

## MODULE ECOTOXICOLOGIE GENERALE

### I. Généralités

#### I.1.Définitions

##### **a. Pollution :**

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

##### **b. Ecologie :**

C'est la science globale des relations des organismes avec leur monde extérieur environnant dans lequel sont incluses au sens large, toutes les conditions d'existence (HAECKEL, 1866).

##### **c. Ecotoxicologie :**

Selon RAMADE (1971), l'écotoxicologie est la science qui étudie les modalités de contamination de l'environnement par des agents polluants naturels ou artificiels produits par l'activité humaine ainsi que leur mécanisme d'action et de leurs effets sur l'ensemble des êtres vivants qui peuplent la biosphère. C'est la science qui étudie les interactions et les effets *in situ* de contaminants sur les êtres vivants (végétaux, animaux) à différents niveaux (organismes, populations, peuplements, communautés) et le devenir de ces substances dans les écosystèmes (RAMADE, 1977).

##### **d. Toxicologie :**

C'est la discipline qui étudie les substances toxiques (ou 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 (TRUHAUT, 1976).

## **I.2. Objectifs**

L'évaluation des effets de la pollution est l'objet de l'écotoxicologie qui étudie les **dommages occasionnés aux écosystèmes en général et aux biocénoses** en particulier, par les polluants physiques et/ou chimiques. En plus de l'étude de l'impact des polluants sur les écosystèmes, l'écotoxicologie examine les **relations entre les polluants et le milieu** (telles que les voies de transfert ou de cheminement des polluants dans les écosystèmes), la biodégradation et la bioaccumulation des polluants.

Elle utilise des techniques propres à la toxicologie qui étudie plus spécifiquement la toxicité en laboratoire d'une substance sur des organismes tests représentatifs de l'espèce humaine mais également des organismes tests en plein champ (tests d'écotoxicité).

L'écotoxicologie a deux objectifs principaux :

- a- Etudier les processus de contamination des milieux.
- b- Evaluer les effets des polluants à l'égard de la structure et du fonctionnement des systèmes naturels.

L'écotoxicologie implique une analyse à différents niveaux d'intégration de la molécule à la biocénose :

- La molécule,
- La cellule,
- L'organe,
- L'organisme,
- La population,
- La biocénose.

Ainsi que d'apprécier l'influence des facteurs biotiques, abiotiques et de contamination.

### **I.3. Niveaux d'étude des polluants**

L'action des polluants peut être envisagée à 5 niveaux :

- a/ le niveau biochimique et cellulaire,
- b/ le niveau des organismes,
- c/ le niveau des populations,
- d/ le niveau des écosystèmes

#### **a. Le niveau biochimique et cellulaire:**

Les effets des polluants sont examinés aux plans enzymologie, endocrinologie et histologie.

#### **b. Le niveau des organismes:**

L'impact des polluants est étudié sur :

- la croissance, le développement et la reproduction,
- la physiologie comme par exemple le métabolisme respiratoire,
- le comportement: On distingue quatre seuils de réponses éthologiques de l'animal en présence d'un polluant ou altéragène 1/ détection, 2/ altération du comportement appétitif, 3/ comportement adaptatif de défense et 4/ comportement aberrant.
- la pathologie,
- l'étude de bioindicateurs (Moules).

#### **c. Le niveau des populations:**

il s'agit de travaux à vocation écologique de longue durée qui seront réalisés sur le terrain; pour chaque population étudiée sont considérés les paramètres suivants:

- paramètres de reproduction de croissance et de développement et de survie

#### **d. Le niveau des écosystèmes :**

Il s'agit de déterminer d'une part les paramètres de structure en précisant les espèces appartenant aux différents niveaux trophiques (producteurs, herbivores, carnivores...), d'autre part de déterminer les paramètres de fonction qui touchent diverses activités métaboliques comme l'activité bactérienne et l'activité photosynthétique. Ces études sont plus difficiles à mettre en oeuvre, plus coûteuses et de longue durée que les études réalisées aux niveaux précédant.

