

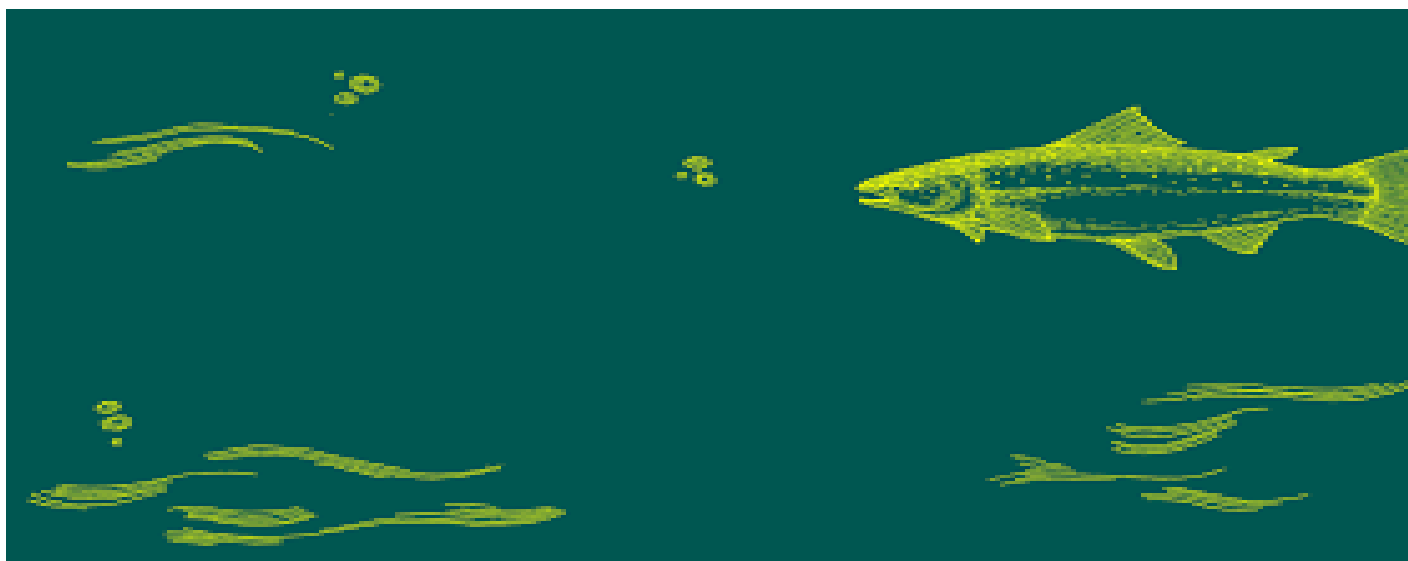


*Université Echahid Hamma Lakhder d'El Oued*  
*Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie*  
*Département de Biologie Moléculaire et Cellulaire*



- ❖ *Module : Ecotoxicologie*
- ❖ *Niveau : 1<sup>ère</sup> Année Master*
- ❖ *Spécialité : Toxicologie*
- ❖ *Promotion : 2021 :2022*
- ❖ *Chargé du module : Dr. Nourredine BOUALI*

*Cours préparé selon le programme du Master I en Toxicologie :*



*Année universitaire 2021|2022*

## *Objectifs de l'enseignement*

L'objectif de ce cours est de permettre aux étudiants d'acquérir des connaissances fondamentales et appliquées nécessaires à l'étude et à l'évaluation des risques et de leurs effets sur l'environnement, étudier la nature, la source et les types de contamination écotoxicologiques. Cette unité fondamentale complète les notions générales déjà vues en licence de biochimie et toxicologie.

✧ *Le volume horaire hebdomadaire consacré pour cette matière est de :*

*Cours : 3h*

*Travaux dirigés : 1h30*

*Travaux pratiques : 1h30*

✧ *Crédits : 6*

✧ *Coefficients : 3*

<i>Introduction</i>	Page 01
---------------------	------------

***Chapitre I. Généralité sur L'écotoxicologie***

I. Histoire de l'écotoxicologie	02
I.1. Les premières études d'écotoxicologie	02
I.1.1. La maladie ItaiItai	02
I.1.2. La maladie de Minamata	02
I.2. Définitions	04
I.2.1. Ecotoxicologie	04
I.2.1.1. L'origine de l'écotoxicologie	05
I.2.1.2. Objectif de l'écotoxicologie	05
I.2.1.3. Méthodes d'étude de l'écotoxicité	05
I.2.2. Ecologie	11
I.2.3. Toxicologie	11
I.2.4. Toxicité	11
I.2.4.1. Toxicité aiguë	11
I.2.4.2. Toxicité chronique	11
I.2.5. Polluant	12
I.2.6. Pollution	12
I.2.6.1. Causes principales de pollution	12
I.2.6.2. Types de pollutions	13
I.2.6.2.1. Pollution de l'air	13
I.2.6.2.2. Pollution des sols	13
I.2.6.2.3. Pollution de l'eau	14
I.2.6.3. Pollution par type ou agents polluants	14

***Chapitre II: Ecotoxicologie des milieux aquatiques***

II.1 Génotoxicité Chez Les Poissons	16
II.1.1. Méthodes d'analyse de la génotoxicité	17
II.1.2. Avantages et inconvénients des Méthodes d'analyse	19
II.2 Biomarqueurs	20
II.2.1 Biomarqueurs d'expositions	21
II.2.2 Biomarqueurs d'effets	21
II.2.3 Biomarqueurs de susceptibilités	21
II.2.4 Caractéristiques des biomarqueurs	23
II.3 Bioindicateurs et espèces sentinelles	24
II.3.1 Les Bioindicateurs	24
Concept et utilisation de bioindicateurs de la qualité du milieu	24
II.3.1.1 Bioindicateur d'accumulation	24

II.3.1.2 Bioindicateur d'effet ou d'impact	24
II.3.1.3 Propriétés d'un bon bioindicateur	26
II.3.1.4 Intérêt des biomarqueurs	26
II.3.2 Les espèces sentinelles	27
II. 3.2.1 Critères de sélection d'une espèce appropriée	27
II. 3.2.2 Utilisations des systèmes d'animales sentinelles	29
II. 3.2.3 Avantages et limitations des dispositifs d'animaux sentinelles	29
II.4. Qualité écologique des milieux aquatiques	30
II.4.1 Les eaux continentales	30
II.4.2 Les eaux marines et le littoral	31
II.4. 2.1. La contamination microbienne	32
II.4.2.2.La contamination chimique	32

### *Chapitre III: Ecotoxicologie des milieux terrestres*

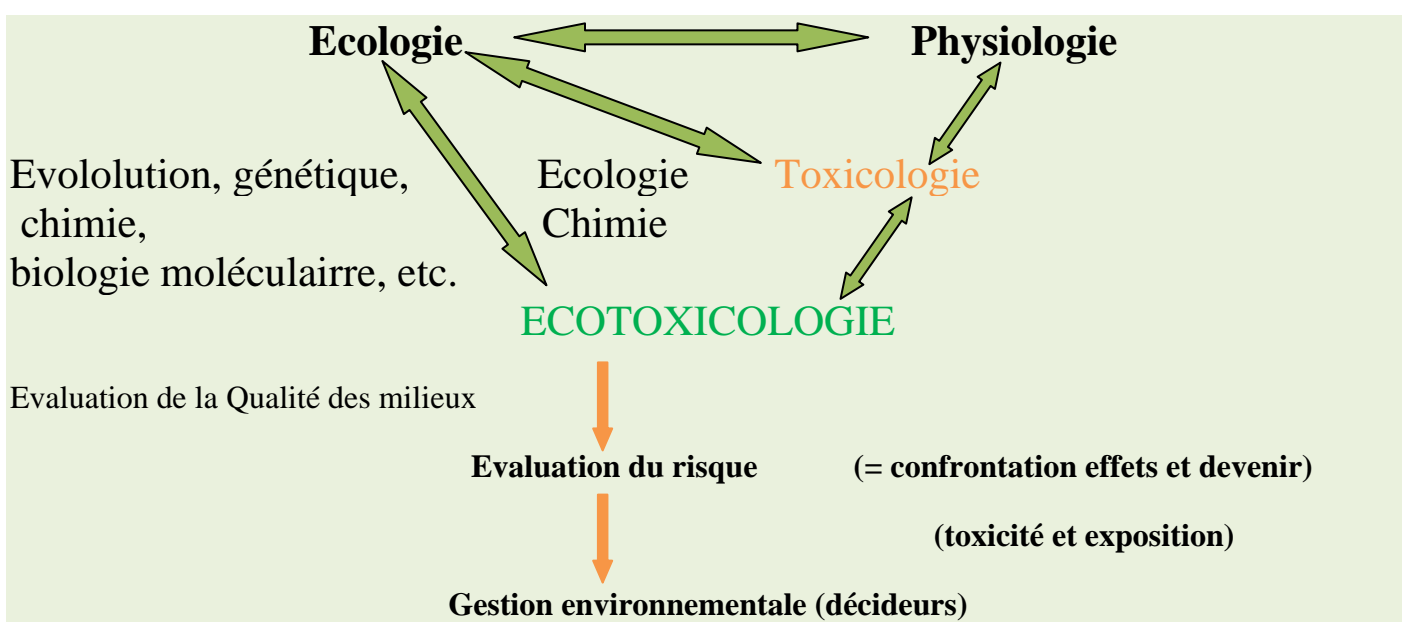
III.1 Biodisponibilité et accumulation des métaux dans les sols/transferts vers les eaux	35
III.1.1. Biodisponibilité et accumulation des métaux dans les sols	36
III.1.2. Transferts vers les milieux aquatiques	37
III.2. Effets indirects des polluants sur le fonctionnement des réseaux trophiques	38
III.2.1. Facteur de transfert FT	39
III.2.2. Bioconcentration	40
III.2.3. Bioaccumulation	41
III.3. Ecotoxicologie des perturbateurs endocriniens	42
III.3.1 Définition	43
III.3.2 Les sources de contamination par les PE	43
III.3.3 Caractéristiques générales des perturbateurs endocriniens	44
III.3.4 Mode d'action des PE	45
III.3.5. Effets des perturbateurs endocriniens sur l'environnement	47
III.4. Apports de l'écotoxicologie dans le domaine de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques	49

## Introduction :

L'écotoxicologie est une discipline récente à l'interface de l'écologie et de la toxicologie. Elle est née de la reconnaissance du fait qu'un nombre croissant de polluants contaminent la biosphère. Elle s'intéresse au sort des différents contaminants dans l'environnement ainsi qu'à leurs impacts sur les écosystèmes et sur les humains.

Depuis de nombreuses années, les chercheurs tentent de découvrir des substances pour améliorer la condition humaine. Par exemple, le DDT, un insecticide, élaboré par le chimiste Paul Müller (prix Nobel) en 1948 pour réduire l'incidence de maladies mortelles comme le paludisme, la fièvre jaune et le typhus s'est avéré un produit dangereux, pas seulement pour les insectes, mais aussi pour beaucoup d'autres êtres vivants. Le DDT est un exemple classique du dilemme des produits chimiques, à la fois salutaires et dangereux. En cherchant à en tirer de nombreux avantages, on risque par inadvertance de faire grand tort à l'environnement et à la santé humaine.

Par ailleurs, l'écotoxicologie est la science qui étudie la toxicologie de l'environnement. Cette science demande à connaître et à comprendre beaucoup de notions théoriques issues de domaines scientifiques variés : la biologie, l'écologie, la chimie, la biogéochimie, etc. Cependant, dans un contexte de gestion environnementale, l'écotoxicologie demande aussi à pouvoir analyser et interpréter de façon générale des situations toxicologiques que l'on peut retrouver dans notre environnement. L'écotoxicologue doit ainsi pouvoir essentiellement maîtriser toutes les connaissances de base, mais aussi se familiariser avec des situations problématiques de toxicité de l'environnement.



## Chapitre I: Généralité sur L'écotoxicologie

**Histoire de l'écotoxicologie :** débute dans les années 1970, à la suite de problèmes de santé publique et de perturbation de populations animales provoqués par des polluants.

### I.1. Les premières études d'écotoxicologie :

#### I.1.1. La maladie ItaiItai :

Littéralement "**aïe aïe**" en japonais est apparue dès 1912 dans la province de Toyama (Honsu) au Japon, en raison d'une intoxication au cadmium liée à l'exploitation de la mine Kamioka (Fig. I.01).



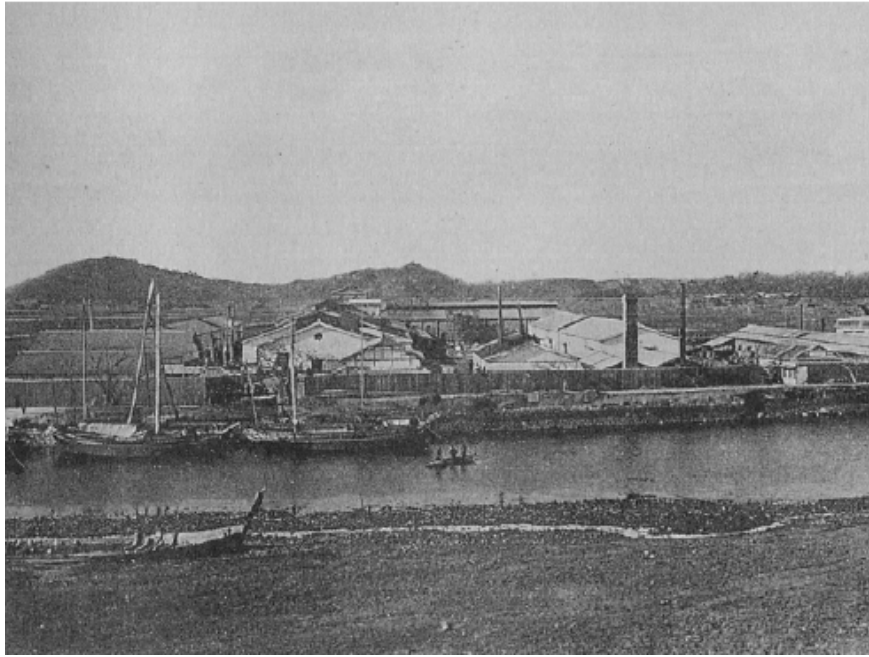
**Figure. I.01.** La mine Kamioka, Toyama, Japon (Smith, 1972)

Elle a été nommée ainsi par la population locale à cause des violentes douleurs aux articulations et à la colonne vertébrale. La rivière Jinzu ainsi que ses affluents ont été très fortement contaminés en cadmium durant cette période. Or cette rivière était utilisée pour l'irrigation des cultures de riz mais aussi comme source d'eau potable. Les poissons de la rivière Jinzu ont vu leur mortalité augmenter et le riz consommé par les habitants contenait une concentration très importante en cadmium.

Le cadmium a la particularité de se fixer et de rester longtemps dans le corps humain. Il remplace dans les complexes protéiques d'autres métaux essentiels à l'organisme comme le cuivre ou le zinc. Il en résulte un fonctionnement physiologique anormal et une cytotoxicité qui se traduisent par un déficit d'absorption du calcium. La maladie **ItaiItai** provoque un ramollissement des os et une insuffisance rénale. Les premiers cas de maladie dus à l'intoxication au cadmium ont été signalés en 1912. Environ 200 personnes ont été officiellement reconnues comme victimes de la maladie **itai- itai**.

#### I.1.2. La maladie de Minamata :

Pendant des décennies, les usines chimiques de la société Shin Nippon Chisso ont déversé du méthylmercure dans les eaux de la baie de **Minamata**, un port situé sur l'île Khushu au Japon (Fig. I.02).



**Figure. I.02 :** L'usine chimique Chisso, Minamata, Japon (Smith, 1972)

Ce polluant a ainsi contaminé l'eau et les fonds marins et par la suite les poissons, puis les pêcheurs et leur famille qui s'en nourrissaient. Cette contamination a entraîné des troubles du système nerveux et des malformations chez les nouveau-nés. L'absorption de mercure par l'organisme provoque des troubles du système nerveux. Le tableau clinique est celui d'une encéphalopathie diffuse avec atteinte du cervelet avec les symptômes suivants : troubles mentaux, difficultés d'élocution, ataxie, paralysie, convulsions, réduction du champ visuel, difficultés de l'audition et, dans les cas les plus graves, coma convulsif suivi de mort (Fig. I.03).



**Figure. I.03 :** Victime de la pollution au mercure à Minamata, Japon (Smith, 1972).

Plus de 2000 cas de ce qu'on a appelé la maladie de Minamata ont été officiellement recensés mais environ 10 000 personnes auraient été affectées. Les effets de cette catastrophe se font encore ressentir aujourd'hui puisque la pêche a été interdite dans la baie de Minamata.

## **I.2. Définitions**

### **I.2.1. Ecotoxicologie :**

En 1977, Ramade donnait la définition suivante de l'écotoxicologie : « *c'est l'étude des modalités de contamination de l'environnement par les agents polluants naturels ou artificiels produits par l'activité humaine ainsi que de leurs mécanismes d'action et d'effets sur les 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.

#### **I.2.1.1. L'origine de l'écotoxicologie**

L'écotoxicologie est une discipline apparue dans les années 1970 reprenant les méthodes de la toxicologie en les élargissant au champ de l'environnement. Elle est issue de la toxicologie de l'environnement apparue peu après la Seconde Guerre mondiale, qui se souciait de l'impact des substances toxiques sur l'environnement. Le terme "écotoxicologie" apparaît pour la première fois en 1969 sous la plume du toxicologue français René Truhaut Professeur titulaire de la Chaire de toxicologie de la Faculté de Paris pour désigner "la branche de la toxicologie qui étudie les effets toxiques des polluants naturels ou synthétiques sur les organismes vivants des écosystèmes".

