laboratoire chimique de l'organisme, qui contient une multitude d'enzymes (substance protéique qui catalyse une réaction chimique dans l'organisme). Il enrichit le sang d'éléments nutritifs et le purifie en concentrant et en éliminant beaucoup de substances. D'autres organes tels que les poumons et les reins peuvent aussi transformer des toxiques.

6.3.4 L'excrétion

Ce processus consiste à rejeter le produit inchangé ou ses métabolites à l'extérieur de l'organisme. L'excrétion peut se faire par voie rénale (l'urine), gastro-intestinale (les selles), pulmonaire (l'air expiré), cutanée (la sueur) ou lactée (le lait). Par exemple, le sang transporte de nombreux produits vers les reins, dont plusieurs déchets provenant du métabolisme. Les reins filtrent le sang, remplissant ainsi une fonction essentielle au maintien de l'équilibre des éléments sanguins, et assurent l'élimination de nombreux produits.

6.3.5 L'atteinte toxique : La Toxicité

Les organismes fonctionnent dans des conditions relativement constantes (pH, oxygène, température,...). C'est ce que l'on appelle l'homéostasie ou la constance du milieu intérieur. Les organismes vivants cherchent à maintenir cet équilibre afin de conserver un degré optimal de fonctionnement. Le corps humain est un ensemble de systèmes finement rodés qui peut s'adapter à de nombreuses situations d'agression, tant biologiques que physiques ou chimiques. Les processus d'adaptation de l'organisme fonctionnent continuellement pour veiller à maintenir cet équilibre. Quand cet équilibre est perturbé, cela entraîne un dysfonctionnement, c'est l'effet toxique. Il y a alors mobilisation d'une partie et parfois de tout l'organisme ; des réactions diverses sont déclenchées pour répondre à l'agression et rétablir l'équilibre rompu. L'organisme peut résister à une agression toxique tant qu'elle s'effectue à l'intérieur des limites de ses mécanismes de détoxification, d'homéostasie et de réparation. Au-delà, les mécanismes de compensation ne peuvent suffire à la tâche. Le système de défense ne peut alors contrer les effets toxiques et des manifestations, réversibles ou non, peuvent s'ensuivre.

Les toxiques ne produisent pas d'effets de même intensité sur tous les organes (ex. : le rein) ou les tissus (ex. : le sang). Ils s'attaquent à des organes en particulier, les organes cibles, pour plusieurs raisons, dont une sensibilité plus grande de ces organes, une concentration plus élevée du toxique et/ou de ses métabolites, etc. A l'exemple du foie qui est un organe cible car siège principal de la métabolisation/biotransformation.

-Notion de réversibilité et l'irréversibilité

Certains effets toxiques sont réversibles (ils disparaissent plus ou moins rapidement après l'arrêt de l'exposition) tandis que d'autres sont irréversibles (ils persistent ou s'aggravent après l'arrêt de l'exposition). Des changements adaptatifs causés par un toxique chimique dans un tissu ou un organe peuvent être accompagnés de changements fonctionnels et morphologiques. De tels changements peuvent être réversibles si on prévient ou arrête l'exposition. Cependant, dans certains cas, l'interruption de l'exposition n'est pas suivie d'une récupération. Il s'agit alors de changements irréversibles.

6.4 La réversibilité et l'irréversibilité

Certains effets toxiques sont réversibles (ils disparaissent plus ou moins rapidement après l'arrêt de l'exposition) tandis que d'autres sont irréversibles (ils persistent ou s'aggravent après l'arrêt de l'exposition). Des changements adaptatifs causés par un toxique chimique dans un tissu ou un organe peuvent être accompagnés de changements fonctionnels et morphologiques. De tels changements peuvent être réversibles si on prévient ou arrête l'exposition. Cependant, dans certains cas, l'interruption de l'exposition n'est pas suivie d'une récupération. Il s'agit alors de changements irréversibles (figure 8). Ainsi, pour un tissu tel que celui du foie, qui a une importante capacité de régénération, la majorité des atteintes sont réversibles ; au contraire, elles sont généralement irréversibles lorsqu'il s'agit d'une atteinte du système nerveux central, les neurones ne pouvant pas être facilement remplacés. Des effets tels que la cancérogénicité et la tératogénicité sont généralement considérés comme des effets irréversibles.