- La modification des écosystèmes par l'extension ou la disparition des populations
- Le changement d'équilibres d'un écosystème

## II. Bioteneurs

### II.1. Chaîne alimentaire

**Une chaîne alimentaire :** est une suite d'êtres vivants reliés par une relation alimentaire et énergétique. Chaque organisme constitue un maillon de la chaîne alimentaire. Il y a échange d'énergie de l'un à l'autre des organismes mais également des pertes. Les chaînes alimentaires font partie d'un réseau alimentaire qui décrit le cycle de la matière (matière - chaîne alimentaire - matière-décomposeurs).

**Un niveau trophique** est le rang qu'occupe un être vivant dans une chaîne alimentaire. Chaque maillon de la chaîne constitue un niveau trophique.

**Les différents niveaux trophiques** sont les suivants :

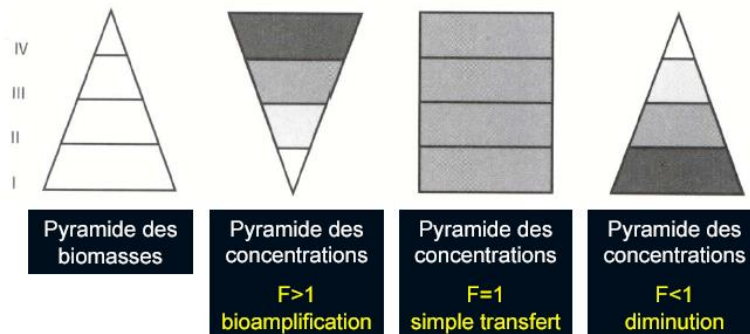
**Les producteurs** (diverses espèces végétales) sont des autotrophes (capables de synthétiser par la photosynthèse, des molécules organiques ( $C_6H_{12}O_6$ ) à partir de substances inorganiques (gaz carbonique et eau). **Les consommateurs** (les animaux) sont des hétérotrophes, ils sont incapables de synthétiser leur propre nourriture ; ils dépendent ainsi des autres pour se nourrir. On trouve plusieurs types : les consommateurs de premier ordre (les herbivores qui mangent d'autres végétaux), les consommateurs de second ordre les carnivores ou prédateurs qui mangent les herbivores) et consommateurs de troisième ordre (les carnivores qui mangent d'autres carnivores). **Les décomposeurs** (bactéries et champignons) qui dégradent la matière organique des cadavres et redonnent aux plantes les sels minéraux indispensables à la photosynthèse.

**Bioconcentration :** C'est la capacité qu'a un organisme de stocker une substance à une concentration supérieure à celle de l'eau ou de la nourriture.

BCF (facteur de bioconcentration) = Concentration du polluant dans l'organisme/concentration du polluant dans le milieu.

**Biomagnification** : Elle désigne une accumulation progressive d'une substance *via* la chaîne alimentaire.

**Ft (Facteur de transfert)** = Concentration du polluant dans le niveau trophique n+1 / Concentration du polluant dans le niveau trophique n. Ft >1 bioamplification ; Ft = 1 simple transfert ; Ft < 1 diminution de la concentration.