Cette nouvelle discipline connaît d'emblée un développement spectaculaire. En 1972, en collaboration avec les Professeurs Frédéric (U.S.A.) et Friedhelm Korte (R.F.A.), René Truhaut fonde l'"International Academy of Environmental Safety" dont il assume la présidence durant deux années (1974 et 1975), puis en devient Président d'honneur. René Truhaut développe la philosophie de l'écotoxicologie dans un exposé devant l'Académie des Sciences de Paris ainsi que dans un article paru dans "Ecotoxicology Environmental Safety" lequel a été l'objet d'une demande extraordinaire de tirages à part qui s'élevait à plus de 7000 exemplaires en 1979 (Molle, 1984). Il définit les objectifs, les principes et les perspectives de l'écotoxicologie dans plusieurs articles (Truhaut,1975 ; Truhaut,1977). Son rôle de père de l'écotoxicologie est reconnu au niveau des plus hautes instances internationales comme l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) et le Comité Scientifique International sur les Problèmes de l'Environnement (S.C.O.P.E.). En août 1984, René Truhaut a été élu à la Présidence du Comité Scientifique des Communautés Européennes sur l'écotoxicité et la toxicité des produits chimiques. La médaille du mérite des Communautés Économiques Européennes ainsi que la médaille du Conseil de l'Europe qui lui ont été attribuées témoignent de sa

reconnaissance comme père de l'écotoxicologie. Les universités de Metz et Orsay ont largement contribué à l'extension de cette discipline dans les années 1980/90. Alors que la toxicologie classique limite ses études aux organismes, l'écotoxicologie tente de mesurer l'impact des substances chimiques non seulement sur les individus mais aussi sur les populations, les communautés et les écosystèmes.

### **I.2.1.2. Objectif de l'écotoxicologie :**

Elle a pour objet de préciser les modalités et mécanismes de la contamination des divers écosystèmes par les principales catégories de polluants toxiques :

- ❖ la circulation et la transformation biogéochimiques des polluants dans les écosystèmes (la biodégradation et la bioaccumulation des polluants).
- ❖ les effets biocénotiques et perturbations induites dans les processus écologiques fondamentaux en particulier dans ceux qui assurent la productivité biologique des écosystèmes et de la biosphère.

### **I.2.1.3. Méthodes d'étude de l'écotoxicité :**

L'écotoxicité d'une substance chimique, d'un effluent industriel ou de tout rejet à l'environnement peut être évaluée à l'aide de diverses techniques regroupées schématiquement en deux catégories, les études de laboratoire d'une part et les études en milieu naturel d'autre part.

Les moyens d'étude de l'effet potentiel d'une substance chimique ou d'un effluent vis-à-vis des organismes vivants, développés au niveau du laboratoire sont très divers puisqu'ils vont des essais de toxicités monospécifiques (bioessais) jusqu'à l'emploi de microcosmes. Alors que l'étude des substances vis-à-vis de la faune et de la flore *in situ* sont variées et reposent sur l'utilisation de mésocosmes, d'enceintes artificielles ou d'écosystèmes réels (Fig. I.04).

#### ❖ **Les bioessais:**

De nombreuses espèces tant animales que végétales, de nombreux critères d'effets (mortalité, inhibition de croissance, immobilisation, ...) ont été étudiés par la communauté scientifique. Ces travaux ont conduit à la définition de divers bioessais (**tests biologiques** ou **biotests**) de laboratoire dont un certain nombre sont maintenant normalisés.

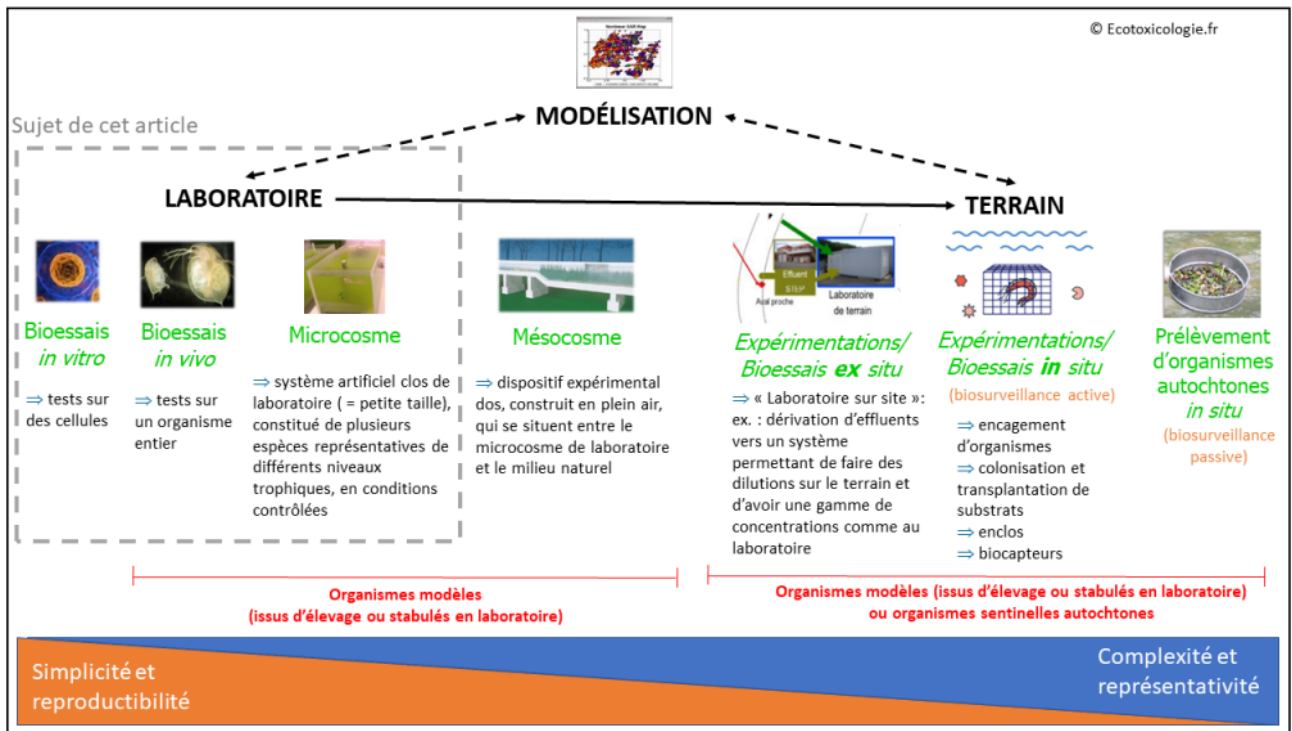


Figure.I.04: Les différentes approches en écotoxicologie (ecotoxicologie.fr)

Le bioessai est un test expérimental réalisé pour identifier le potentiel toxique d'une substance ou d'un mélange de substances par la réponse biologique de l'organisme test, et détermine les concentrations avec effets (CE10, CE50, LOEC...) ou sans effet (NOEC) (OECD., 2003) (Fig. I.05).

Les paramètres mesurés ou observés sont la survie, la taille, la croissance, le nombre de petits ou n'importe quel paramètre biochimique ou physiologique facilement quantifiable. Les observations se font sur des temps d'exposition plus au moins importants. On distingue les tests aigus qui se font sur des temps d'exposition courts (quelques heures à quelques jours) et les tests chroniques qui nécessitent un temps d'exposition plus prolongé pouvant durer tout le cycle de vie de l'organisme et au-delà.

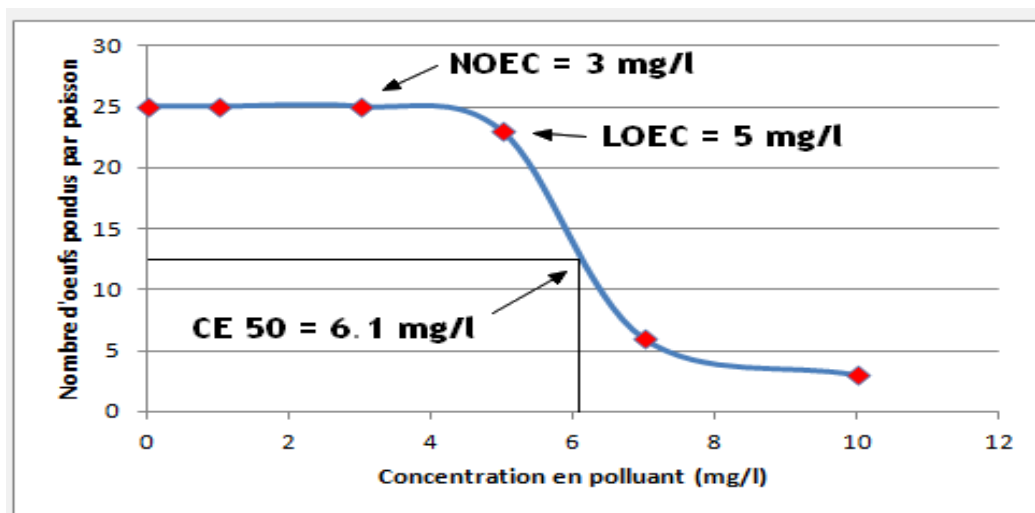


Figure. I.05: Exemple d'une courbe dose réponse (concentration- effet) et valeur remarquables NOEC, LOEC, CE50 (ecotoxicologie.fr)

Dans les tests aigus, la valeur recherchée est la CE50 (Concentration effective 50%) qui se définit comme la concentration en toxique qui engendre un effet de 50% par rapport aux témoins. Les tests chroniques s'intéressent quant à eux, à deux valeurs: La NOEC (No Observed Effect Concentration) qui est la plus grande concentration dont l'effet sur les organismes n'est pas différent de celui des témoins, et la LOEC (Lowest observed effect concentration) qui est la plus faible concentration qui provoque un effet statistiquement différent des témoins (Forbes et Forbes., 1997).

❖ **L'objectif d'un bioessai** est de déterminer, dans des conditions expérimentales précises, la concentration de toxique ou la durée d'exposition nécessaire pour entraîner un effet déterminé. **Ils ont donc pour but** la détection et l'évaluation de l'écotoxicité potentielle d'une substance chimique ou de tout autre échantillon vis-à-vis des organismes vivants.

Les essais normalisés tant au niveau national qu'international (AFNOR, ISO, UE, OCDE) présentent en commun un certain nombre de caractéristiques : leur reconnaissance par la communauté scientifique, leur capacité à prédire les effets d'une grande variété de substances sur des organismes différents, leur reproductibilité inter-laboratoire, leur sensibilité et enfin leur facilité de réalisation et leur coût modéré.

Leur réalisme « écologique » est quant à lui beaucoup plus discuté, ces bioessais étant réalisés dans des conditions d'environnement conventionnelles (température constante, photopériode contrôlée, milieu artificiel, ...) souvent fort éloignées des conditions environnementales naturelles. Compte tenu de la grande diversité des espèces animales et végétales dans les écosystèmes aquatiques et terrestres, les essais d'écotoxicité ont été développés vis-à-vis d'organismes représentant différents niveaux trophiques : producteurs primaires, consommateurs primaires (herbivores), secondaires (carnivores) et décomposeurs (utilisant la matière organique morte dont ils assurent une minéralisation progressive).

▪ **Producteurs primaires** : (assurant leur développement à partir du gaz carbonique, de l'eau et des sels minéraux et utilisant la lumière comme source d'énergie).

En milieu aquatique, celui-ci consiste à déterminer la concentration inhibant de 50% de la croissance d'une population d'algues vertes unicellulaires de l'espèce *Raphidocelis subcapitata* ou de l'espèce *Scenedesmus subcapitatus*.

- pour les algues: test de croissance de *Pseudokirchneriella subcapitata* C'est un test chronique permettant d'étudier l'inhibition de la croissance de la microalgue Pendant 72 heures en présence d'un toxique ou d'un échantillon naturel.
- La détermination de l'inhibition de la croissance permet de déterminer la CE<sub>50</sub> et la NOEC.
- Ce test a été normalisé par l'EPA pour évaluer la toxicité des effluents d'égouts urbains et industriels.



**Figure. I.06:** L'algue d'eau douce *Pseudokirchneriella subcapitata* (chaque croissant correspond à un individu) (ecotoxicologie.fr).

- Pour les végétaux supérieurs, le test de référence est réalisé sur la lentille d'eau.
  - Des monocultures du genre *Lemna* sont exposées à au moins cinq concentrations de la substance d'essai sur une période de sept jours (Fig. I.07).
  - L'objectif de l'essai est de quantifier les effets de la substance sur la multiplication des lentilles d'eau.
  - Cette étude inclut le comptage du nombre de thalles et la mesure d'un autre paramètre au moins (superficie totale des thalles, poids sec ou poids frais)



**Figure.I.07 :** monocultures de la lentille d'eau du genre *Lemna* (ecotoxicologie.fr)

En milieu terrestre, deux essais de toxicité vis-à-vis du ver de terre *Eisenia fetida* ont été développés. Le premier consiste à déterminer la concentration entraînant la mort de 50% des animaux mis en expérimentation, le second permet de définir la plus forte concentration n'ayant pas d'effet sur la production de jeunes par des vers de terre adultes placés dans un substrat contenant la substance d'essai à expérimenter.

- **Les consommateurs :** En ce qui concerne les consommateurs primaires, deux essais d'écotoxicité en milieu aquatique font l'objet d'un consensus international. Un essai de toxicité aiguë où est évaluée l'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna* et un essai de toxicité chronique où l'inhibition de la reproduction de ce même organisme est étudiée (Fig. I.08).



**Figure. I.08 :** *Daphnia magna*

La *Daphnia magna* est un micro crustacé ayant la particularité de se reproduire, dans des conditions environnementales satisfaisantes, par parthénogenèse, c'est à dire par reproduction asexuée. Ceci présente le double avantage de supprimer d'une part une éventuelle différence de sensibilité liée au sexe et d'autre part de pouvoir disposer d'organismes génétiquement identiques puisque tous issus d'une même daphnie mère.

L'essai d'inhibition de mobilité consiste à déterminer la concentration qui en 48 heures inhibe la mobilité de 50% d'une population de *Daphnia magna* mise en expérimentation. L'essai d'inhibition de la reproduction consiste à placer des daphnies mères dans diverses concentrations de la substance à expérimenter et à déterminer, après 21 jours, la plus forte concentration n'entraînant pas d'effet sur la reproduction statistiquement significatif par rapport au témoin (NOEC).

➤ La truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus gairdneri*) (Fig. I.09), est représentative des consommateurs secondaires dans les eaux douces.

Le test de toxicité (NFT 90 305) mesure la mortalité des poissons après exposition de 96h à différentes concentrations d'un polluant, c'est un test aigu où la CL<sub>50</sub>-96h est déterminée.



**Figure.I.09 :** La truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus gairdneri*) (ecotoxicologie.fr).

➤ Le truito-test : Il est utilisé dans le contrôle en continu des réseaux d'alimentation en eau potable et est basé sur le principe que : Les truites nagent normalement à contre courant.

- Un barrage électrique est situé en aval: alerte si les poissons se laissent dériver (inhibition de l'activité en présence de polluants)

➤ Test de survie des poissons : vise à évaluer la toxicité aigüe de produits sur une espèce de poisson d'eau douce (le poisson zèbre *Danio rerio*) (Fig. 10) à différents stades de son développement. Ainsi, les concentrations en polluants induisant une mortalité de 50 % des individus ( $CL_{50}$ ) peuvent être déterminées pour les poissons adultes mais aussi pour les œufs de poissons.



**Figure.I.10** : Le poisson zèbre (*Danio rerio*) (ecotoxicologie.fr).

En milieu terrestre, Les vers de terre ont un rôle essentiel dans les sols. Ils interviennent dans la structuration et l'aération des sols, les échanges gazeux, ou encore dans la circulation des liquides et la minéralisation de la matière organique. *Eisenia fetida* est un des modèles de vers de terre couramment utilisés en écotoxicologie, en raison de sa sensibilité aux polluants et de son cycle de vie court. Il se nourrit naturellement de compost ou de fumier.

Ce bioessai évalue l'influence des substances chimiques sur **le comportement d'évitement des vers de terre** exposés pendant 2 jours à un échantillon de sol naturel contaminé, ou à des concentrations connues d'une substance testée mélangée à un sol.

Le premier consiste à déterminer la concentration entraînant la mort de 50% des animaux mis en expérimentation, le second permet de définir la plus forte concentration n'ayant pas d'effet sur la production de jeunes par des vers de terre adultes placés dans un substrat contenant la substance d'essai à expérimenter. A noter qu'un autre test utilisant *Eisenia fetida* pourrait prochainement être intégré dans les paramètres de contrôle des matières fertilisantes destinées à l'épandage agricole (l'essai de reproduction sur 8 semaines – ISO 11268-2).

▪ **Décomposeurs :** Le danger potentiel des substances chimiques ou des effluents vis-à-vis des décomposeurs est évalué à l'aide de deux essais. Le premier concerne l'inhibition de la consommation d'oxygène des boues activées tandis que le second permet d'évaluer l'inhibition de croissance d'une souche pure de *Pseudomonas putida*. Un cas particulier des bioessais de laboratoire est représenté par les tests plurispécifiques dont les chaînes trophiques expérimentales. Ces modèles d'étude sont plus significatifs que les essais monospécifiques et permettent, outre l'étude des effets toxiques directs, la mise en évidence et la quantification des phénomènes de toxicité indirecte et/ou de bioamplification.