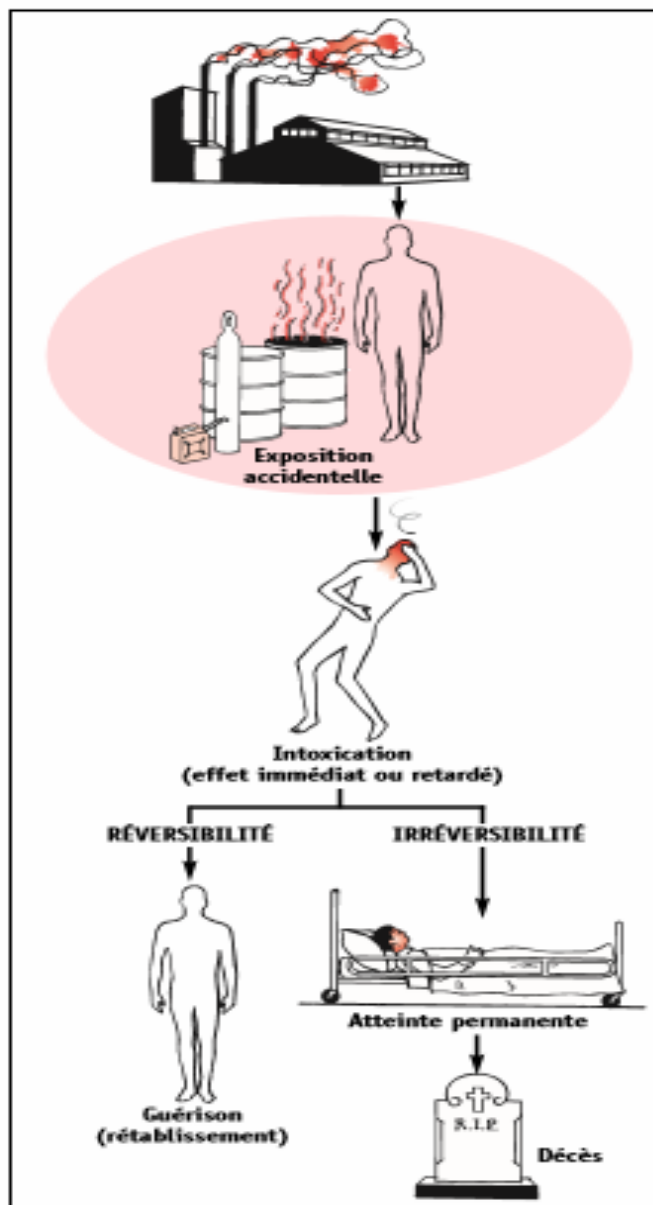


Figure 5. Réversibilité et l'irréversibilité d'une atteinte résultant d'une intoxication

6.5 La classification des effets toxiques

Les effets toxiques peuvent être classés de différentes façons, selon, par exemple :

- la durée : aiguë, chronique;
- le type d'action : locale, systémique;
- le mécanisme d'action : stimulant, inhibiteur;
- la voie de pénétration : respiratoire, cutanée, digestive;
- le tissu ou l'organe affecté : sang (hématotoxique), foie (hépatotoxique), rein (néphrotoxique), le système nerveux (neurotoxique);
- la nature de l'effet : irritant, sensibilisant, asphyxiant, cancérigène;
- l'utilisation : pesticides, produit d'hygiène corporelle, solvants....
- l'étiquetage : matière corrosive;

- la famille chimique : hydrocarbures aromatiques, alcools. La classification des toxiques est donc abordée de plusieurs points de vue. Elle dépend souvent du domaine d'application, de l'objectif poursuivi par un organisme ou même du champ d'activité d'un individu ;

6.6 Les facteurs pouvant influencer les effets toxiques

Plusieurs facteurs contribuent à expliquer la nature et l'intensité des effets toxiques.

6.6.1 Facteurs génétiques :

Le polymorphisme génétique peut intervenir dans la capacité des individus à transformer des toxiques, on donne un exemple dans lesquels le polymorphisme enzymatique a une influence direct sur la biotransformation des xenobiotiques. On connaît un phénotype "acétylateur lent" que l'on rencontre chez 60% des caucasiens et des africains, mais seulement chez 10 à 20% des Asiatique.