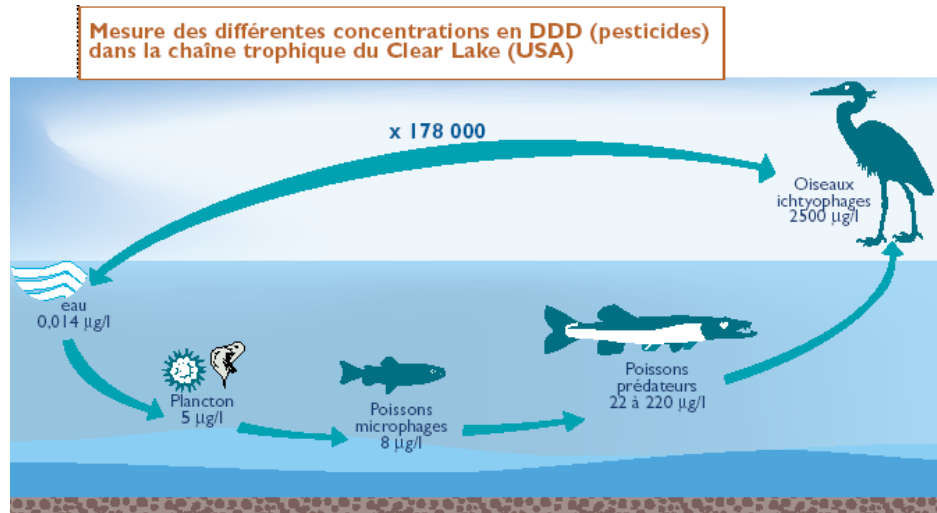


**Figure 1.** Pyramides des biomasses et des concentrations d'un polluant dans les réseaux trophiques.

**Bioaccumulation** : est un terme qui englobe biomagnification et bioconcentration. La bioaccumulation résulte d'un phénomène de transfert et d'amplification biologique de la pollution à travers les biocénoses contaminées. La bioaccumulation s'appuie sur le coefficient de partage octanol/eau ou KOW pour prédire la capacité d'un polluant de s'accumuler dans les graisses.

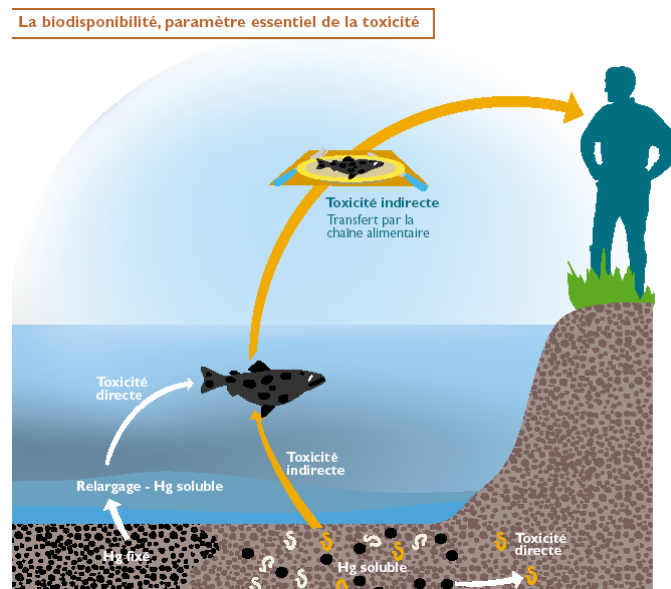
$KOW = \log P$ . La substance considérée est bioaccumulable si  $KOW \geq 100$  ou  $\log P \geq 3$ . La bioaccumulation est appréhendée indirectement par la relation suivante :  $BCF = KOW \times$  Concentration de la substance dans les lipides. La substance est alors bioaccumulable si  $BCF > 100$ .

Exemples : Pentachlorophenol  $\log P = 5,12$  : bioaccumulable ; Chloroforme  $\log P = 1,97$  : non bioaccumulable.



**Figure 2.** Mesure des différentes concentrations de DDD (insecticide organochloré) dans la chaîne trophique d'un lac aux USA.

**Biodisponibilité :** se définit comme la propriété d'un élément ou d'une substance d'atteindre les membranes cellulaires des organismes vivants.