### **I.2.2. 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).

La définition la plus récente proposée par Dajos (1983) pour qui : " L'écologie est la science qui étudie les conditions d'existence des êtres vivants et les interactions de toutes sortes qui existent entre ces êtres vivants d'une part, entre ces êtres vivants et le milieu d'autre part. "

### **I.2.3. Toxicologie :**

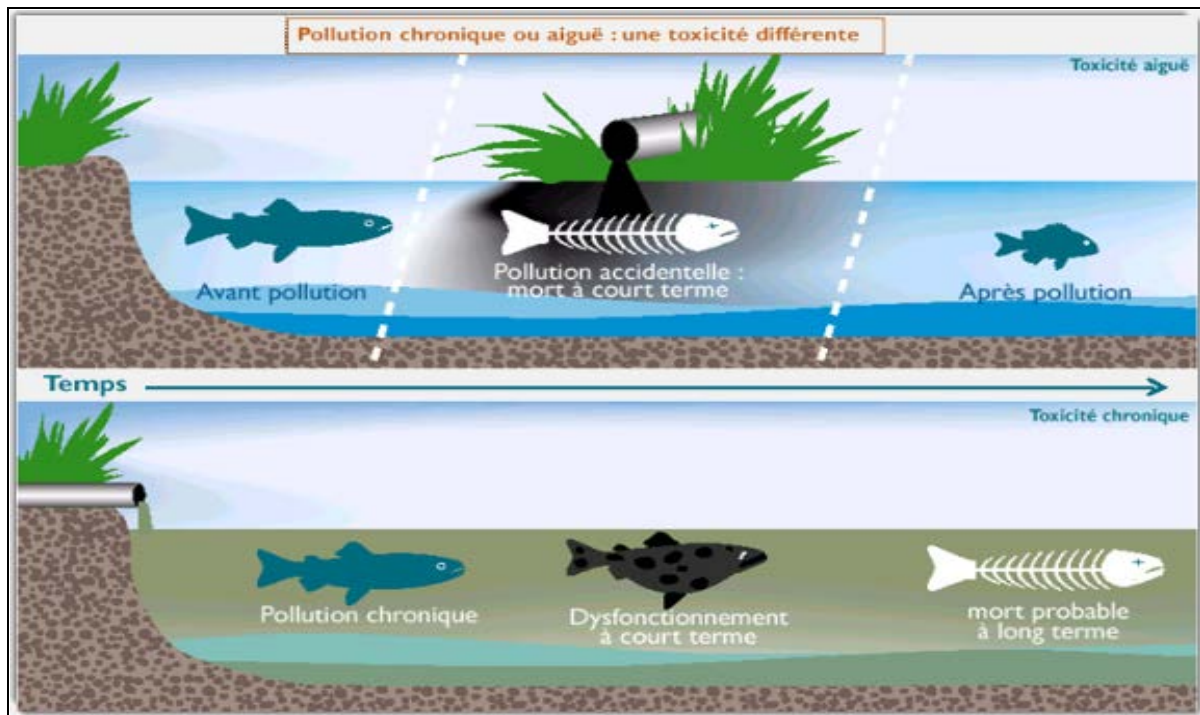
C'est la discipline qui étudie les substances toxiques (ou poisons) qui provoquent des altérations biologiques menant à la mort si les perturbations physiologiques sont intenses. La toxicologie est à la fois descriptive et explicative. Elle évalue la toxicité (tests) et précise les mécanismes (TRUHAUT,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

### **I.2.4. Toxicité :**

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.2.4.1. Toxicité aiguë :** intoxication dont l'intensité est telle qu'elle entraîne rapidement la mort des individus exposés (Fig. I.11).

**I.2.4.2. Toxicité chronique :** intoxications (répétées) appliquées selon une intensité sublétales n'entraînant des séquelles prolongées, voire irréversibles, qu'après de longues périodes d'exposition (parfois longtemps après la disparition de l'exposition au toxique).



**Figure. I.11:** Différence entre toxicité aiguë et chronique (Agence de l'Eau RMC, 2002)

#### **I.2.4.3. Toxicité sub-aiguë :** toxicité intermédiaire entre aiguë et chronique

#### **I.2.5. Polluant :**

- On désigne sous le terme de "polluant" toute substance artificielle produite par l'homme et dispersée dans l'environnement. Mais aussi toute modification affectant le taux ou (et) les critères de répartition dans la biosphère d'une substance naturelle propre à tel ou tels milieux.

- 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. (Moriarty;1983).

#### **I.2.6. Pollution :**

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel (cours d'eau, nappes aquifères, mer, air, végétation, faune...) qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine (industrielles, de transport, éventuellement agricoles), 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

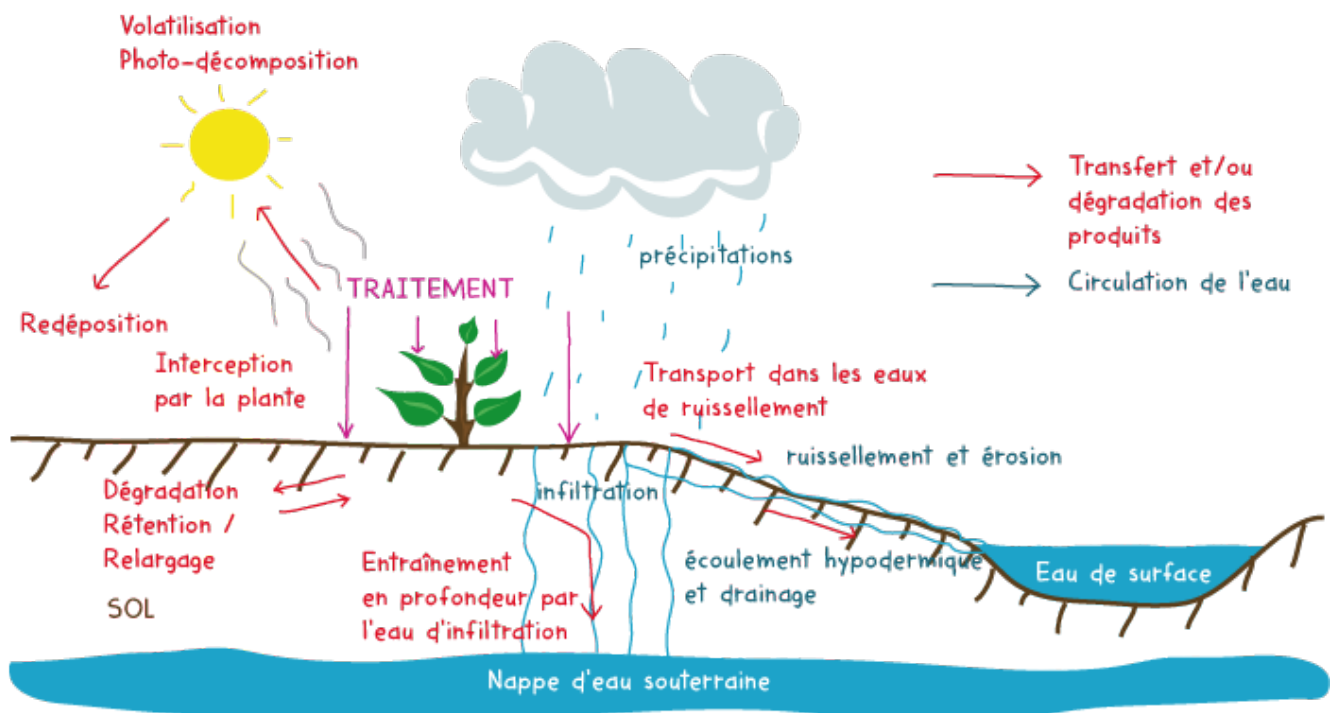
##### **I.2.6.1. Causes principales de pollution:**

La pollution peut avoir diverses origines parmi lesquelles :

- ✚ **Les industries chimiques et métallurgiques :** Les activités industrielles sont aussi parmi les principales causes de pollution. En effet, l'industrie chimique moderne et aussi la métallurgie, voire l'électronique participent énormément à la pollution de la biosphère par un nombre important de

composés minéraux ou organiques de toxicité souvent élevée ou encore peu dégradables, parfois même indestructibles: mercure, cadmium, niobium, antimoine, vanadium...etc.

- ✚ **Les activités agricoles :** En visant une augmentation spectaculaire dans le rendement des cultures, les agriculteurs optent pour l'emploi des produits chimiques tels que les engrais chimiques, les pesticides de synthèse (insecticide, fongicide, herbicide), la fumure minérale par apport de fertilisants azotés (nitrates, urée, ammoniacale..), le phosphate et les sels de potassium, dont l'usage n'est pas sans méfaits ou effets indésirables et nocifs liés à la contamination croissante de la biosphère par ces substances ( Fig. I.12).



**Figure. I.12 :** Dispersion dans l'environnement d'un pesticide appliqué sur une plante (ecotoxicologie.fr)

- ✚ **La production d'énergie :** La pollution d'origine de la production d'énergie regroupe principalement la pollution par les combustibles fossiles comme le charbon et le pétrole et l'énergie nucléaire.

### I.2.6.2. Types de pollutions :

#### I.2.6.2.1. Pollution de l'air :

La pollution atmosphérique peut être définie comme la présence d'impuretés dans l'air pouvant provoquer un gêne notable pour les personnes et un dommage aux biens. La pollution atmosphérique est donc fortement influencée par le climat et tout particulièrement par le vent, la température, l'humidité et la pression atmosphérique.

#### I.2.6.2.2. Pollution des sols :

La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole (suite à l'utilisation massive d'engrais ou de pesticides qui s'infiltrent dans les sols). Ces pollutions agricoles peuvent avoir plusieurs impacts La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole (suite à l'utilisation massive d'engrais ou de pesticides qui s'infiltrent dans les sols). Ces pollutions agricoles peuvent avoir plusieurs impacts sur la santé humaine, en touchant des nappes phréatiques d'une part et en contaminant par bioaccumulation les cultures poussant sur ces sols d'autre part.

#### **I.3.6.2.3. Pollution de l'eau :**

La pollution de l'eau peut avoir diverses origines parmi lesquelles :

- ❖ les exploitations agricoles: qui rejettent divers produits dont les engrais (comme des nitrates) ou les produits phytosanitaires qui peuvent polluer les nappes phréatiques et entraîner la fermeture de points de captages d'eau potable si leur présence est trop importante
- ❖ l'industrie : dont ses sous-produits sont une des sources de pollution de l'eau parmi les plus importantes. Il s'agit essentiellement de produits chimiques et d'hydrocarbures (dégazage).
- ❖ les eaux usées : C'est un milieu favorable pour la mise en place d'une microfaune bactérienne (développement des bactéries) qui si elles ne sont pas traitées correctement peuvent être une source de pollution de l'eau. La demande chimique et biologique en oxygène (DCO et DBO) seront utiles pour évaluer la teneur de la pollution dans le l'eau.

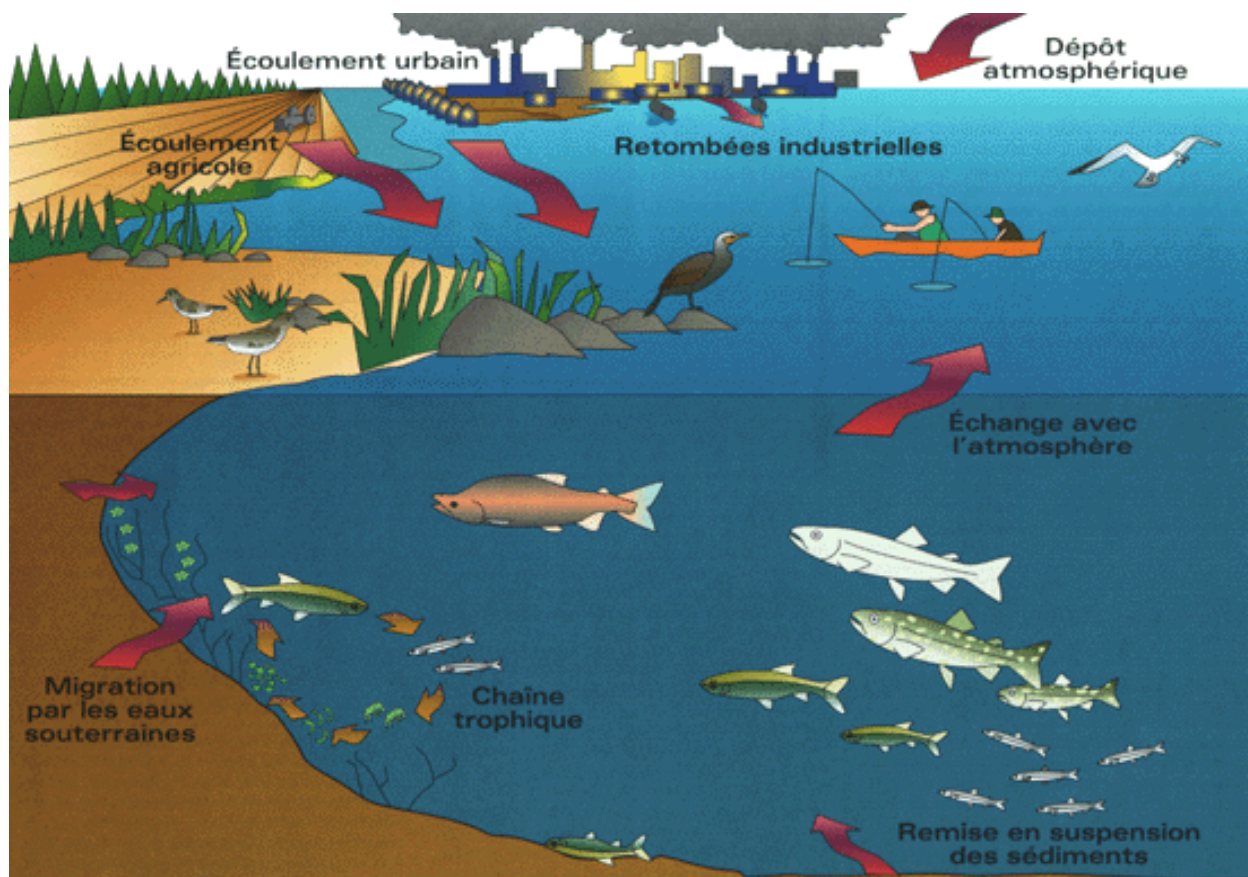
#### **I.2.6.3. Pollution par type ou agents polluants :**

- les pollutions liées aux transports, dont la pollution automobile et celle induite par les avions
- la pollution radioactive, (produits radioactifs (exemple : le phosphogypse; catastrophe de Tchernobyl),
- la pollution électromagnétique, (pollution liée aux rayonnements ionisants et non ionisants).
- la pollution thermique
- la pollution lumineuse: désigne à la fois la présence nocturne anormale ou gênante de lumière et les conséquences de l'éclairage artificiel nocturne sur la faune, la flore, les écosystèmes ainsi que les effets sur la santé humaine.
- la pollution liée au tourisme (pour partie liée aux transports), au bricolage et à certains loisirs (ex : nautisme) ou festivités (ex : feu d'artifice).
- la pollution spatiale et la pollution par les armes ou explosifs

## Chapitre II: *Ecotoxicologie des milieux aquatiques*

Le milieu aquatique présente une grande diversité physicochimique naturelle qui complique considérablement son approche écotoxicologique. De toute évidence, la faune et la flore sont différentes dans les eaux douces courantes ou stagnantes et sont influencées par les climats. Il en est de même pour les eaux marines dont la salinité présente une gamme fort étendue ce qui a de grandes conséquences. Pendant longtemps, l'eau sous ses diverses formes servit d'aliment par elle-même ou de ressource alimentaire par la pêche. Ce fut aussi un habitat comme en témoignent les cités lacustres et de façon occasionnelle un support aux déplacements à plus ou moins grandes distances (Fig. II.1).

Les altérations notables de l'environnement et plus spécialement du milieu aquatique apparurent avec la constitution des agglomérations urbaines et des systèmes plus ou moins rudimentaires d'égouts. Paradoxalement, une tentative de progrès hygiénique conduisit à une concentration de déchets par là même à une nuisance. C'était le début de la transformation des cours d'eau et de la mer en émonctoire incontrôlé. La situation actuelle est complexe et aussi beaucoup plus préoccupante par le fait du développement industriel avec son infinie variété.



**Figure. II.1** : Sources et cheminement de la pollution (www.epa.gov)

## II.1 Génotoxicité Chez Les Poissons :

La Génotoxicité est définie comme la capacité de certains agents chimiques, physiques ou biologiques à provoquer des dommages à l'ADN qui peuvent conduire à des mutations génétiques (Fig. II.2).



**Figure. II.2 :** malformation génétique externe chez le poisson dû à une génotoxicité(entpe.fr)

Ces agents mutagènes (Dégremont et Cachot, 2009), sont de deux types :

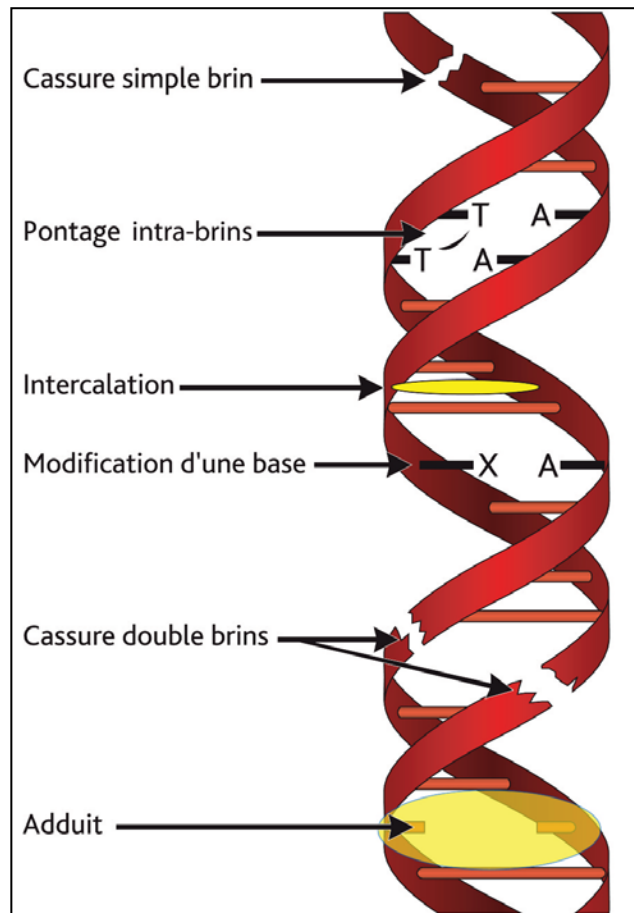
- **Les génotoxiques directs**, capables de modifier la structure de l'ADN (ex : cassures simple et double brin).
- **Les génotoxiques indirects** qui nécessitent une activation métabolique préalable avant d'exercer leurs effets sur le matériel génétique. Lorsqu'un agent provoque des anomalies au niveau du nombre de chromosomes (aneuploïdie).