6.6.2 Facteurs physiopathologiques :

- L'âge : la sensibilité aux effets toxiques est habituellement plus grande chez les enfants et les personnes âgées ;
- Le sexe : Il existe des différences entre les hommes et les femmes, notamment en ce qui concerne le métabolisme des toxiques.
- L'état nutritionnel : La toxicité peut être influencée par la masse de tissus adipeux, la déshydratation... etc
- L'état de santé : Les individus en bonne santé sont plus résistants, car ils métabolisent et éliminent les toxiques plus facilement que ceux qui souffrent de maladies hépatiques ou rénales par exemple.
- La grossesse : Il se produit des modifications de l'activité métabolique des toxiques au cours de la grossesse.

6.6.3 Facteurs environnementaux

- La lumière ;
- La température ;
- La pollution : exposition à des mélanges de produits chimiques ;

Il existe différents termes pour décrire les interactions toxicologiques : addition, synergie, potentialisation ou antagonisme :

- **Addition (additivité)** : la réponse est égale à la somme des réponses des substances prises individuellement, il n'y a pas d'interaction.
- **Synergie** : la réponse est supérieure à la somme des réponses des substances prises individuellement.
- **Potentialisation** : désigne des situations où un agent (produit chimique, lumière, rayonnement UV, X, radioactivité, etc.) va augmenter le caractère actif, efficace, allergène ou toxique d'un produit.

- **Antagonisme:** un antagoniste est un type de ligand qui bloque une réaction biologique. Il produit des effets opposés à celui de l'agoniste.

7 Chapitre VII. METHODES D'ÉVALUATION DE LA POLLUTION AQUATIQUE FONDEES SUR LE PHYTOPLANCTON TOXIQUE.

7.1 Définition

Le phytoplancton (du grec *phuton*, plante, végétal et *plagktos*, errant) correspond aux organismes photosynthétiques, de taille microscopique, vivant en suspension dans l'eau et soumis aux mouvements des masses d'eau. Ces microalgues peuvent, grâce aux radiations photosynthétiquement actives (PAR) du rayonnement lumineux, métaboliser le dioxyde de carbone atmosphérique pour fabriquer de la matière organique. C'est ainsi qu'au niveau aquatique et donc océanique, le phytoplancton est le principal producteur primaire, source de matière organique, qui soutient le développement des maillons du réseau trophique océanique.

On distingue trois classes de taille en écologie phytoplanctoniques (Sieburth et al., 1978) :

- le microphytoplancton : 20-200 μm ;
- le nanophytoplancton : 2-20 μm ;
- le picophytoplancton : 0.2-2 μm ;

Au niveau marin, on estime qu'il existe environ 4000 espèces de phytoplancton (Sournia et al., 1991), réparties dans environ 490 genres.

7.2 Principales classes algales

Les communautés phytoplanctoniques sont constituées d'assemblages d'espèces aux caractéristiques biologiques (taille, forme...) et physiologiques (nutrition, croissance...) variées et forment un ensemble hétérogène. Les cellules sont majoritairement autotrophes, mais certaines espèces peuvent être temporairement hétérotrophes, chez les dinoflagellés notamment. Les deux classes de phytoplancton marin les plus représentées sont les diatomées, les cyanobactéries, et les dinoflagellés.

7.2.1 Diatomées (Bacillariophycées)

Les diatomées représentent le groupe le mieux connu parmi les microalgues. Elles font partie des fractions nano- et microphytoplanctoniques et sont constituées d'un frustule siliceux avec deux valves, l'hypothèque et l'épithèque. Selon la symétrie du frustule, on distingue deux ordres de diatomées : les diatomées Centrales et les Pennales. Les diatomées peuvent se présenter sous la forme de cellules individualisées, mais elles peuvent aussi former des chaînes.

Les diatomées sont représentées dans tous les océans du globe. Dans les zones tempérées, ce sont généralement les premières à apparaître au printemps, lorsque les conditions de lumière et de température ne sont plus limitantes pour leur développement. Elles profitent

ainsi de conditions nutritives idéales, les apports continentaux ayant enrichi les zones côtières durant l'hiver.



Figure 6. Diatomées (Bacillariophycées)

7.2.2 Dinoflagellés (Dinophycées)

Les dinoflagellés sont des algues unicellulaires flagellées qui peuvent être autotrophes ou hétérotrophes. Ces organismes se trouvent en majorité dans les fractions nano- et microphytoplanctoniques et sont équipés de deux flagelles. Certaines espèces sont pourvues d'une thèque cellulosique, d'autres sont nues. La plupart sont retrouvées sous forme de cellules individualisées, mais certaines peuvent aussi former des chaînes.