**Figure 3.** Rapport entre biodisponibilité et toxicité dans un écosystème aquatique.

**Biodégradation** est tout processus à médiation biologique qui entraîne la conversion d'une substance organique en dérivés ultimes organiques et inorganiques chimiquement distincts de la

substance initiale (Shimps *et al.*, 1990). La **biodégradation primaire** ou biotransformation a été définie comme la perte de l'identité chimique du produit initial et la **biodégradation ultime** (minéralisation) comme la formation de biomasse microbienne et de produits finaux inorganiques à partir d'une substance chimique. **Le potentiel de biodégradation** d'un produit chimique peut être estimé par le rapport entre la demi-vie (le temps nécessaire pour réduire la quantité de produit à 50% de sa valeur initiale) et le temps de résidence. Les substances qui ont des rapports supérieurs à 7 sont considérées comme virtuellement non-biodégradables.

## II.2. Pyramides écologiques

**Pyramide des nombres** : Le nombre d'individus de chaque niveau trophique.

**Pyramide de la biomasse** : La biomasse est la masse totale de la matière organique et des êtres vivants subsistant dans une région donnée. La pyramide de la biomasse est la masse de chaque niveau trophique par unité de surface (g/mètre carré).

**Pyramide des énergies** est la quantité d'énergie disponible à chaque niveau trophique. Elle est exprimée en Joules. Sur le 100% d'énergie disponible d'un niveau trophique, un taux de 10% en moyenne est converti en biomasse dans le niveau suivant. C'est ce qu'on appelle rendement ou efficacité écologique.

**Pyramide des concentrations** exprime la concentration d'un xénobiotique dans les différents niveaux trophiques.

## III. Bioindicateurs et biomarqueurs

### III.1. Bioindicateur :

**Définition** : Un bioindicateur est une espèce végétale ou animale dont la présence renseigne sur certaines caractéristiques physico-chimiques ou biologiques de l'environnement ou sur l'incidence de certaines pratiques. Les effets sont observables au niveau de l'individu et se traduisent par des altérations morphologiques, comportementales, tissulaires ou physiologiques.

Un bioindicateur constitue l'indice précoce des modifications biotiques ou abiotiques de l'environnement (dues à des activités humaines) ou plus généralement renseigne sur l'état et le fonctionnement d'un écosystème.

**Caractéristiques :** Un bioindicateur présente les **sept** caractéristiques suivantes :

- Être connu scientifiquement (ubiquiste, abondant et sédentaire).
- Être lié ou corrélé à des fonctions de l'écosystème.
- Intégrer des propriétés ou des processus physiques, chimiques et biologiques.
- Pouvoir prendre en compte différents aspects.
- Présenter des qualités de mesure.
- Echantillonnage facile, efficace et peu cher.
- Élevage possible en laboratoire

**Utilisations :**

- Détecter les changements dans l'environnement naturel.
- Surveiller la présence de pollution et ses effets sur l'écosystème de l'organisme.
- Suivre les progrès du nettoyage de l'environnement.