Il existe un grand nombre de dommages possibles à l'ADN (Fig. II.3). Lorsque les substances induisent des modifications de la séquence nucléotidique ou des cassures, on parle de lésions primaires (ou structurales) comme :

- **Les adduits** : qui correspondent à la liaison entre une molécule et une base de l'ADN (Jeffrey et Williams, 2005). Ce type de lésion modifie la structure spatiale de l'ADN, perturbant ainsi sa reconnaissance par l'ADN polymérase au cours de la réplication ou de la duplication. Parmi les sites nucléophiles, les azotes aromatiques, les groupements hydroxyles et carbonyles des bases constitutives de l'ADN sont les cibles privilégiées des génotoxiques. Certains agents mutagènes tels que les HAP et les amines aromatiques sont capables de réaliser ce type de liaison entraînant la formation d'un complexe appelé adduit (pour produit d'addition). La formation et la persistance de telles lésions de l'ADN sont des étapes clé vers la mutagenèse et le développement tumoral.
- **les cassures (simples et doubles brins)** : sont des lésions correspondant à la rupture d'un ou des deux brins de la molécule d'ADN. Les cassures doubles peuvent avoir lieu à la même position ou bien à des positions très proches. Ces lésions peuvent être induites par de nombreux facteurs (espèces

réactives de l'oxygène (ROS), par exemple) ou par des radiations ionisantes comme les rayons X ou gamma. Les cassures doubles brins sont considérées comme des dommages particulièrement délétères car difficilement réparables.

- **D'autres types :** Moins fréquemment, des pontages intra ou inter-brins apparaissent, correspondant à des liaisons covalentes anormales entre des bases de l'ADN et des cassures simples ou doubles brins (Dégremont et Cachot, 2009).



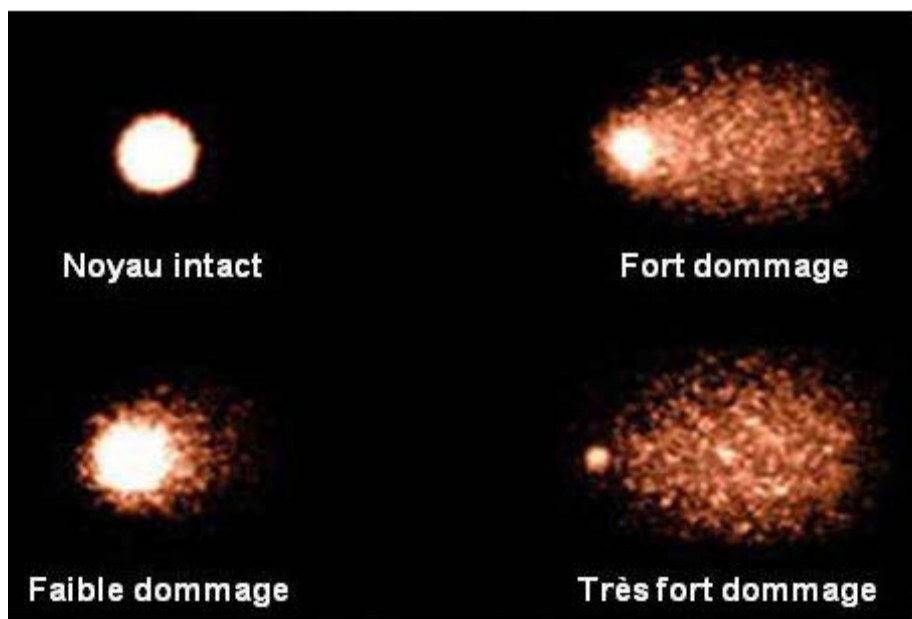
**Figure.II.3:** les différents types de lésions primaires de l'ADN (entpe.fr)

### II.1.1. Méthodes d'analyse de la génotoxicité :

En écotoxicologie, 2 méthodes de mesure/détection des signes de génotoxicité sont couramment utilisées, chacune d'elles présentant des avantages et des inconvénients. Les paragraphes suivants décrivent succinctement ces 2 méthodes : l'essai comète et le test des micronoyaux. Enfin, une 3ème méthode utilisée depuis une quinzaine d'années en écotoxicologie, la PCR par amorçage aléatoire ou *Random Amplified Polymorphic DNA* (RAPD).

✚ **Test des comètes :**

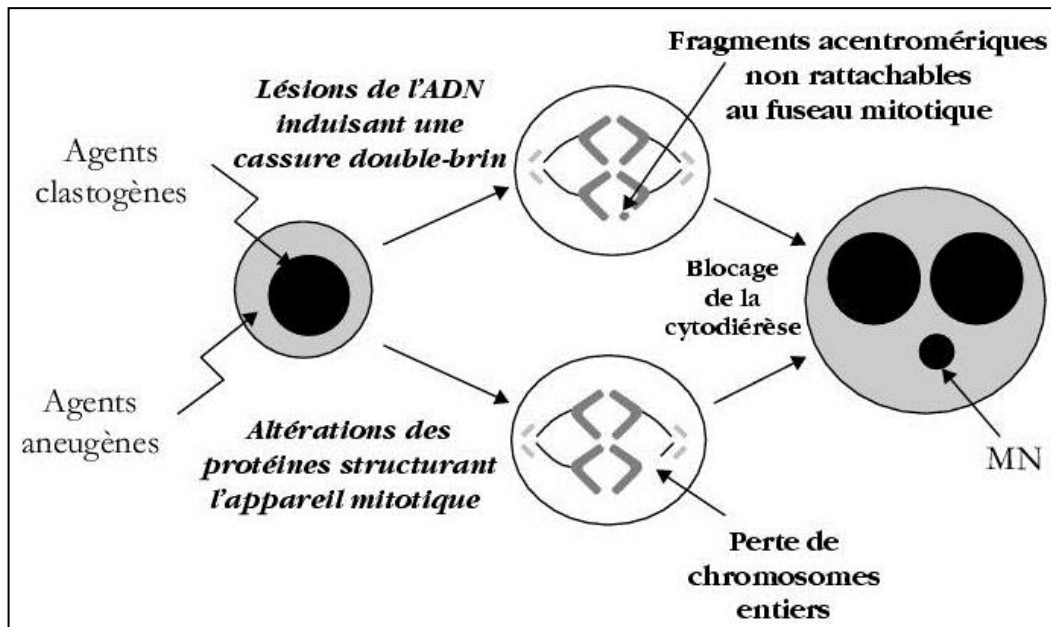
Le test des comètes est une technique d'électrophorèse sur microgel d'agarose. Il permet la détection spécifique de cassures simples et doubles brins ou la mise en évidence d'une fragmentation de l'ADN synonyme d'apoptose (mort cellulaire programmée). Ce test est effectué sur un même type cellulaire et requiert parfois une étape de dissociation. En écotoxicologie, il a été couramment utilisé sur de nombreux groupes d'organismes : plantes, planaires, oligochètes, mollusques gastéropodes et bivalves, crustacés, insectes, échinodermes, poissons, amphibiens et mammifères (Jha, 2008). Le nom de ce test vient de la visualisation des noyaux endommagés qui prennent l'aspect de comètes classiquement observées en astronomie avec une tête et une queue (Fig. II.4).



**Figure. II.4 :** Aperçu des résultats de la migration lors d'un test comète (entpe.fr).

✚ **Test des micronoyaux :**

Ce test *in vitro* a été développé à partir des années 1970 sur un grand nombre d'organismes aquatiques (Godet et al., 1993). Il est basé sur la détection de micronoyaux dans le cytoplasme de cellules en division. Les micronoyaux résultent de la perte de tout ou d'une partie d'un chromosome durant la télophase formant un petit noyau supplémentaire séparé du noyau principal de la cellule. Ils peuvent provenir de la non-séparation des chromatides ou encore de cassures de chromosome (Fig. II.5). Ce test est largement utilisé en écotoxicologie.



**Figure. II.5:** Formation d'un micronoyau (Iarmarcovai et al., 2007)

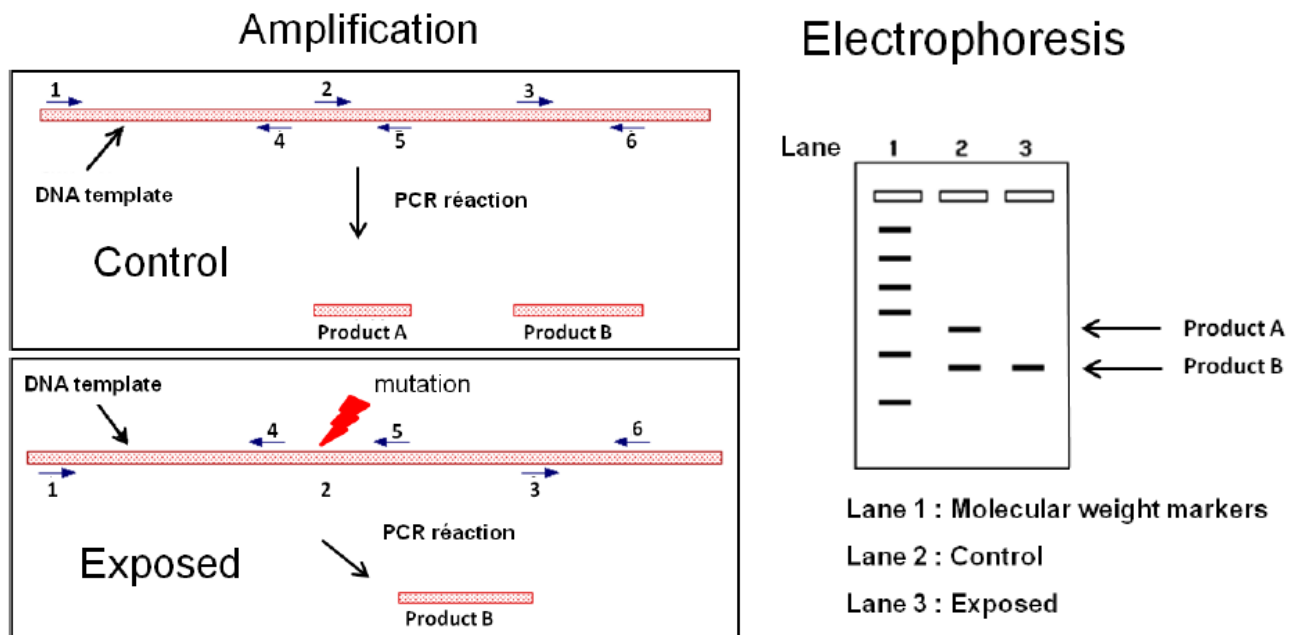
#### 🚦 La méthode RAPD :

La PCR par amorçage aléatoire ou *Random Amplified Polymorphic DNA* (RAPD) est une méthode d'amplification aléatoire de l'ADN dérivée de la technique PCR. A la différence de cette dernière qui requiert un couple d'amorces ciblé sur une partie du génome à amplifier, les réactions RAPD-PCR sont réalisées avec une seule amorce de courte séquence (8 à 12 nucléotides) définie arbitrairement. L'autre grande distinction avec des amplifications classiques vient de la température d'hybridation qui est souvent très faible (34 à 38°C contre >50°C en PCR classique). Après amplification, les fragments (amplicons) sont visualisés sur gel d'agarose à la suite d'une électrophorèse (De Wolf et al., 2004 ; Atienzar et Jha, 2006). L'analyse en RAPD des signes de génotoxicité repose sur la comparaison des profils d'amplification obtenus entre échantillons témoins et exposés (Fig. II.6). Chaque modification (disparition, apparition, augmentation ou diminution d'intensité des amplicons) le long du profil analysé chez des individus exposés à un contaminant peut être reliée à un effet génotoxique (De Wolf et al., 2004; Atienzar et Jha, 2006).

#### II.1.2. Avantages et inconvénients des Méthodes d'analyse :

Un faible nombre d'études utilisent ces 2 méthodes pour caractériser la génotoxicité sur des modèles embryonnaires. Cela est probablement dû à la complexité de l'étape de dissociation cellulaire pour le test comète et à la nécessité d'obtenir des cellules en division pour le test des micronoyaux. De plus, ces deux méthodes sont spécifiques de certains dommages à l'ADN et ne sont applicables que sur un seul type de cellule. Afin de limiter les inconvénients des 2 méthodes décrites ci-dessus et puisqu'aucune donnée n'est actuellement disponible sur le potentiel génotoxiques de substances chimiques chez l'embryon d'escargot, nos recherches se sont donc focalisés sur une autre méthode qui permet la détection d'un large éventail de

mutation dans l'ensemble du génome de l'organisme étudié : la PCR par amorçage aléatoire ou Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD).



**Figure.II.6:** Résumé des principales étapes de la méthode RAPD ((modifiée d'après <http://avery.rutgers.edu/WSSP/StudentScholars/project/archives/onions/rapd.html>)

## II.2 Biomarqueurs :

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).

En fonction de ce qu'ils indiquent, les biomarqueurs sont classés en **trois catégories** principales : Peuvent s'ajouter les **biomarqueurs de défense** et ceux de **dommage** (Tableau. II.1).

**Tableau II. 1 :** Principales catégories de Biomarqueurs

Catégories de biomarqueurs	Description	Exemples
D'exposition	Témoin de la pénétration du polluant dans l'organisme	Conjugaison au GSH, formation d'adduits à l'ADN, induction de MT
D'effet	Témoin de l'effet, toxique ou non, sur une cible critique, après entrée du xénobiotique dans l'organisme	Cassures à l'ADN, enzymes du stress oxydant, réponse lysosomales
De sensibilité / susceptibilité	Témoin de variations génétiques de la réponse par les polluants	Augmentation de la quantité de GST, baisse de sensibilité des AChE
De défense	Réaction de défense d'un organisme exposé à un contaminant	Induction des MT ou de l'activité EROD
De dommage	Altération directe causée à l'organisme par les contaminants toxiques	Cassures à l'ADN, produits de la LPO ; niveaux de VG

### II.2.1 Biomarqueurs d'expositions :

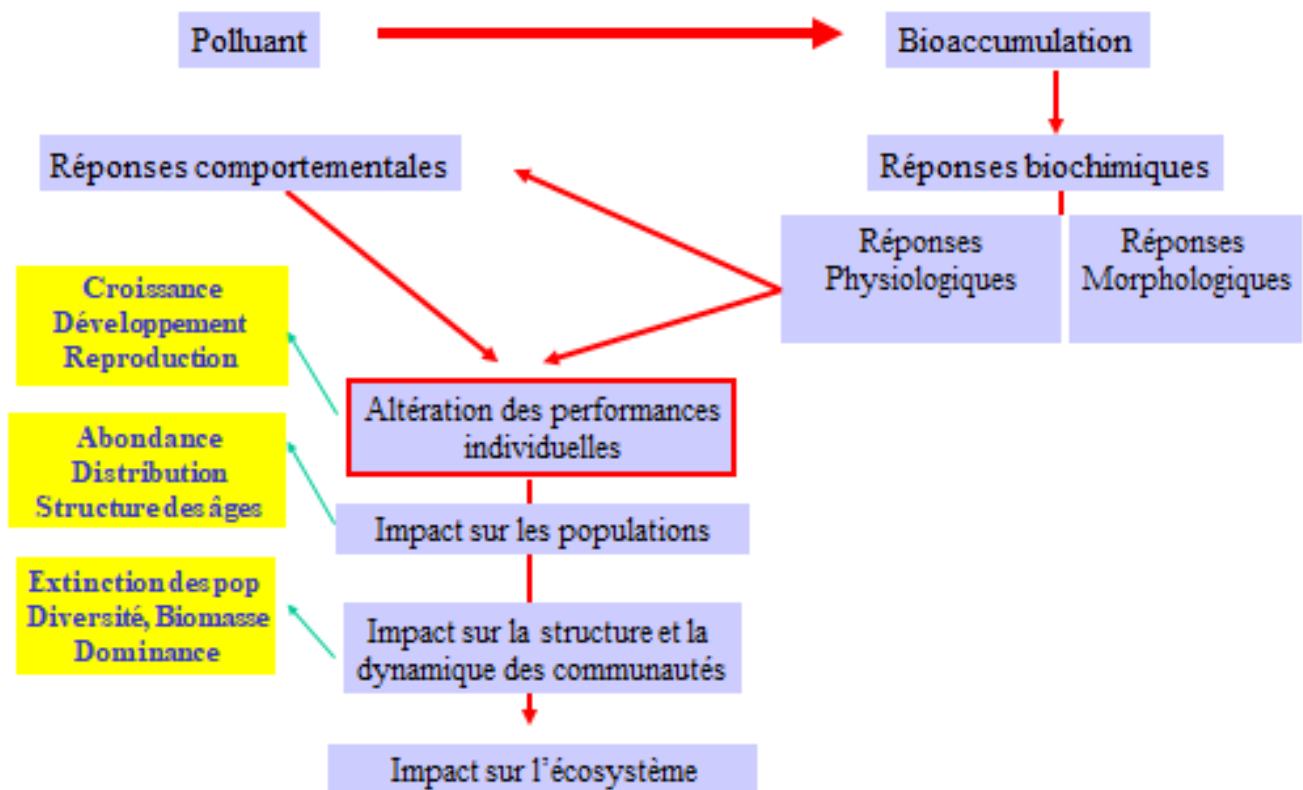
Ils indiquent que le polluant présent dans le milieu a pénétré dans l'organisme. Les biomarqueurs d'expositions sont les résultats de l'interaction du polluant avec des molécules biologiques dans les tissus et les liquides corporels.

### II.2.2 Biomarqueurs d'effets :

Ces biomarqueurs permettent de montrer que le xénobiotique est entré dans l'organisme, et qu'après distribution dans les différents organes ou tissus, il a exercé un effet toxique ou non, sur une cible critique. La réponse de l'organisme regroupe des paramètres moléculaires, biochimiques, histologiques, cellulaires, immunologiques, et physiologiques (Fig. II.7).

### II.2.3 Biomarqueurs de susceptibilités :

Ces biomarqueurs sont liés aux variations d'origine génétique de la réponse d'un organisme à la contamination par un polluant.