Les dinoflagellés se rencontrent dans tous les océans du globe, et peuvent être responsables d'efflorescences toxiques (ex : marées rouges) préjudiciables aux activités de pêche et d'aquaculture notamment. On les retrouve dans 75% des efflorescences toxiques. Dans les zones tempérées, le développement des dinoflagellés suit celui des diatomées, lorsque l'acide silicique nécessaire à ces dernières pour la constitution de leur frustule devient limitant.



Figure 7. Dinoflagellés (Dinophycées)

7.2.3 Prymnésiophycées

Les Prymnésiophycées sont des flagellés unicellulaires appartenant à la fraction nanophytoplanctonique. On les retrouve dans toutes les eaux du globe, même s'ils sont plus abondants dans les océans tropicaux et subtropicaux. Les plus connus sont les coccolithophoridés équipés de plaques calcaires et qui constituent les sédiments de la Mer du Nord ainsi que les falaises blanches de la Manche. Certaines prymnésiofycées interviennent aussi dans des efflorescences toxiques. Dans les zones tempérées, leur développement peut faire suite à celui des diatomées, une fois que l'acide silicique est devenu limitant pour ces dernières.



Figure 8. Prymnésiophycées

7.2.4 Chrysophycées

Les chrysophycées sont des algues unicellulaires ou coloniales, le plus souvent flagellées. Il existe trois types de chrysophycées marines : les silicoflagellés (microphytoplancton), les pélagophycées (picophytoplancton) et les parmales (nanophytoplancton).

7.2.5 Raphidophycées

La classe des Raphidophycées est peu fournie, avec un ou deux genres marins. Les Raphidophycées font partie du microphytoplancton et ont deux flagelles. Les cellules sont nues, fragiles et déformables.

7.2.6 Cryptophycées

Les Cryptophycées sont largement représentées en milieu marin. Ce sont des cellules nanophytoplanctoniques, ovoïdes et asymétriques, possédant deux flagelles.

7.2.7 Chlorophycées

Les chlorophycées sont des algues vertes largement répandues, mais peu de représentants sont à la fois unicellulaires, planctoniques et marins. Les formes unicellulaires sont flagellées, mobiles et nues, et appartiennent en majorité à la fraction nanophytoplanctonique.

7.2.8 Prasinophycées

Les Prasinophycées constituent un ensemble hétérogène de flagellés verts primitifs, recouverts de petites écailles organiques. Elles sont unicellulaires ou en colonies. On les retrouve dans toutes les classes de taille.

7.2.9 Eugénophycées

Les Eugénophycées sont peu répandues en milieu marin. La plupart des espèces marines sont de grands flagellés fusiformes microphytoplanctoniques. Elles peuvent utiliser les composés organiques dissous pour leur croissance. Leur présence peut donc être une indication de pollution organique.

7.2.10 Eustigmatophycées

Les eustigmatophycées sont des microalgues généralement coccoïdes, appartenant au nanophytoplancton. Cette classe récente n'a qu'une seule famille connue en milieu marin.

7.2.11 Cyanobactéries

Les cyanobactéries sont des procaryotes de la fraction picophytoplanctonique. On en trouve dans tous les océans du globe. Ce sont les plus anciens organismes photosynthétiques, qui sont à l'origine de l'apparition du dioxygène sur notre planète. Les cyanobactéries peuvent être unicellulaires, filamenteuses ou coloniales. Le genre *Prochlorococcus* (constitue le groupe d'organismes photosynthétiques le plus abondant sur Terre.



Figure 9. Cyanobactéries

7.3 Phytoplancton et Ecotoxicologie

7.3.1 Tests monospécifiques

Les tests monospécifiques représentent l'approche la plus simple et la plus pratique à mettre en œuvre lorsqu'il s'agit d'étudier la toxicité d'une substance sur le phytoplancton. En effet, le principe consiste à cultiver une espèce dans des conditions physiques (lumière, température) et chimiques (pH, sels nutritifs, contaminant) prédéfinies et contrôlées. Qu'ils

soient normalisés ou non, ces tests offrent les avantages suivants : rapidité de réponse (24 à 96h), possibilité d'avoir de nombreux réplicats et de tester facilement la reproductibilité des résultats.