### III.2. Biomarqueurs

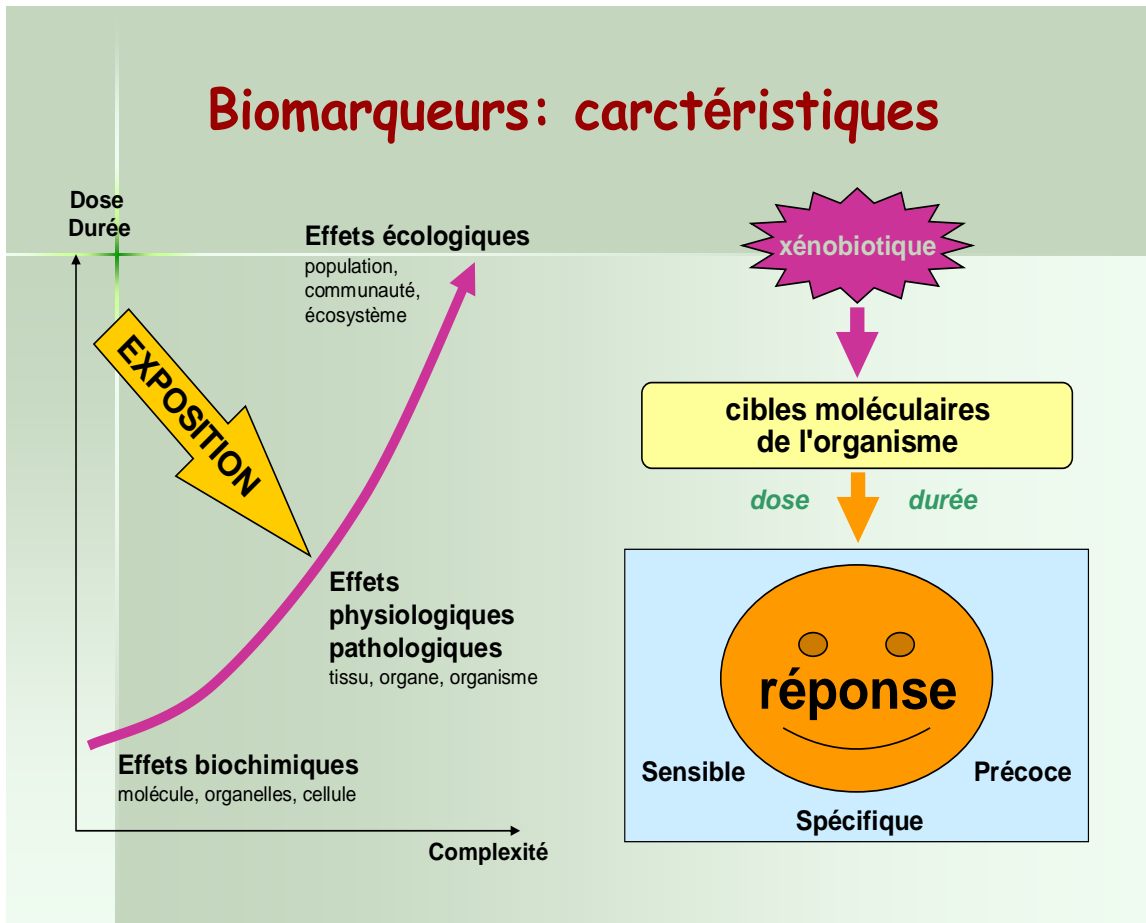
**-Définition :** Un **biomarqueur** est un changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant (Lagadic *et al.*, 1997). Un biomarqueur représente donc une signature biologique de l'impact ou de la présence du xénobiotique dans l'organisme.