**Figure.II.7** : Effets d'un polluant selon le niveau d'organisation biologique

**Les biomarqueurs peuvent être non spécifiques ou spécifiques d'un polluant :**

➤ **Biomarqueurs non Spécifiques**

Ce sont des indices de stress qui donnent une évaluation globale de l'état de santé des organismes sans indiquer le type de contaminant présent dans le milieu marin. Les protocoles de mesure de ces indicateurs sont généralement faciles à mettre en pratique, ne requièrent pas d'équipements sophistiqués et s'avèrent très peu onéreux. Parmi les biomarqueurs non spécifiques certains permettent cependant d'évaluer l'altération d'un organe particulier après exposition : c'est le cas des tests de fonctionnement d'organes, des tests histopathologiques, des dosages d'enzymes et isoenzymes particulières dont l'activité métabolique est liée à l'organe à évaluer (par exemple dosages sanguins du lactate déshydrogénase, la créatinine phosphokinase, l'alkaline phosphatase).

**Exemple de biomarqueur non spécifique : la peroxydation lipidique**

Lorsque des molécules réactives contiennent un ou plusieurs électrons non appariés, on assiste à la formation de composés instables, capables de générer d'importants dommages tissulaires et membranaires dans l'organisme : ce sont les radicaux libres. Ces derniers peuvent avoir une origine exogène, par l'action de certains polluants organiques et métalliques par exemple, sur des composants cellulaires (Ribera, 1990). La production de radicaux libres dans une cellule entraîne différentes conséquences cytotoxiques, dont l'inactivation des systèmes enzymatiques, la dégradation des protéines, l'altération de l'ADN et surtout la détérioration de la membrane cellulaire par attaque de ses acides gras constitutifs, ce qui se traduit par des phénomènes de peroxydation lipidique. La méthode d'évaluation de ce phénomène consiste alors à doser un des produits finaux de dégradation des acides gras, le Malondialdéhyde (MDA), dont la teneur est en relation étroite avec les dégradations de la membrane cellulaire et d'une manière générale, avec le stress oxydant subi par les cellules de l'organisme ; la peroxydation lipidique peut également être estimée par la mesure de l'activité des défenses anti radicalaires, qu'elles soient enzymatiques (catalase, superoxyde dismutase) ou non (glutathion, vitamines A, E et C).

➤ **Biomarqueurs Spécifiques**

Les biomarqueurs spécifiques d'un polluant sont eux, révélateurs de l'exposition à un composé chimique ou un groupe de composés appartenant à la même famille chimique et sont représentés par certaines activités enzymatiques particulières ou certaines biomolécules particulières dans les tissus. Parmi les enzymes et les protéines qui donnent une réponse spécifique à un type de polluant, nous pouvons citer:

- l'acétylcholinestérase, dont l'activité dans le système nerveux et le plasma est inhibée par les Pesticides organophosphorés.
- le système cytochrome P450 mono-oxygénases.
- les métallothionéines et les protéines fixatrices de métaux.
- la  $\delta$  -aminolévulinique acide déshydratase (ALAD).

Les recherches se sont orientées récemment vers de nouveaux types de biomarqueurs tels que les modifications de la réponse immunitaire après exposition à un composé toxique qui pourraient permettre de développer des immunotests utilisables en milieu naturel (études récentes sur les petits mammifères et les poissons, et tels que les modifications biochimiques associées à l'apparition de mutations et de cancers. Citons aussi plus largement d'autres biomarqueurs spécifiques et les contaminants qui Leur sont associés.

**Exemple : activité ethoxyresorufine O-deethylase (EROD)**

Le protocole de mesure de l'activité EROD, consiste à fournir à cette enzyme un substrat, l'ethoxyresorufine, dont la réaction catalysée de dééthylation (c'est à dire la perte d'un groupement éthyle CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-, d'où l'appellation d'activité "dééthylase") libère de la résorufine (ou hydroxyresorufine), molécule qui possède la propriété naturelle de fluorescence. Il est possible de quantifier cette fluorescence au moyen d'un appareillage adéquat (spectrofluorimètre) et l'intensité de la fluorescence mesurée est directement proportionnelle à la quantité de résorufine formée, elle-même corrélée à la quantité d'enzymes actives lors de la mesure. L'efficacité de cette méthode pour mesurer les effets biologiques in situ de polluants d'importance aussi grande que les hydrocarbures dans le milieu marin a été confirmée au point qu'elle est aujourd'hui intégrée en routine dans les programmes de bio-surveillance

**II.2.4 Caractéristiques des biomarqueurs : La réponse du biomarqueur doit être**

- ✓ **sensible** : La réponse du biomarqueur est-elle plus sensible qu'une mesure de critères plus conventionnels, tels que la mortalité individuelle ou la reproduction ?
- ✓ **spécifique** : La réponse peut-elle être reliée à une exposition à un contaminant ou une famille de contaminants.
- ✓ **Précoce** : L'utilisation de réponses biologiques précoces en écotoxicologie est basée sur l'hypothèse que le temps de réponse biologique augmente avec le niveau d'organisation biologique (Fig. II.8).

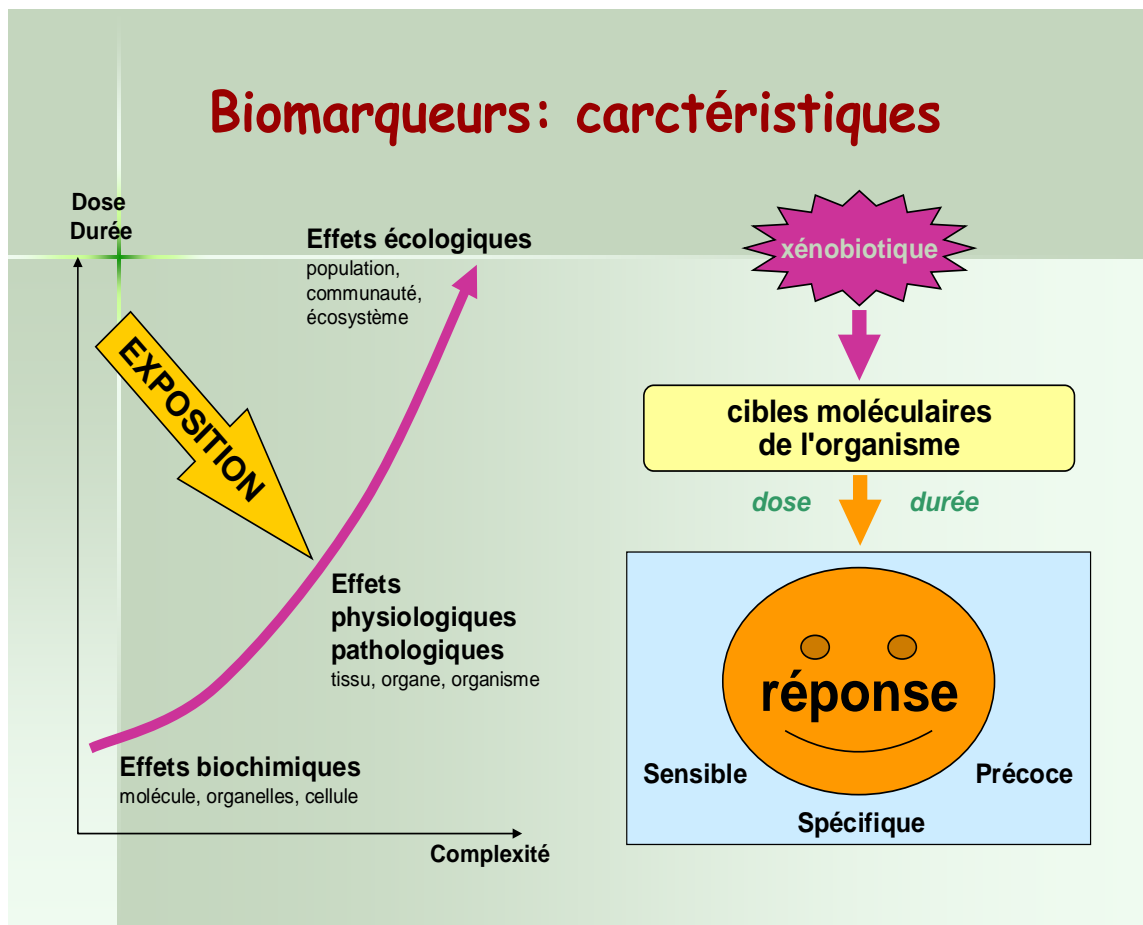


Figure.II.8 : Caractéristiques des biomarqueurs (Bispo *et al.*, 2009)

## II.3 Bioindicateurs et espèces sentinelles :

### II.3.1 Les Bioindicateurs :

Espèces ou groupes d'espèces dont les propriétés biologiques (mode de vie, physiologie) sont utilisées pour déterminer les niveaux de contamination d'un biotope.

#### ✓ Concept et utilisation de bioindicateurs de la qualité du milieu :

Parmi les bioindicateurs, deux catégories ont été distinguées (Fig. II.9) :

#### II.3.1.1 Bioindicateur d'accumulation :

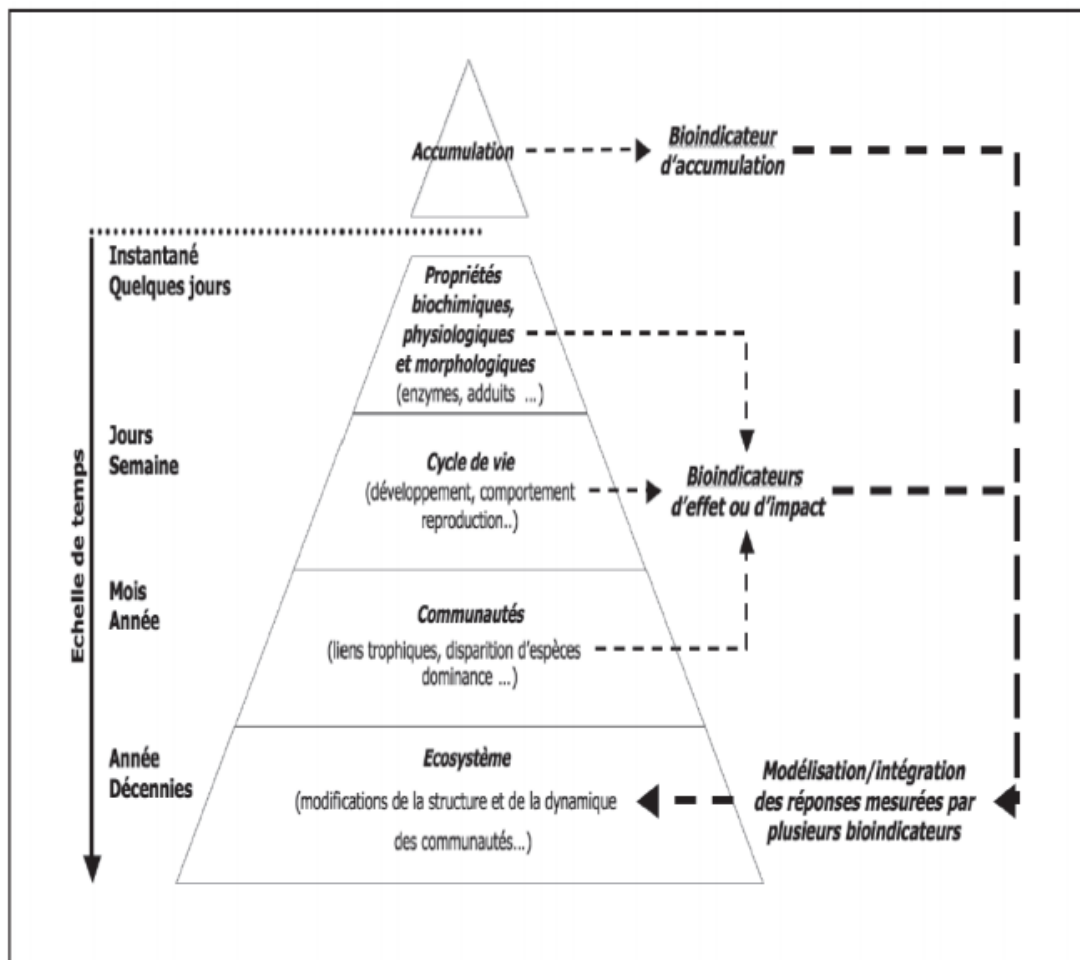
Organisme (ou partie d'un organisme ou communauté d'organismes) qui accumule une ou plusieurs substances issues de son environnement, permettant ainsi d'évaluer son exposition.

#### II.3.1.2 Bioindicateur d'effet ou d'impact :

organisme (ou partie d'un organisme ou communauté d'organismes) qui permet de révéler des effets spécifiques ou non lors de l'exposition à une ou plusieurs substances issues de son environnement (issues d'épandages de déchets, des pratiques agricoles, de dépôts atmosphériques ou bien de contaminations

industrielles) ou à d'autres stress anthropiques ou naturels (ex : tassement, changement d'usage, statut de la matière organique). Ces effets, proportionnels ou non à l'exposition, incluent des modifications morphologiques, histologiques ou cellulaires, métaboliques, de comportement ou de structure de populations.

Certains indicateurs sont mieux adaptés que d'autres pour mettre en évidence des changements à long terme des écosystèmes (les modifications, adaptations de communautés peuvent parfois être très longues à se produire et se stabiliser). Au contraire, d'autres indicateurs biologiques tels que des modifications cellulaires ou métaboliques, permettent de détecter des effets précoces qui peuvent par la suite se transformer en atteintes irréversibles sur l'individu, la communauté ou l'écosystème. La détection de ce type d'effet permettrait de prévenir les risques à long terme (ex : effets chroniques, mutations).



**Figure.II.9 :** les différents niveaux de réponse des bioindicateurs (Bispo et al., 2009)

Depuis longtemps, les écotoxicologues se sont penchés sur les caractéristiques que devraient posséder une espèce bioindicatrice idéale. Bien que ces caractéristiques aient été établies dans le cas des polluants des eaux, elles peuvent être généralisées à tous les types de contaminants.

### II.3.1.3 Propriétés d'un bon bioindicateur :

1. Tous les individus de l'espèce bioindicatrice devraient présenter une corrélation identique et simple entre leur teneur en la substance polluante et la concentration moyenne de cette dernière dans le biotope.
2. L'espèce devrait être capable d'accumuler le polluant sans être tuée ni même que sa reproduction en soit perturbée par les niveaux maximum du polluant observés dans l'environnement
3. L'espèce devrait être sédentaire afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec la localisation géographique considérée
4. L'espèce devrait être abondante dans l'ensemble de l'aire étudiée
5. Les espèces à forte longévité sont préférables (échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire, exposition à un contaminant pendant de longues périodes).
6. L'espèce devrait être de taille suffisante
7. L'espèce devrait être facile à échantillonner et suffisamment résistante pour être amenée en laboratoire

**Nb : En réalité, aucune espèce ne peut répondre à la totalité de ces critères donc nous choisissons celle qui en renferme le maximum.**

➤ **Bioindicateurs Selon Les Milieux :** Selon le type de milieu la terre, l'eau et l'air, et dont chacun d'eux est liée par les phénomènes de flux qui régissent la biosphère, on peut distinguer :

- **Bioindicateurs de la Qualité de l'eau** -Bioindicateurs de la Qualité des Milieux Marins.  
- Bioindicateurs de la Qualité des Milieux d'eau douce.
- **Bioindicateurs de la Qualité du sol**
- **Bioindicateurs de la Qualité de l'air**

### II.3.1.4 Intérêt des biomarqueurs :

La recherche de biomarqueurs est un secteur en plein développement de l'épidémiologie humaine l'EPA a fixé comme priorité la recherche de biomarqueurs d'exposition à des produits chimiques considérés comme présentant un risque élevé (benzène, trichloréthylène, acrylamide, styrène, nicotine, plomb) ou à des classes de produits tels que les polychlorobiphényles et les dioxines ; en terme d'effets, ce sont des biomarqueurs de cancer, de neurotoxicité, d'immunotoxicité, de toxicité pulmonaire et des biomarqueurs des troubles de la reproduction et du développement qui seront les objectifs prioritaires de la recherche.

Les biomarqueurs ont donc un intérêt potentiel considérable pour prédire les effets de la pollution environnementale chez l'homme, espèce à très haut risque. D'autres espèces animales à risque, les poissons ou les espèces placées au sommet des chaînes alimentaires, comme les rapaces, les oiseaux piscivores, les petits mammifères carnassiers, devraient bénéficier aussi des avancées dans le domaine humain.

Parallèlement, les biomarqueurs seront recherchés aussi dans les populations d'animaux sentinelles, avec l'avantage, déjà mentionné, que les examens biochimiques et les explorations fonctionnelles peuvent être beaucoup plus poussés que chez l'homme.

D'une manière générale, et plus particulièrement pour la surveillance des écosystèmes d'eau douce, il faut souligner qu'on ne dispose pas de méthodologies basées sur une stratégie raisonnée pour le choix des biomarqueurs, le choix des espèces, non plus que pour la mise en œuvre d'un échantillonnage adapté aux objectifs : évaluation du risque chimique dans l'écosystème, surveillance à long terme de la qualité écologique d'un milieu, sélection d'options de restauration. Une telle stratégie reste à élaborer pour une utilisation pertinente et efficace des biomarqueurs maintenant disponibles.

### **II.3.2 Les espèces sentinelles :**

Les espèces sentinelles sont des organismes choisis comme modèles d'étude afin d'étudier l'effet ou le comportement d'un ou de plusieurs composés (ou d'une pollution) ou de mettre au point une méthode de détection d'une pollution, elles **ont la capacité de mettre en évidence des signes précurseurs d'altération du milieu naturel avant même que les effets soient ressentis à l'intérieur du milieu affecté. Ils agissent par conséquent comme une sorte de signal d'alarme pour l'ensemble de l'écosystème.** Ce sont donc des espèces couramment utilisées lors de tests écotoxicologiques en raison d'un certain nombre de caractéristiques : facilité de manipulation, facilité d'élevage en laboratoire (afin de disposer de stocks d'organismes pour réaliser des expériences), sensibilité à certains types de polluants (comme les perturbateurs endocriniens), représentativité d'une famille d'êtres vivants (les poissons, les mollusques, etc.). Parmi les espèces sentinelles les plus utilisées en écotoxicologie, on peut citer:

- **Organismes aquatiques** : la daphnie, le gammare, le gastéropode *Potamopyrgus antipodarum*, le poisson zèbre, l'algue d'eau douce *Pseudokirchneriella subcapitata*, le chironome, etc.
- **Organismes terrestres** : le ver de terre *Eisenia fetida*, l'abeille, etc.