Les tests monospécifiques les plus simples consistent à tester une substance sur une seule espèce. Ces bioessais sont très utilisés dans le domaine des pesticides.

L'intérêt de ces tests faciles à réaliser est aussi de pouvoir tester plusieurs substances sur une même espèce, afin d'établir une « échelle » de toxicité pour l'espèce considérée.

La sensibilité des espèces aux polluants est également influencée par leur mode de conservation (repiquages réguliers ou congélation, conditions de lumière, température et nutriments).

Le but de l'écotoxicologie est d'évaluer l'impact d'un contaminant dans l'environnement naturel. Étant donné la complexité des phénomènes qui influencent l'expression d'une toxicité au niveau d'une population phytoplanctonique, la recherche s'est tournée vers des systèmes simplifiés à l'extrême : les tests monospécifiques en conditions contrôlées. Cependant, il apparaît évident que le seuil de toxicité démontré en laboratoire et en conditions parfaitement contrôlées, n'est pas forcément représentatif du seuil de toxicité qui peut intervenir en milieu naturel, au niveau de communautés.

7.3.2 Tests plurispécifiques

Afin de pallier aux inconvénients des tests monospécifiques, depuis 40 ans les écotoxicologues ont développé des approches plus complexes et plus intégratives. Les systèmes expérimentaux mis en place, de taille et complexité variables, ont pour objectif de fournir une description plus réaliste du devenir et des impacts des contaminants au niveau d'écosystèmes simplifiés ou miniaturisés. Ces micro- et mésocosmes offrent la possibilité de tester des xénobiotiques seuls ou en mélange, sur une ou plusieurs composantes des écosystèmes naturels qu'ils tendent à mimer. Les termes microcosmes et mésocosmes n'ont pas de définition précise, la distinction entre les deux peut être faite en fonction de leur taille et/ou de leur complexité. Caquet et al. (1996) proposent l'emploi du terme « mésocosme » pour les systèmes artificiels placés en conditions environnementales naturelles, et qui affichent une complexité et une stabilité suffisantes pour être viables et s'auto-entretenir.

8 Chapitre VIII. LA REGLEMENTATION RELATIVE AUX PESTICIDES ET AUX TOXINES: PROTECTION DES ECOSYSTEMES

8.1 Les pesticides tuent

Les pesticides (le suffixe «-icide» signifie tueur) sont des poisons destinés à tuer ou de contrôler les “ravageurs”. En plus de leur toxicité inhérente, de nombreux pesticides ont d’autres propriétés indésirables. Comme la grande majorité des pesticides sont des produits composés de synthèse, qui n’existent pas dans la nature, il n’existe souvent aucun organisme ayant évolué naturellement pour décomposer ces poisons en substances moins nocives.

En conséquence, de nombreux pesticides sont aussi persistants dans les organismes vivants et le corps humain, les sols et l’eau, et bioaccumulables dans la chaîne alimentaire et l’environnement. Ils sont l’un des rares groupes de produits chimiques délibérément propagé en milieu agricole et dans l’environnement. Ces pesticides sont transportés par air et par mer, et s’accumulent dans l’environnement, en particulier dans les climats froids, car ils se décomposent plus lentement lorsque la température est plus basse.

Leur persistance et leur capacité de s’accumuler dans les tissus adipeux (car souvent lipophiles), font que l’on retrouve des traces aussi bien chez les êtres humains que chez animaux sauvages, même dans des régions isolées de la planète (loin de leur point d’utilisation). Par exemple, on trouve des quantités de pesticides organochlorés persistants (tel que le DDT) supérieures aux limites de sécurité prescrites par l’OMS, dans le lait maternel des femmes inuites dans l’Arctique.

Il n’y a pas « d’utilisation sûre » des pesticides, il n’y a qu’une bonne gestion.