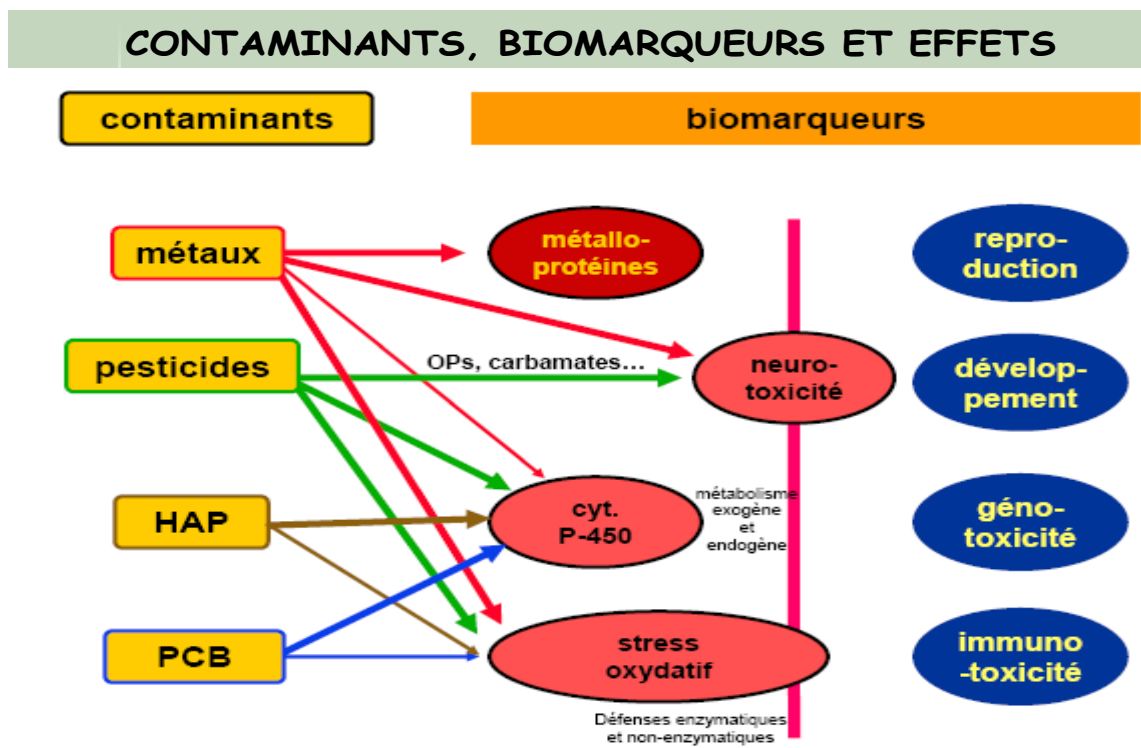
**-Types :**

- Biomarqueurs d'exposition:** substance exogène ou son métabolite, ou le produit d'une interaction entre un agent xénobiotique et une molécule ou une cellule-cible quelconque, qui est mesurée dans un compartiment à l'intérieur d'un organisme.
- Biomarqueurs d'effet:** altération biochimique, physiologique ou d'un autre type qui peut être mesurée à l'intérieur d'un organisme et qui, suivant son ampleur, peut être reconnue comme un trouble de la santé ou une maladie, établie ou potentielle.
- Biomarqueurs de sensibilité:** indiquent l'existence d'une sensibilité différente au toxique dans une partie de la population.



-**Caractéristiques** : La réponse du biomarqueur doit être sensible, spécifique et précoce.





## VI. Sources de pollution

Les principales sources de pollution sont les suivantes :

**-Production d'énergie** : utilisation et gaspillage de ressources non renouvelables avec comme conséquences de l'extraction et de la combustion du pétrole : marées noires, pollution continentale et littorale, développement du transport routier, contamination diffuse de l'air, effet de photo-oxydants produits par les gaz d'échappement sur la végétation, chauffage urbain, augmentation du SO<sub>2</sub>.

**-Activités industrielles** : émissions de composés minéraux :

Métaux et métalloïdes : mercure, plomb, cadmium, arsenic

Composés organiques : aldéhydes, phénols, pesticides, fluorures, chlorés

Matières plastiques : polyéthylène, polystyrènes, polyuréthane. Ces substances renferment souvent des stabilisants et autres agents plastifiants dont la toxicité est mal évaluée. Rôle important dans la contamination de l'environnement par les PCBs, le DDT ou le Cadmium.

-**Diversification de l'industrie chimique** : 1000 substances nouvelles/an dont la nocivité et la toxicité sont souvent très mal connues.

-**Agriculture** : engrais, pesticides.

-**Pollutions anthropiques** qui perturbent les équilibres globaux avec réchauffement climatique; pluies acides de la transformation des oxydes de soufre en acide sulfurique et des oxydes d'azote en acide nitrique (pH des pluies acides < 2,5) ; rejet des gaz propulseurs des aérosols (CFC) ayant un impact sur la couche d'ozone.

## V. Classification des polluants

### V.1. Critères et classification :

La nature des polluants est extrêmement variée. Les polluants sont disséminés dans tous les compartiments : hydrosphère, atmosphère, lithosphère, biosphère. Plusieurs critères sont à l'origine de la classification des polluants : nature, état ou taille, importance (croûte terrestre et organismes vivants).