#### **II. 3.2.1 Critères de sélection d'une espèce appropriée :**

Les bioindicateurs sont des outils qui, lorsqu'ils sont utilisés efficacement, nous renseignent sur les différentes forces agissant sur un écosystème ainsi que sur les conditions actuelles et l'état vers lequel il évolue. On peut trouver des animaux sentinelles dans plusieurs groupes zoologiques ; Les invertébrés terrestres (vers de terre, insectes, etc.) et aquatiques (coquillages, crustacés, insectes) sont en général abondants et faciles à récolter. La mesure des concentrations de polluants présentes dans leurs tissus peut apporter des informations intéressantes sur le degré de contamination du milieu et les possibilités de bioconcentration et de bioaccumulation ultérieures. Les reptiles et les amphibiens, moins fréquents, plus difficiles à collecter, ont été peu utilisés. Les oiseaux, comme les poissons, sont considérés comme des espèces à risque, victimes des effets nocifs de la pollution environnementale, mais certaines espèces

d'oiseaux pourraient servir d'animaux sentinelles, comme les Goélands, très nombreux autour des sites de décharge. Les Pigeons sont présents en abondance dans les grandes villes ; ils ont été utilisés au Japon pour surveiller la pollution par le plomb. Les animaux domestiques (Chien, Chat, animaux d'élevage) sont de bonnes sources de renseignements sur le degré de pollution des milieux qu'ils fréquentent. Les petits mammifères sont en général abondants, avec des déplacements limités. Ils sont plus proches de l'homme sur le plan évolutif que les invertébrés ou les oiseaux et sont de bons candidats pour la surveillance des écosystèmes terrestres. **Une « bonne » espèce d'animal sentinelle doit remplir plusieurs conditions :**

**1- Possibilité de capture relativement facile :** des échantillons des populations locales doivent pouvoir être capturés assez rapidement et en quantité suffisante. Un facteur particulièrement difficile à apprécier est la représentativité de l'échantillon par rapport à la population concernée.

**2- Densité de population suffisante,** permettant des prélèvements qui ne modifient pas la structure ou l'importance numérique des populations.

**3- Aire de dispersion connue :** le degré de résolution géographique demandé peut justifier le choix d'une espèce ou d'une autre. Les bivalves ont l'avantage d'être des espèces résidentes ; des campagnols avec une aire de dispersion de quelques dizaines de mètres sont utilisables pour des zones polluées de faible importance, tandis que des espèces comme des lapins ou des lièvres peuvent se justifier pour des aires beaucoup plus étendues.

**4- Animaux de taille suffisante :** permettant de pratiquer facilement des mesures de concentrations de polluants ou des examens biologiques ou biochimiques.

**5- Voies d'exposition connues :** elles sont déterminées par l'habitat et les préférences nutritionnelles de l'espèce. Dans les milieux terrestres, les rongeurs herbivores sont exposés autrement que les espèces omnivores, ainsi le Campagnol terrestre consomme les racines et les parties vertes des végétaux, alors que d'autres espèces consomment des graines ; les musaraignes se nourrissent d'invertébrés.

**6- Possibilité de disposer d'animaux témoins :** c'est un élément fondamental du dispositif, mais c'est aussi le plus difficile à définir, car les animaux témoins doivent être non pollués, ou du moins présenter un niveau de pollution suffisamment bas pour être considéré comme acceptable. Les espèces communes, répandues sur tout le territoire et pouvant être collectées dans beaucoup d'endroits, sont les plus intéressantes de ce point de vue ; elles facilitent aussi le suivi à long terme et la confrontation de données provenant de différentes zones géographiques. Pour échapper à l'obligation de délimiter des zones témoins, on peut disposer d'animaux témoins de la même espèce, maintenus au laboratoire dans des conditions semi-naturelles.

**7- Existence d'autres études sur la même espèce.**

**EXEMPLE :**

Les grenouilles : sentinelles de la santé des écosystèmes aquatiques en milieu agricole. Dans un écosystème, l'espèce sentinelle (plante ou animal) joue un rôle similaire en nous renseignant sur l'état de son environnement et en sonnant l'alarme en cas de risques potentiels. Pour sonder l'état de santé des lacs et des rivières, certaines espèces de poissons sont utilisées avec succès comme sentinelles. Mais en milieu agricole, les plans d'eau sont souvent des ruisseaux, des étangs ou des marécages et les poissons s'y trouvent en espèces et en nombre limités. C'est pourquoi les grenouilles, lorsqu'elles sont présentes, offrent une excellente alternative.

Une équipe de chercheurs observe les ouaouarons de la rivière. Ils cherchent ainsi à vérifier leur hypothèse selon laquelle plus l'activité agricole est importante, plus augmente également la probabilité de contamination de l'eau avoisinante et le risque d'altérer la santé des grenouilles vivant dans ces écosystèmes.



**II. 3.2.2 Utilisations des systèmes d'animaux sentinelles :**

Les animaux sentinelles ont de multiples applications dans l'évaluation toxicologique des milieux pollués. L'étude d'une ou de plusieurs populations d'animaux sentinelles vivant dans des zones polluées peut servir à l'évaluation ponctuelle de la pollution du site ; degré de contamination, biodisponibilité des polluants présents pour les animaux et effets toxiques qui peuvent en résulter. On peut envisager aussi un suivi à long terme pour établir des niveaux de référence pour des sites pollués et des sites témoins; c'est aussi la possibilité de fournir des systèmes d'alerte pour la détection des risques toxiques ; enfin, c'est un moyen d'évaluer l'efficacité de mesures de décontamination des sites.

**II. 3.2.3 Avantages et limitations des dispositifs d'animaux sentinelles :**

Les animaux sentinelles ne se substituent pas aux tests toxicologiques classiques, ni aux études épidémiologiques humaines, ni aux études démographiques des populations animales, ils sont un complément. Par rapport aux tests toxicologiques, l'avantage évident est d'assurer une exposition des animaux aux polluants dans des conditions naturelles, à des doses réalistes. Un deuxième avantage, les animaux vivant moins longtemps que l'homme, on peut envisager de considérer des effets toxiques sur tout le cycle de vie ou sur plusieurs générations. En cas d'extrapolation à l'homme, nous avons déjà souligné l'intérêt de ne pas être astreint aux considérations éthiques qui limitent les recherches en épidémiologie

humaine : l'animal peut être sacrifié pour des recherches approfondies. Un dernier avantage, dans le cas d'animaux vivant sur le site, est d'assurer l'exposition d'une population, composée d'individus d'âge et de sexe différents, et pas seulement d'individus sélectionnés. Les limitations sont de deux ordres. En premier lieu, il se pose pour les animaux sentinelles le même inconvénient que pour tous les modèles animaux, la difficulté d'extrapoler à l'homme. Deuxième limitation, les animaux collectés dans la nature présentent une variabilité beaucoup plus grande que les souches sélectionnées d'animaux de laboratoire. Dans les études de longue durée, comme le suivi d'un site sur une ou plusieurs années, il est indispensable de contrôler les fluctuations physiologiques dues à des variations saisonnières (par exemple, les cycles annuels de reproduction et les variations de température de l'eau pour les espèces aquatiques) ; dans les études ponctuelles, on tente souvent de s'affranchir de cette variabilité en choisissant une zone témoin avec le maximum de caractéristiques communes avec la zone polluée.

#### **II.4. Qualité écologique des milieux aquatiques :**

##### **III.4.1 Les eaux continentales :**

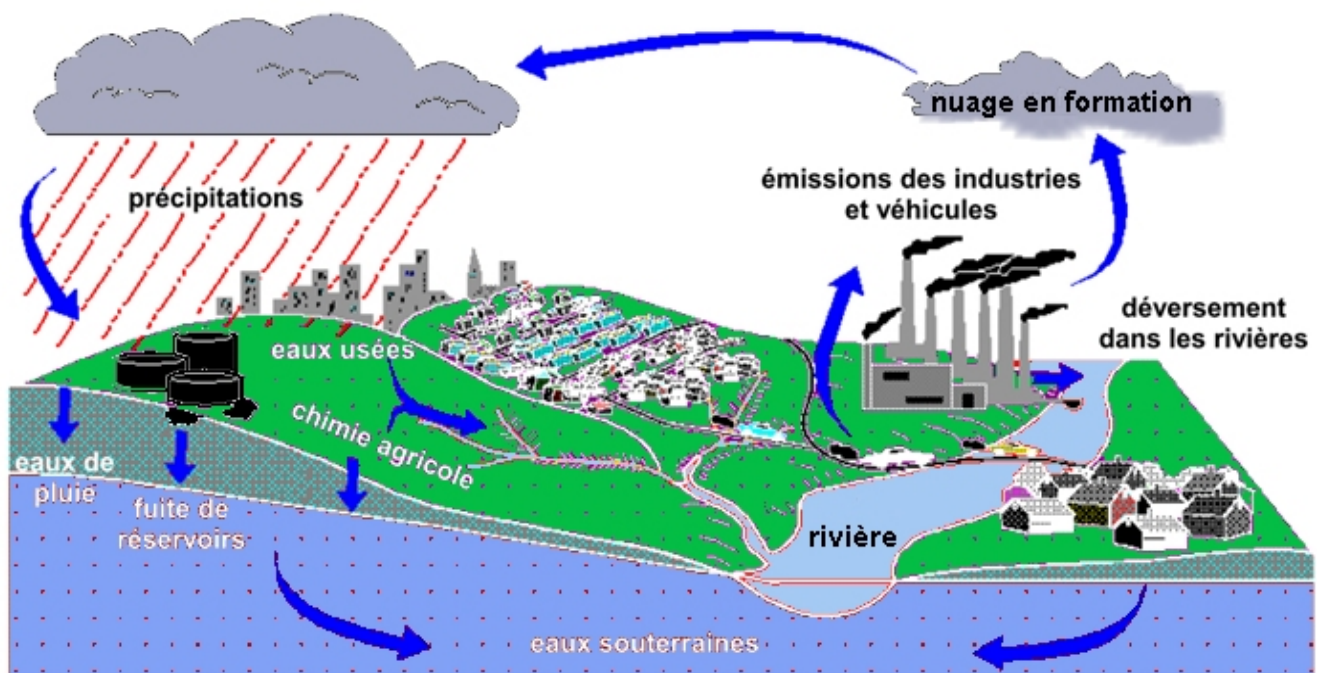
La qualité des eaux continentales est un paramètre déterminant à connaître, car une eau « propre » conditionne la santé des humains ainsi que celle de l'environnement. Ainsi, garantir une eau de qualité devient un enjeu pour un large nombre d'acteurs des territoires (gestionnaires, collectivités locales, entreprises, etc.) dans le but d'une part d'adapter les pratiques afin de respecter les normes de protection de la ressource et d'assurer la durabilité des ressources en eau nécessaires à la prospérité des communautés locales et des activités économiques et d'autre part, si une contamination est avérée de la suivre et de localiser les zones touchées afin de mettre en place des campagnes de nettoyage voire de restauration.

Le niveau de qualité de l'eau requis est habituellement relatif à son utilisation ou à un bon état des eaux à atteindre pour leur préservation. En effet, le niveau de qualité de l'eau ne sera pas forcément le même pour la production d'eau potable, l'irrigation ou encore la production électrique.

**La qualité de l'eau est généralement caractérisée par les propriétés physico-chimiques et la concentration biologique de l'eau** et ces dernières permettent d'évaluer l'état des eaux. Il n'existe pas d'indicateurs uniques pour caractériser la qualité de l'eau. Il en existe plusieurs parmi eux il y a :

- les critères biologiques : l'abondance et la diversité de la faune et la flore, l'abondance des nutriments
- les paramètres physico-chimiques du milieu : la température, la salinité, l'oxygène dissous, la concentration en matière en suspension par exemple. Leurs quantités peuvent varier spatialement et de façon saisonnière indépendamment des contaminations en polluants.

Outre une raréfaction de plus en plus accrue de l'eau, **une dégradation de sa qualité est constatée**. En effet, **l'accroissement des populations et des activités industrielles et agricoles engendre le rejet d'un certain nombre de composés** (Fig. II.9) tels que les nitrates et les pesticides, mais aussi les métaux et autres composés organiques ou inorganiques. Les nutriments azotés et phosphorés sont généralement issus de l'emploi excessif d'engrais minéraux ou organiques dans le secteur agricole ou de rejets industriels et domestiques (ex., détergeant) favorisant le développement d'algues qui appauvrissent les eaux en oxygène (eutrophisation), néfaste pour les organismes aquatiques. Les pesticides qui regroupent les produits phytopharmaceutiques sont essentiellement des produits utilisés pour protéger les cultures ou encore maintenir les routes, les voies ferrées ou autres infrastructures. Les métaux (ex. plomb, cuivre, cadmium) et métalloïdes (ex., arsenic) qui sont quant à eux présents de façon naturelle dans les sols, mais les rejets issus des activités industrielles, agricoles et des transports favorisent la contamination diffuse de ces minéraux dans les eaux et peuvent être toxiques à doses variables pour l'Homme et l'environnement.



**Figure.II.9 :** Cycle simplifié de propagation des polluants anthropiques dans les compartiments naturels.

David Delmail [http://www.univ-ubs.fr/1290600507630/0/fiche\\_\\_\\_article/&RH=ACTU](http://www.univ-ubs.fr/1290600507630/0/fiche___article/&RH=ACTU)

#### II.4.2 Les eaux marines et le littoral :

La succession des marées noires, liées au déversement accidentel de pétrole en mer et le spectacle des déchets jonchant les côtes ont alerté les opinions publiques. Les divers apports polluants chroniques provenant des villes, des fleuves, des activités agricoles, des industries littorales et des rejets des navires peuvent affecter la qualité générale des eaux littorales par des enrichissements en éléments nutritifs, par l'introduction de substances chimiques toxiques (métaux lourds, polluants organiques) et de micro-

organismes pathogènes (microbes, bactéries, virus). La qualité des eaux littorales fait l'objet d'une surveillance permanente, à travers l'existence de différents réseaux d'observation mis en œuvre par l'IFREMER : le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO) pour la qualité générale des masses d'eau et la contamination du milieu par les métaux lourds et les composés organiques toxiques; le réseau de surveillance du phytoplancton (REPHY) pour le suivi de l'apparition des algues phytoplanctoniques toxiques ; le réseau de surveillance microbiologique (REMI) des zones conchylicoles pour la contamination du milieu par les bactéries d'origine terrestre.

#### **II.4. 2.1. La contamination microbienne :**

Une mauvaise qualité des eaux peut provoquer l'infection bactérienne des mollusques et des poissons dans les zones d'élevage. Les agents pathogènes pour l'homme rencontrés dans les eaux marines sont des entérobactéries provenant de l'homme lui-même et des animaux d'élevage. Les plus connues sont les colibacilles (*Escherichia coli*) qui représentent environ 90 % des bactéries fécales et, les salmonelles, les plus dangereuses, qui peuvent provoquer soit des fièvres paratyphoïdes soit des toxi-infections alimentaires. Il est également possible de retrouver des virus pathogènes pour l'homme dans des coquillages filtreurs (cas de l'hépatite A). Les apports des micro-organismes pathogènes dans le milieu marin sont essentiellement dus aux rejets ponctuels des stations d'épuration et aux apports diffus par les eaux de ruissellement dans les régions d'élevage intensif.

#### **II.4.2.2.La contamination chimique :**

Cette contamination peut être due à la présence de métaux lourds ou de composés organiques toxiques.

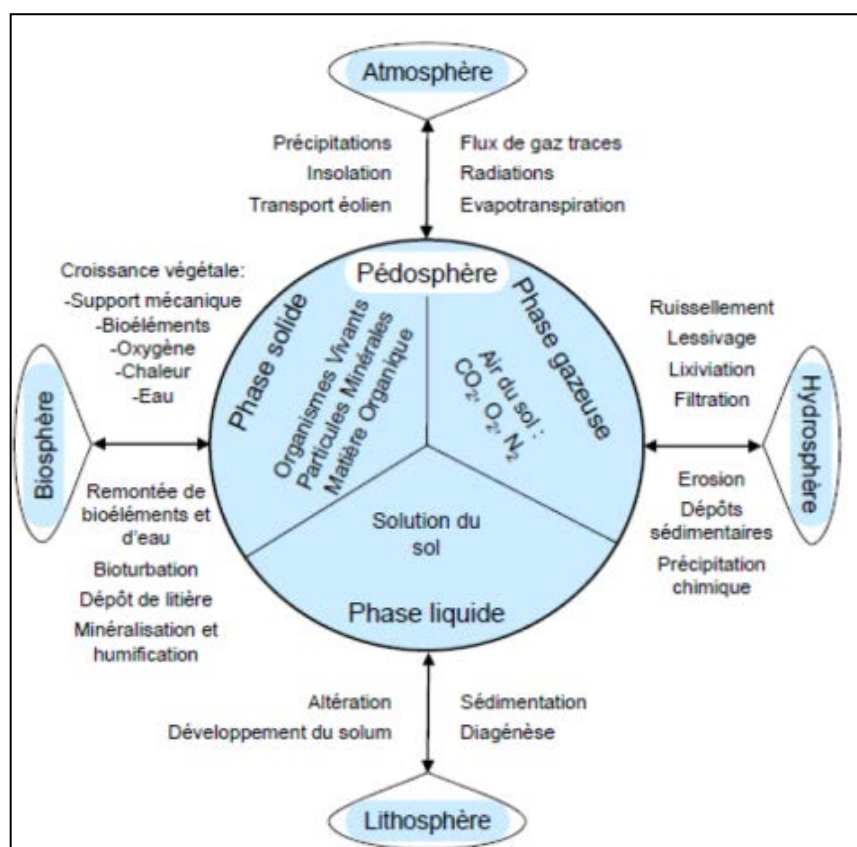
**- Le plomb :** De tous les métaux lourds et autres éléments toxiques contaminant la biosphère, le plomb constitue actuellement, au même titre que le cadmium ou l'arsenic et devant le mercure, le plus préoccupant de ces polluants. La principale cause de pollution par le plomb tient, à l'heure actuelle, en son usage comme antidétonant dans les carburants automobiles, sous forme particules de ce métal qui passent dans l'atmosphère. A cela doivent être ajoutées les quantités libérées involontairement dans l'environnement par les combustions, la métallurgie et autres activités industrielles.