8.2 Réglementaires et techniques

- Il est recommandé d’adopter des politiques et dispositions légales nécessaires relatives à la réglementation des pesticides et à la commercialisation et utilisation de ces produits tout au long de leur cycle de vie et prendre des dispositions pour en assurer une coordination et une mise en œuvre effectives, notamment en créant des services appropriés de formation, de conseil, de vulgarisation et de santé en se fondant sur les directives de la FAO et de l’OMS et, s’il y a lieu, sur les dispositions pertinentes d’instruments juridiquement contraignants. À cet effet, les gouvernements doivent prendre pleinement en compte des facteurs tels que les besoins du pays, les conditions économiques et sociales, le niveau d’instruction, les conditions climatiques et la disponibilité à un prix abordable d’équipements appropriés pour l’application des pesticides et la protection des utilisateurs;
- Ainsi que le recommande le Partenariat international de coopération sur le travail des enfants et l’agriculture(b), adopter une législation visant à empêcher que les pesticides soient utilisés par les enfants ou qu’ils ne leur soient vendus. Les pays qui ont ratifié la Convention n° 182 de l’OIT sur les pires formes de travail des enfants

doivent inscrire les tâches comportant l'utilisation des pesticides sur la liste nationale des travaux dangereux pour les enfants;

- mettre en place des systèmes de réglementation applicables aux professionnels de la lutte contre les ravageurs prévoyant l'octroi de licences ou de permis;
- Mettre en place des systèmes et des structures d'homologation des pesticides permettant d'homologuer les produits pesticides avant qu'ils ne soient mis à la disposition des utilisateurs;
- Dans le cadre du processus d'homologation des pesticides, réaliser une évaluation des risques et baser toute décision relative à la gestion des risques sur la totalité des données et renseignements pertinents disponibles;
- Utiliser le processus décrit dans le Manuel sur l'élaboration et l'utilisation des spécifications de la FAO et de l'OMS relatives aux pesticides pour déterminer les équivalences pour les pesticides;
- Promouvoir les avantages d'un système harmonisé basé sur les exigences, les procédures et les critères d'évaluation en matière d'homologation des pesticides (par région ou groupe de pays) et coopérer avec d'autres gouvernements à cette fin; ce faisant, les gouvernements doivent tenir compte des directives et normes techniques appropriées convenues à l'échelon international et, si possible, intégrer ces normes dans la législation nationale ou régionale ;
- Instaurer une procédure de réévaluation et de renouvellement d'homologation afin d'assurer l'examen régulier des pesticides et l'adoption rapide de mesures efficaces au cas où de nouvelles informations ou données sur la performance ou les risques indiqueraient qu'une action réglementaire est nécessaire;
- améliorer la réglementation en matière de collecte et d'enregistrement des données sur l'importation, l'exportation, la fabrication, la préparation, la qualité et la quantité des pesticides;
- recueillir et enregistrer des données sur l'importation, l'exportation, la fabrication, la formulation, la qualité, la quantité et l'utilisation des pesticides pour déterminer l'étendue des effets possibles sur la santé humaine ou animale et sur l'environnement, et pour suivre les tendances qui se dégagent de l'utilisation des pesticides, à des fins économiques et autres;
- n'autoriser la vente de matériel de traitement par des pesticides ou d'équipement de protection individuel que s'ils sont conformes aux normes établies;
- détecter et empêcher le commerce illégal et la contrefaçon(c)de pesticides grâce au partage d'informations et à la coopération, tant au niveau national, entre administrations publiques, qu'au niveau intergouvernemental;
- établir une réglementation et procéder à un suivi sur les résidus de pesticides dans les aliments conformément notamment aux recommandations du Codex Alimentarius. En l'absence de normes du Codex, il conviendra de s'appuyer sur les normes nationales ou régionales en la matière. Il faut veiller, ce faisant, à respecter les exigences de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et à ne pas créer d'obstacles techniques au commerce.

L'industrie des pesticides doit:

- Fournir une évaluation objective de chaque produit avec les informations nécessaires à l'appui, y compris des données suffisantes pour aider à l'évaluation des risques et permettre la prise de décision en matière de gestion des risques;
- fournir aux autorités nationales chargées de la réglementation toute information nouvelle ou mise à jour qui pourrait modifier le statut réglementaire du pesticide dès qu'une telle information est disponible;
- veiller à ce que la matière active et les coformulants qui composent les produits pesticides commercialisés correspondent, en ce qui concerne leur identité, qualité, pureté et composition, aux constituants du pesticide homologué qui, après avoir été testés et analysés, ont été jugés acceptables d'un point de vue toxicologique et environnemental;
- veiller à ce que les produits pesticides de qualité technique et les préparations pesticides soient conformes aux normes nationales ou aux spécifications recommandées de la FAO applicables aux pesticides agricoles, ainsi qu'aux spécifications recommandées de l'OMS applicables aux pesticides utilisés dans le domaine de la santé publique, le cas échéant;
- vérifier la qualité et la pureté des pesticides mis en vente;
- en cas de problème avec un pesticide, prendre spontanément des mesures correctives et, lorsque les gouvernements le demandent, contribuer à y remédier;

8.3 Micro-organismes et toxines hautement pathogènes (MOT)

Les **MOT** sont utilisés dans le cadre de la santé publique, à des fins de :

- diagnostic,
- recherche et développement,
- enseignement.