La classification la plus usitée est celle de RAMADE (1977) qui distingue :

- des polluants physiques (radiations ionisantes, pollution thermique, nucléaires).
- des polluants chimiques (hydrocarbures, matières plastiques, pesticides, nitrates, phosphates, métaux lourds, fluores...).
- des polluants biologiques (matières organiques mortes, agents pathogènes...).

**Tableau 2** : Classification des polluants et leur présence dans les différents compartiments ou écosystèmes.

Nature des polluants	Compartiment ou Ecosystèmes			
	atmosphérique	continentaux	limniques	marins
<b>Polluants physiques</b>				
Radiations ionisantes	+	+	+	+
Pollution thermique	+	+	+	+
<b>Polluants chimiques</b>				
Hydrocarbures	+	+	+	+
Plastiques	+	+	+	+
Pesticides	+	+	+	+
Détergents	+	+	+	+
Composés divers de synthèse	+	+	+	+
Dérivés du Soufre	+	+	+	
Nitrates		+	+	+
Phosphates				
Métaux lourds	+	+	+	+
Fluorures	+	+		
Particules minérales	+	+		
<b>Polluants biologiques</b>				
Matières organiques			+	+
Microorganismes	+	+	+	+

**Une seconde classification** est basée sur l'abondance naturelle des éléments traces (68 éléments dont concentration individuelle inférieure à 0,1% avec un total de 0,6% de la masse de la croûte terrestre) et majeurs (12 éléments intervenant pour un total de 99,4%) dans la croûte terrestre. Les macro- et micro-éléments se distinguent par rapport à leurs teneurs dans le monde du vivant (JUSTE, 1994). Selon ces critères BOUCHE (2005) classe les substances toxiques en :

-**Mégapolluants** lorsque la substance considéré constitue environ 1% ou plus du sol/sédiment (masse sèche). C'est le cas de la matière organique morte qui peut en certains cas (absence d'oxygène être à l'origine d'effets toxiques par l'asphyxie résultant de sa décomposition.

-**Macropolluants**, lorsque la substance considérée représente quelques ppm (mg/kg) du substrat analysé. C'est le cas des métaux lourds ou de l'ammoniaque.

-**Micropolluants**, lorsqu'ils représentent quelques ppb ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) du substrat. C'est le cas des PCBs, HAPs, dioxines, pesticides.

-Génotoxiques, lorsque chaque molécule a des effets délétères comme le cas des adduits se fixant sur l'ADN et induisant des dysfonctionnements cellulaires (cancers, tératogénèse).

**Une troisième classification** simplifiée subdivise schématiquement, les polluants en deux grands groupes: les macropolluants et les micropolluants :

**-Les micropolluants:**

1-Micropolluants minéraux:

- Éléments traces métalliques,
- Silice, Silicates, Amiante,
- fluorocarbone (gaz propulseur des aérosols nocif pour la couche d'ozone).

## 2-Micropolluants organiques non pesticides:

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques et hétérocycliques.
- Paraffines chlorées.
- Aromatiques halogénés.
- Aromatiques halogénés avec oxygène.
- Aromatiques volatils.
- Amines aromatiques.

## 3- Pesticides et biocides:

- Organo-halogénés aliphatiques (lindane, HCH).
- Acides phénoxyacétiques (2,4 D).
- Cyclodiènes (Aldrine).
- Triazines.
- Carbamates (Carbaryl).
- Organo-phosphates (malathion).
- Organo-mercuriels.
- Benzoylurées.
- Benzoylhydrazine.

### **-Les Macropolluants:**

- Phosphates,
- Nitrates
- Éléments majeurs

## **V.2. Différences entre les macropolluants et les micropolluants**

Les micropolluants se distinguent des autres polluants par les caractéristiques suivantes:

- les sources des micropolluants sont le plus souvent diffuses et difficilement contrôlables.
- leur faible concentration dans les déchets (gazeux, liquides ou solides) rend leur élimination difficile et leur analyse délicate et nécessitant un ensemble de techniques particulières.
- ils pénètrent facilement dans l'organisme.