**- Le mercure :** Les biocénoses aquatiques sont particulièrement exposées aux phénomènes de pollution par le mercure et de bioamplification de cet élément. Cela résulte de la grande complexité des réseaux trophiques propres aux milieux limniques et marins ainsi que de leur plus grand nombre de niveaux trophiques que dans les communautés terrestres.

- **Le cadmium** : Le cadmium est utilisé pour le traitement de surface et dans la fabrication de peintures et de piles. Mais c'est surtout au titre de sous-produit de l'exploitation du minerai de zinc qu'il se trouve en quantité importante dans l'estuaire de la Gironde jusqu'à son embouchure et un peu au-delà.
- **Les PCBs** : Les polychlorobiphényles sont des huiles chimiques de synthèse d'une très grande stabilité. Ils sont utilisés dans l'industrie comme agents diélectriques (pyralène des transformateurs et condensateurs), fluides hydrauliques, fluides caloporteurs, adjuvants dans les lubrifiants, peintures, encres. L'utilisation des PCB est à présent strictement réglementée.
- **Le DDT (Dichloro Diphényl Trichloroéthane)** : c'est un insecticide organique chloré de synthèse dont l'efficacité et le faible coût ont largement répandu l'utilisation depuis 1940. Mais sa rémanence et sa toxicité ont conduit à une restriction d'utilisation en de nombreux pays à partir de 1970.
- **le  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane ( $\gamma$ -HCH ou lindane)** : Parmi les isomères de l'hexachlorocyclohexane (HCH), seul l'isomère gamma possède une activité insecticide. Le lindane est un insecticide chloré largement utilisé, notamment contre les termites. L' $\alpha$ -HCH, isomère alpha de l'HCH, est un composé chloré de synthèse qui n'a pas d'activité insecticide. Normalement, il ne doit pas apparaître pour plus de 1 % dans la formulation du lindane.
- **Les HAPs** : Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques constituent un groupe de composés résultant de la fusion de cycles benzéniques. Le plus simple des HAP est le naphthalène (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>), résultant de la fusion de deux cycles benzéniques et le plus complexe le Coronène (~H<sub>12</sub>)' Les HAP sont principalement issus de la combustion incomplète de la matière organique récente ou fossile (pétrole, charbon) dont sont responsables l'activité industrielle et le trafic automobile. Bien que les HAP ne possèdent pas une forte toxicité aiguë pour les homéothermes, ils constituent une classe de polluants dangereux car beaucoup d'entre eux sont de puissants cancérigènes. La présence de substituants alkyles sur leur molécule augmente leur cancérigénicité et leur halogénéation accroît leur toxicité aiguë pour les espèces animales.

## Chapitre III: Ecotoxicologie des milieux terrestres

Le sol est une ressource essentielle pour les sociétés humaines et les écosystèmes. N'étant pas une ressource renouvelable à notre échelle de temps humaine et étant soumis à des pressions de plus en plus importantes (ex : production agricole et forestière, développement urbain et industriel, réseaux de transport...) et à des dégradations (ex : érosion, contaminations ponctuelles et diffuses d'origine atmosphériques, tassement), il est désormais nécessaire d'en assurer la protection afin de permettre le développement durable des sociétés. Pour mettre en place, suivre et assurer les actions de protection et de gestion, il convient de définir des indicateurs qui permettent d'identifier et de quantifier les perturbations, les transformations du sol et les impacts sur les écosystèmes. Les indicateurs classiquement utilisés reposent essentiellement sur des propriétés physiques et chimiques du sol alors que les paramètres biologiques intègrent l'ensemble des stress environnementaux (pollution chimique, état physique du sol, variations climatiques, modifications biologiques...) et renseignent sur l'état global du sol. Le sol est un compartiment complexe, un carrefour multifonctionnel, en relation avec lithosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère (Fig. III. 1). Il est le résultat de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie et des échanges d'énergie qui s'y manifestent.



**Figure. III.1** : Organisation du sol et principales relations avec les autres compartiments (Gobat et *al.*, 2010)

### III.1 Biodisponibilité et accumulation des métaux dans les sols/transferts vers les eaux :

L'industrie métallurgique est à l'origine des principales contaminations métalliques de l'environnement. Déversés dans l'environnement, les métaux s'accumulent principalement dans les sols. Les sols se comportent alors comme des réservoirs de polluants constituant ainsi une source potentielle de pollution au gré des changements de certains paramètres physicochimiques du milieu (pH, potentiel redox,...). Il en résulte alors de réels problèmes d'ordre environnemental. En effet, leur lessivage peut être à l'origine de leur accumulation le long des chaînes alimentaires et ainsi entraîner des problèmes de santé publique. Les éléments métalliques dans les sols ont deux origines : une naturelle issue de l'altération de la roche-mère et une liée à l'activité humaine. Un sol développé sur une roche riche en un élément donné sera obligatoirement riche en cet élément. Les métaux issus de cet héritage constituent le fond pédogéochimique, qui correspond aux teneurs en éléments, résultant de phénomènes géologiques, pédogénétiques, en l'absence de toutes contaminations liées à l'activité humaine (Baize, 1997). La gamme des valeurs couramment observées dans les sols non contaminés est présentée dans le Tableau III.1

**Tableau III.1** : Teneurs en éléments métalliques (mg/kg-1) dans des sols (horizons divers de sols) (RMC, 2002).

	Sols "ordinaires" de toutes granulométries	Anomalies naturelles modérées	Fortes anomalies naturelles
Zn	10 - 100	100 - 250	250 - 3800
Pb	9 - 50	60 - 90	100 - 3000
Co	2 - 23	23 - 90	105 - 148
Cu	2 - 20	20 - 62	-
Cr	10 - 90	90 - 150	150 - 534
Ni	2 - 60	60 - 130	130 - 480

Les modes d'apport des métaux dans les sols liés à l'activité humaine peuvent être regroupés en 3 catégories:

- **Les pratiques agricoles** : il s'agit d'impuretés présentes dans les engrais, les amendements calcaires, les produits de traitement phytosanitaires (par exemple, sels de cuivre ou arséniate de plomb), ou les boues de station d'épuration.
- **La diffusion aérienne** : il s'agit de poussières et aérosols provenant notamment des activités industrielles.
- **Les apports massifs localisés** : il s'agit d'apports accidentels, ou résultants d'activités de longue durée sans protection contre la dispersion (fuites, lessivage, ...) dans l'environnement.

### III.1.1. Biodisponibilité et accumulation des métaux dans les sols :

❖ La biodisponibilité d'une substance chimique désigne la capacité d'un élément présent dans le sol à être absorbée par un être vivant. Cette notion est très importante dans l'évaluation du risque écotoxicologiques dont la pertinence repose notamment sur l'aptitude à prédire quelle sera la fraction contaminante des micropolluants susceptible d'exercer une action toxique sur les organismes.

La mobilité d'un métal donné dépend du type de sol, de sa texture, et des paramètres qui affectent les interactions des métaux avec ce sol. Il s'agit principalement du pH, de la teneur en carbonates, de la teneur en matière organique et du potentiel redox. Elle dépend également de la nature de la contamination et des conditions environnementales (Sahuquillo et *al.*, 2003). Il est donc nécessaire de comprendre les interactions possibles entre les métaux et le sol de manière à estimer leur mobilité et leur biodisponibilité vis-à-vis des plantes. Les métaux présents dans la phase solide, se répartissent entre la fraction organique et la fraction minérale. Les oxydes métalliques, la matière organique, les argiles, les carbonates et la silice sont impliqués dans la rétention des métaux.

La mobilité joue un rôle majeur dans le comportement et les transferts des métaux dans les sols, il est primordial de connaître les paramètres pouvant l'influencer. La distribution des éléments métalliques entre les phases constitutives du sol peut être modifiée par un certain nombre de facteurs et par les conditions du milieu : les conditions acido-basiques, la présence de complexant, l'état d'oxydation mais aussi l'action des microorganismes.

❖ accumulation des métaux dans les sols : L'affinité des ETM pour les différentes phases du sol dépend en partie de leurs caractéristiques intrinsèques (masse, charge, rayon atomique). Ainsi une affinité particulière pour certaines phases du sol est observée pour chaque ETM et par opposition pour la solution du sol. La propension d'un cation métallique pour la phase aqueuse est traduite par son caractère labile, qui va généralement de pair avec une mobilité importante au sein du profil de sol et une toxicité élevée. Cependant, les conditions physicochimiques du sol peuvent accroître comme réduire la labilité des ETM. Celles-ci sont caractérisées par un nombre limité de variables, généralement qualifiées de paramètres pédologiques.

#### ❖ Facteurs influençant la mobilité :

- **Acidité et pH** : Le pH des sols est l'une des propriétés essentielles déterminant le comportement des éléments chimiques (Tableau 4). Il tient un rôle majeur dans la mobilité des ETM, notamment dans leur mise en solution et leur mobilité à travers le solum. La diminution du pH de la solution du sol est accompagnée par un accroissement du nombre de protons dans la solution, qui entrent en compétition avec les cations métalliques adsorbés sur la CEC et provoquent finalement leur libération dans la phase aqueuse.

- **Etat d'oxydo-réduction** : Les conditions d'oxydo-réduction (Eh) déterminent le comportement des éléments chimiques à plusieurs valences (Fe, Mn, Cr, S, N). Elles mesurent l'aptitude d'un milieu à fournir les électrons à un agent oxydant ou à retirer des électrons à un agent réducteur. L'Eh des sols varie souvent avec les conditions d'hydromorphie, principalement dans les zones de battement de nappes. Elle influence la capacité d'un ETM à se fixer sur une phase réceptrice en modifiant le degré d'oxydation de l'élément, ou celui de la phase. Une modification du produit de solubilité de cette association potentielle peut de ce fait intervenir, en la privilégiant ou en la défavorisant.

- **Force ionique** : La solution du sol se compose d'eau, des substances minérales dissoutes constituées essentiellement de divers anions (nitrates, bicarbonates, chlorure, sulfates) et cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), et de matières organiques dissoutes dont la composition est similaire à celle des acides humiques et fulviques.

- **Température et humidité du sol** : Elles jouent un rôle indirect en favorisant l'activité biologique du sol, et donc la production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques, l'élévation de la température agit directement sur la dissolution de composés fixant les ETM, facilitant ainsi leur absorption par la flore.

- **Facteurs microbiologiques** : Les micro-organismes présents dans le sol se différencient par leur très grande diversité métabolique. Ils agissent sur la mobilité des éléments traces minéraux dans le sol par la mise en œuvre de diverses voies métaboliques qui influent sur leur spéciation et aboutissent, soit à leur solubilisation dans la phase liquide, soit à leur précipitation. Par ailleurs, certains micro-organismes ont la capacité d'utiliser comme donneur ou comme accepteur d'électrons des éléments ou composés métalliques.

### **III.1.2. Transferts vers les milieux aquatiques :**

Les eaux météoriques et l'irrigation sont les principales sources d'eau dans les sols. Une partie est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface. L'autre partie pénètre dans le sol et est alors absorbée par les racines des plantes ou se dirige vers les horizons profonds et les nappes phréatiques (Fig. III.2). L'importance relative de ces transferts est très variable et dépend d'un ensemble de paramètres, parmi lesquels le type de sols (argileux, sableux, limoneux), l'emplacement sur le bassin versant (crête ou talweg), les propriétés chimiques (pH, Eh) et le métal (nature, forme chimique). Au cours de ces transports, l'eau se charge en éléments dissous. Les transferts des éléments métalliques vers les milieux aquatiques posent surtout un problème de toxicité vis-à-vis de l'ensemble des écosystèmes aquatiques, d'autant plus qu'une fois dans les eaux, ces métaux peuvent avoir une mobilité accrue. Dans les eaux souterraines par exemple, les colloïdes jouent un rôle prépondérant dans le transport des éléments métalliques (Honeyman, 1999).



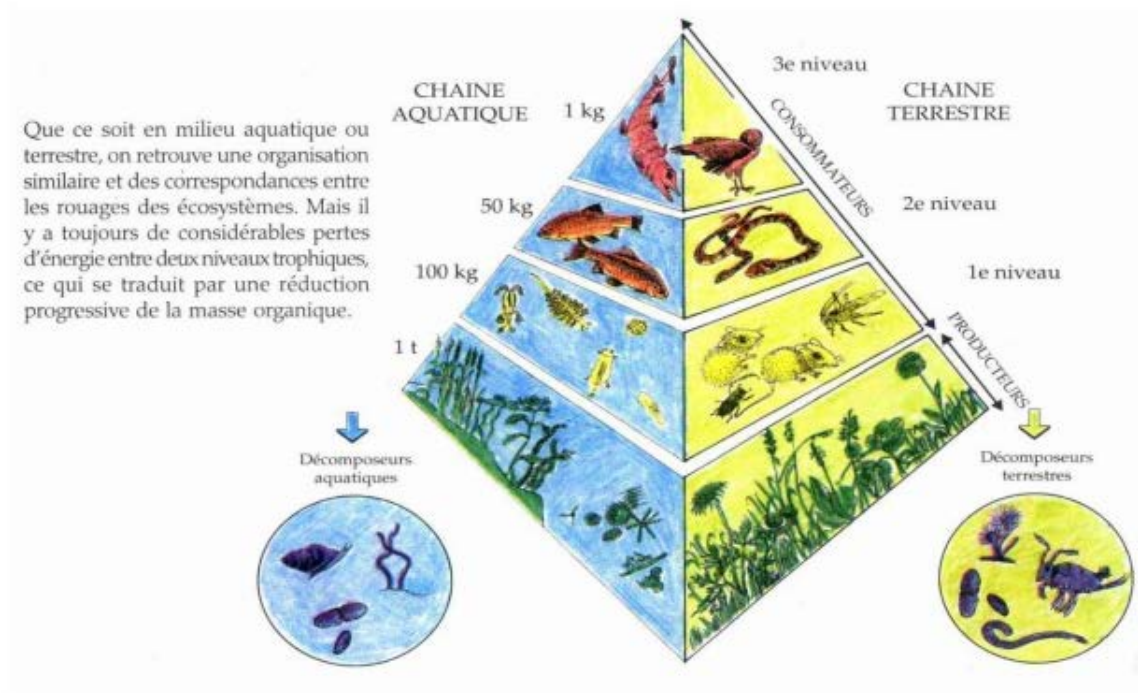


Figure. III.2 : Pyramide trophique (lamaisondalzaz.wordpress.com)

Le sol est le principal compartiment par lequel les microorganismes du sol, les plantes terrestres et les invertébrés du sol peuvent être exposés par contact direct. Le contact direct réfère au contact, toutes voies confondues, avec le compartiment environnemental considéré sans distinguer les phases dans lesquelles se trouve le contaminant, ni les voies d'exposition précises.

### III.2.1. Facteur de transfert $F_T$ : bioamplification

Si on observe l'ensemble du réseau trophique, les consommateurs du rang élevé présentent des concentrations plus élevées que ceux des échelons qui les précèdent. C'est le cas pour le DDT, l'Hg (pas pour le Cu et Cd). Cependant, cela reste un phénomène relativement rare.

Notons que plus le composé toxique est stable, plus il est lipophile et plus la chaîne alimentaire est longue, plus importantes seront les teneurs en bout de chaîne. C'est le cas du Hg, connue pour la maladie de Minamata (1956) qui est inscrit sur la liste noire des polluants (Convention de Barcelone).

Ce phénomène d'amplification le long de la chaîne trophique, est appelé la bio-magnification (ou bioamplification).

Il est caractérisé par le facteur de transfert  $F$  :  $F_T = \frac{[\text{Substance}]_{\text{organisme}}}{[\text{Substance}]_{\text{organisme niveau inférieur}}}$

$F_T > 1$  bioamplification ;  $F_T = 1$  simple transfert ;  $F_T < 1$  diminution de la concentration (fig. III.2).

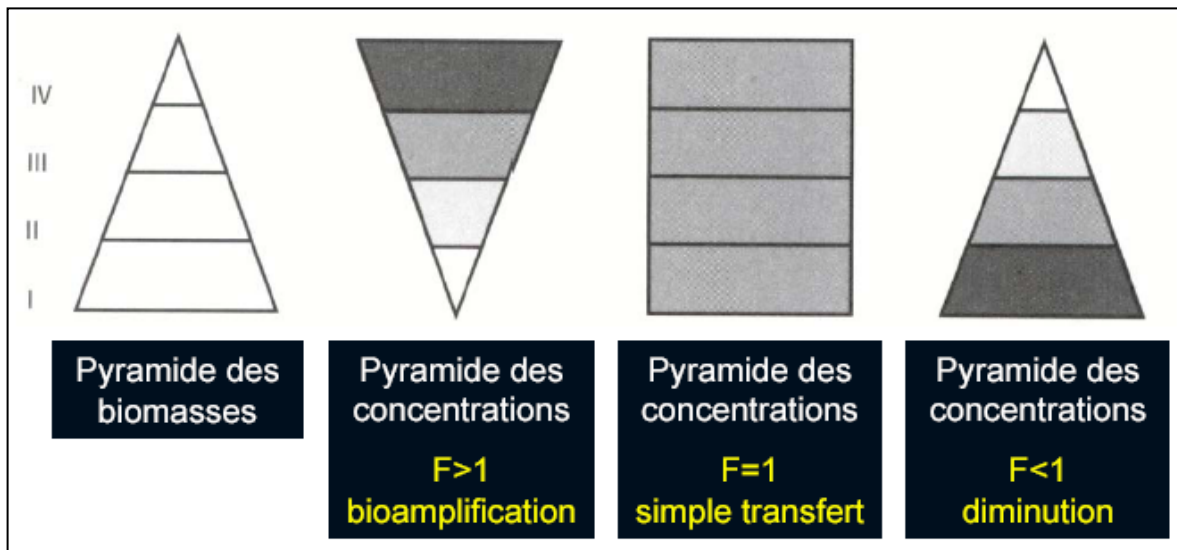


Figure. III. 2 : Pyramides des biomasses et des concentrations d'un polluant dans les réseaux trophiques.