Les agents pathogènes humains et les toxines présentent un risque réel pour la santé et la sécurité humaines, en raison d'un éventuel rejet, soit accidentel (notion de sécurité biologique), soit intentionnel (notion de sûreté biologique).

Le rejet accidentel peut résulter d'un confinement non adéquat et non sécuritaire d'un agent pathogène à cause d'un stockage, d'un usage, d'un transfert ou d'une élimination non maîtrisée. Un rejet intentionnel pourrait résulter du manque de mesures de sécurité appropriées.

Conclusion

L'écotoxicologie générale a pour spécificité la recherche de l'effet induit par des produits toxiques sur les différents êtres vivants dans le milieu aquatique ainsi que par ses méthodes d'étude qui tiennent compte des particularités biologiques de chaque écosystème.

En outre, qu'elle soit aquatique ou concernant un autre environnement, elle doit avoir comme objectif d'évaluer l'impact à long terme de faibles doses de contaminants sur les différents organismes et les populations vivant dans le milieu étudié, ainsi que de définir la manière par laquelle agissent les molécules exogènes et le seuil susceptible d'altérer le bon fonctionnement des écosystèmes.

Ceci nécessite bien évidemment la connaissance des mécanismes d'interaction des molécules les plus présentes.

Références bibliographiques

- Amiard, J; Amiard-Triquet, C. 2017. Biomarqueurs en écotoxicologie aquatique (2^{ème} édition). Tec et Doc - Lavoisier.
- Caquet, Thierry & Lagadic, Laurent & Jonot, Odile & Baturo, W & Kilanda, M & Simon, Pierre-Emmanuel & Bras, S & Echaubard, M & Ramade, F. (1996). Outdoor Experimental Ponds (Mesocosms) Designed for Long-Term Ecotoxicological Studies in Aquatic Environment. *Ecotoxicology and environmental safety*. 34. 125-33. 10.1006/eesa.1996.0053.
- Der, O.R. & Beyer, J. & Vermeulen, Nico P.E.. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: A review, *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 13. 57-149.
- Moriarty, C. (1983). Age determination and growth rate of eels, *Anguilla anguilla* (L.). *J. Fish Biol.* 23,257-264.
- Péry, A ; Garric, J.2017. Les effets écotoxicologiques : de la molécule à la population (Volume 1). ISTE editions.
- Ramade, F. 1992. Précis d'écotoxicologie. Masson.
- Ramade, F. 2007. Introduction à l'écotoxicologie. Tec et Doc - Lavoisier.
- Sieburth, John & Smetacek, Victor & Lenz, Jürgen. (1978). Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography - LIMNOL OCEANOGR.* 23. 1256-1263. 10.4319/lo.1978.23.6.1256.
- Sournia A., C., Belin, B., Berland Denn, Erard-Le,P., Gentien, Grzebyk, Daniel C., Marcaillou-Le, Patrick, Lassus , Partensky, Frédéric. (1991). Le phytoplancton nuisible des côtes de France. De la biologie à la prévention.
- Truhaut R. (1977). Ecotoxicology: objectives, principles and perspectives. *Ecotoxicol Environ Saf ; 1(2): 151-173.*
- Biney C., T. Amuzu A., Calamari D., Kaba N., IMbome. L., Naeve H., Ochumba O., Osibanjo O., Radeconde V., and et Saad M. A. H., "Etude des métaux lourds," *Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain, FAO, Vol. 25, pp. 1–6, 1994.*
- Drurat,C., 2011. Effets des pesticides de la vigne sur le cycle biologique de l'escargot dans divers contextes d'exposition. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté, 87-89.
- www.livingoceans.org
- www.observatoire-poissons-seine-normandie.fr