- ils agissent selon l'un des deux premiers types d'action polluante à savoir par modification des réactions biochimiques de base ou par compétition au niveau d'une fonction essentielle.
- ils engendrent la perturbation des écosystèmes ou des troubles métaboliques chez les organismes pour des doses très faibles, généralement inférieures à 1 ppm (1 mg/kg).
- ils interfèrent avec les mécanismes biochimiques de base comme le cycle de Krebs.
- ils sont souvent peu biodégradables, s'accumulent dans l'environnement et leurs produits de dégradation peuvent être aussi dangereux que les molécules mères.

### **V.3 Règle des trois actions polluantes:**

#### **a. Modification des réactions biochimiques de base :**

Une substance est qualifiée de polluante lorsqu'elle est étrangère au milieu naturel mais qu'elle peut se lier aux constituants chimiques des organismes au moyen d'un groupement chimique simple. Ainsi, sa nature étrangère au milieu modifie les réactions biochimiques de base. Si le mercure métallique présente un certain danger (troubles du métabolisme et déséquilibre au niveau des écosystèmes terrestres et aquatiques), ce sont surtout les sels de mercure et les dérivés organo-mercuriels qui sont les plus à craindre pour la santé et l'environnement). Le mercure fait partie d'une famille de pesticides organo-mercuriels très efficaces dans la protection des semences contre divers parasites (bactéries, champignons, insectes). Exemple: le méthyl-mercure ou le nitrate de méthyl-mercure (la liaison électrovalente leur confère une hydrosolubilité donc une entrée facile dans le milieu aquatique tandis que le radical méthyl leur permet de s'insérer dans les cycles biochimiques). Beaucoup de micropolluants agissent selon ce type de mécanisme. C'est le cas, en particulier, des micropolluants cancérigènes tels les amines aromatiques ou les hydrocarbures polycycliques aromatiques.

#### **b. Compétition au niveau d'une fonction essentielle :**

Le polluant présente des caractéristiques réactionnelles et structurelles semblables à celles des fonctions chimiques constitutives des organismes. Il y a alors compétition. Exemple: L'inhibiteur de l'acétylcholinestérase. Cette enzyme inactive un médiateur chimique l'acétylcholine qui est libéré dans l'intervalle synaptique et se fixe sur les plaques motrices du muscle provoquant l'apparition d'un potentiel d'action responsable des contractions musculaires. A défaut d'enzymes inactivant ce médiateur chimique, il s'établit un blocage de la synapse et une contraction continue

des muscles aboutissant à un état tétanique. Les insecticides organophosphorés, tels le malathion et les esters phosphoriques de synthèse, sont de puissants inhibiteurs des acétylcholinestérases. En effet, ils agissent en se fixant de façon irréversible sur les sites actifs de l'enzyme. Dès lors, l'acétylcholine s'accumule dans les synapses provoquant une stimulation constante des muscles entraînant une paralysie tétanique. Les insecticides organophosphorés sont encore utilisés. Ils présentent une toxicité aiguë très élevée provoquant des troubles profonds du système nerveux suite à un blocage des acétylcholinestérases.

### **c. Déplacement des équilibres dans l'environnement:**

Le polluant est un composé naturel et un élément essentiel, tel le phosphore ou le zinc par exemple, dont la présence dans l'environnement en concentration élevée déplace les équilibres. Exemple: Le phénomène d'eutrophisation. Lorsque les nutriments comme les phosphates ou les nitrates provenant des amendements agricoles ou des détergents, sont présents en quantités très importantes dans l'environnement aquatique, il peut y avoir un développement excessif des producteurs, ce qui va entraîner une consommation accrue d'oxygène. Ce phénomène particulier de pollution est bien connu; il s'agit de l'eutrophisation.