**III.2.2. 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.

Exemple de calcul du facteur de concentration (Fc)

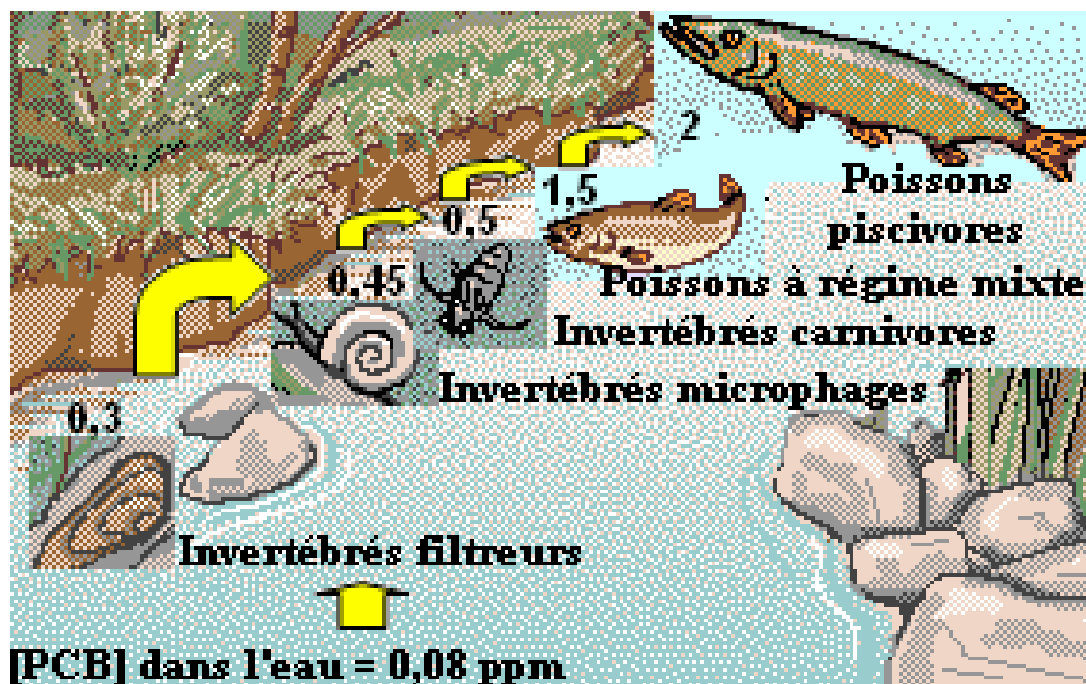


Figure.III.3 : Exemple de calcul de facteur de concentration

Le facteur de concentration (Fc) est défini comme étant le rapport de la concentration d'un polluant dans un organisme à sa concentration dans le biotope.

Dans le cas du PCB :

$$Fc = [\text{PCB}] \text{ organisme} / [\text{PCB}] \text{ eau} / \text{sol}$$

Application numérique :

- $Fc1 = [\text{PCB}] \text{ invertébrés filtreurs} / [\text{PCB}] \text{ eau} = 0,3 / 0,08 = 3,75$
- $Fc2 = [\text{PCB}] \text{ invertébrés microphages} / [\text{PCB}] \text{ eau} = 0,45 / 0,08 = 5,62$
- $Fc3 = [\text{PCB}] \text{ invertébrés carnivores} / [\text{PCB}] \text{ eau} = 0,5 / 0,08 = 6,25$
- $Fc4 = [\text{PCB}] \text{ poissons à régime mixte} / [\text{PCB}] \text{ eau} = 1,5 / 0,08 = 18,75$
- $Fc5 = [\text{PCB}] \text{ poissons piscivores} / [\text{PCB}] \text{ eau} = 2 / 0,08 = 25$

Certains animaux aquatiques possèdent une capacité d'accumulation surprenante de composés organo-halogénés. Les mollusques bivalves à régime macrophage peuvent atteindre des coefficients de concentration considérable, n'oublions pas qu'une huître de 20 g (partie molle) doit filtrer 48 litres par jour pour répondre à ses besoins alimentaires.

**III.2.3. Bioaccumulation:** est un terme qui englobe biomagnification (Fig. III.4) 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 :  $BCF = KOW \times \text{Concentration de la substance dans les lipides}$ . La substance est alors bioaccumulable si  $BCF > 100$ .

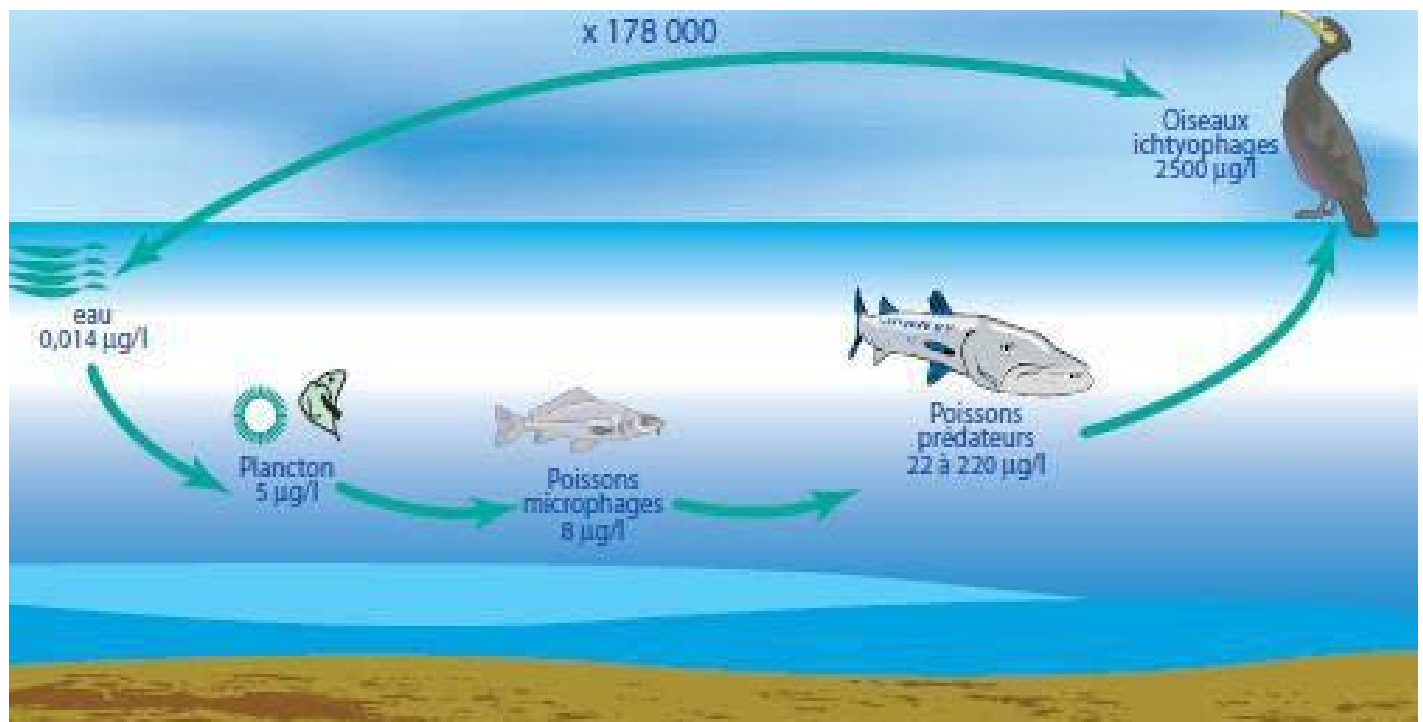
Exemples : Pentachlorophenol  $\log P = 5,12$  : bioaccumulable ; Chloroforme  $\log P = 1,97$  : non bioaccumulable.

**Exemple de bioamplification :**

Le début des années soixante fût apporté la preuve concrète du phénomène de bioamplification écologique par des composés organiques persistants, le lac californien fût traité par DDD (insecticide voisin du DDT) à plusieurs reprises entre 1949 et 1957 dans le but d'éliminer un petit moucheron « *Chaeborus astictopus* » dont la pullulation est accommodée des baigneurs bien que ce moucheron ne pique pas, en conséquence le DDD s'accumule dans les réseaux trophiques lacustres. La Fig. III.3 montre les concentrations du DDD relevées dans la biomasse du lac californien aux divers niveaux trophiques à la fin

des années cinquante, les teneurs de DDD dans la graisse du grèbe atteignaient 2.500 ppm soit un facteur de concentration ( $F_c = 178.000$ ) par rapport aux eaux du lac. En conséquence à la fin des années trente on comptait une trentaine de couples de grèbes la plupart stériles à savoir la population initiale contenait 30.000 oiseaux.

Les organochlorés sont des éléments qui ne se décomposent pas dans l'environnement, et que la température ; le temps ; la lumière et les bactéries n'ont pas d'impacts sur eux c'est pour cette raison qu'on les appelle persistants, ce genre de contaminants ne sont pas décomposés lorsqu'ils sont mangés par les animaux et même par l'Homme, ils demeurent dans le corps, et sont stockés dans les graisses parfois on les trouve dans le foie et les reins (organes riches en graisses).

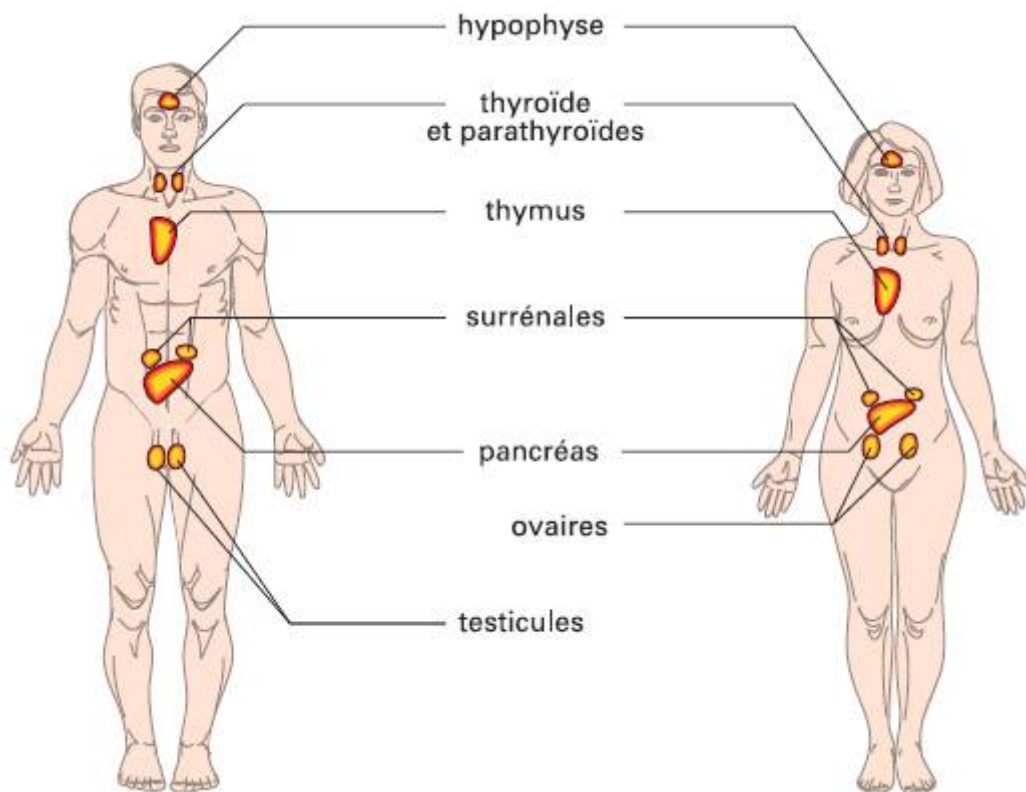


**Figure.III.4** : Exemple de Bioamplification du DDD dans le réseau trophique de Clear Lake (USA)

### III.3. Ecotoxicologie des perturbateurs endocriniens :

Le système endocrinien se compose d'une série de glandes qui sont distribuées dans tout le corps (Fig. III.5). Chaque glande produit une ou plusieurs hormones. Les hormones sont des substances chimiques naturelles qui sont produites dans les cellules à l'intérieur d'une glande. Elles sont ensuite libérées dans les vaisseaux sanguins, où elles circulent jusqu'à ce qu'elles atteignent un tissu ou un organe cible. Là, elles se lient à des récepteurs spécifiques et déclenchent un effet tel que la production d'une autre hormone, un changement dans le métabolisme, une modification dans la façon de se comporter ou d'autres réactions; l'effet dépend de l'hormone spécifique et de sa cible. Certaines glandes endocrines produisent une seule hormone, tandis que d'autres produisent plusieurs hormones. En raison du rôle exceptionnel que joue le

système endocrinien dans de nombreuses fonctions biologiques et physiologiques, une déficience dans n'importe quelle partie de ce système peut entraîner une maladie ou même la mort.



**Figure.III.5** : anatomie du système endocrinien (ecotoxicologie.fr)

Historiquement, les perturbateurs endocriniens ont commencé à attirer l'attention des chercheurs dès les années 1950. Mais c'est l'affaire du distilbène (œstrogène de synthèse, prescrit à l'époque pour prévenir les fausses couches durant la grossesse, les adolescents issus de ses dernières présentaient une forme rare de cancers gynécologiques) qui, dans les années 1970, a fait exploser le sujet sur la scène scientifique et médiatique.

### **III.3.1 Définition :**

L'Organisation mondiale de la santé en 2002 a défini Les perturbateurs endocriniens comme suit : *"un perturbateur endocrinien est " une substance exogène ou un mélange qui altère la/les fonction(s) du système endocrinien et, par voie de conséquence, cause un effet délétère sur la santé d'un individu, sa descendance ou des sous-populations "*. Les perturbateurs endocriniens "PE" regroupent une vaste famille de composés capables d'interagir avec le système hormonal.

### **III.3.2 Les sources de contamination par les PE :**

À défaut de les classer rigoureusement, on peut cependant catégoriser les différents types de PE, en se basant d'une part sur leur nature, d'autre part sur leurs mécanismes d'action et leurs cibles. Il existe une

grande diversité parmi les perturbateurs endocriniens, et les sources de contamination auxquelles hommes et animaux sont exposés sont également nombreuses. En effet, ces composés peuvent être présents dans des produits manufacturés ou des aliments d'origine végétale ou animale. Ils sont pour la plupart issus de l'industrie agro-chimique (pesticides, plastiques, pharmacie...) et de leurs rejets. Beaucoup sont rémanents : ils persistent dans l'environnement de longues années et peuvent être transférés d'un compartiment de l'environnement à l'autre (sols, eau, air...) de longues années après qu'ils aient été produits. Les hormones naturelles ou de synthèse constituent une source importante de perturbateurs endocriniens : œstrogènes, testostérone, progestérone... ; et les produits de synthèse mimant leurs effets sont souvent utilisés en thérapeutique (contraception, substitution hormonale, hormonothérapie). Elles entraînent un risque indirect en rejoignant les milieux naturels, après avoir été excrétées dans les rejets humains ou animaux. Y sont adjoints les phyto-estrogènes naturellement présents dans certaines plantes (soja, luzerne).

Un second groupe de perturbateurs endocriniens, bien plus large, rassemble tous les produits chimiques et sous-produits industriels qui peuvent interférer avec le système endocrinien de l'homme ou de l'animal. Il comporte à l'heure actuelle plus d'un millier de produits, de nature chimique variée. Parmi les plus fréquents, on peut citer (Tab.III.1):

- des produits de combustion comme les dioxines, les furanes, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)...
- des produits industriels ou domestiques comme :
  - les phtalates, ou le bisphénol A utilisés dans les plastiques ;
  - les parabènes, conservateurs utilisés dans les cosmétiques ;
  - les organochlorés (DDT, chlordécone...) utilisés dans les phytosanitaires ;
  - l'étain et dérivés utilisés dans les solvants.

**Tableau.III.1** : quelques exemples de substances à effet PE et leurs sources potentielles

Famille chimique	Sources potentielles	Exemples
Phtalates	Plastiques, cosmétiques	Dibutyl phtalate
Alkylphénols	Détergents, plastiques, pesticides	Nonylphenol
<a href="#">Hydrocarbures aromatiques polycycliques</a>	Sources de combustion: fumée de cigarette, émission des moteurs diesels, incendies	Benzo(a)pyrène
<a href="#">Polychlorobiphényles</a>	Transformateurs électriques	PCB, Arochlor
Anciens pesticides	Résiduels de stockage, pollution rémanente	DDT, Dieldrine, Chlordane
Autres pesticides	Agriculture, nettoyages urbains, jardins particuliers	Atrazine, Ethylène thiourée, Heptachlor, Lindane, Malathion
Retardateurs de flamme	Mousses pour les mobiliers, tapis, équipements électroniques	Polybromodiphényles (PBDE)
Dérivés phénoliques	Désinfectants, plastiques, cosmétiques	<a href="#">Bisphénol A</a> , Parabens, Halogéno-

### III.3.3 Caractéristiques générales des perturbateurs endocriniens :

**-Caractère ubiquitaire** : Les PE sont omniprésents dans l'eau, l'air, les sols et l'alimentation. De ce fait l'exposition peut se faire via différents modes : ingestion, inhalation, absorption, transfert trans-placentaire.

**-Caractère lipophile** : Les PE sont lipophiles pour la majorité d'entre eux, c'est à dire qu'ils se concentrent dans le tissu adipeux.

**-Persistance, bioaccumulation, bioamplification** : la plupart des PE sont des polluants organiques persistants (POPs) : ils s'accumulent dans les écosystèmes, leur biodégradation est très lente et leur effet est rémanent, ce qui est responsable d'une contamination faible mais permanente. Par ailleurs, les concentrations de ces substances augmentent d'un niveau trophique à une autre au sein de la chaîne alimentaire, induisant ainsi un effet d'amplification.

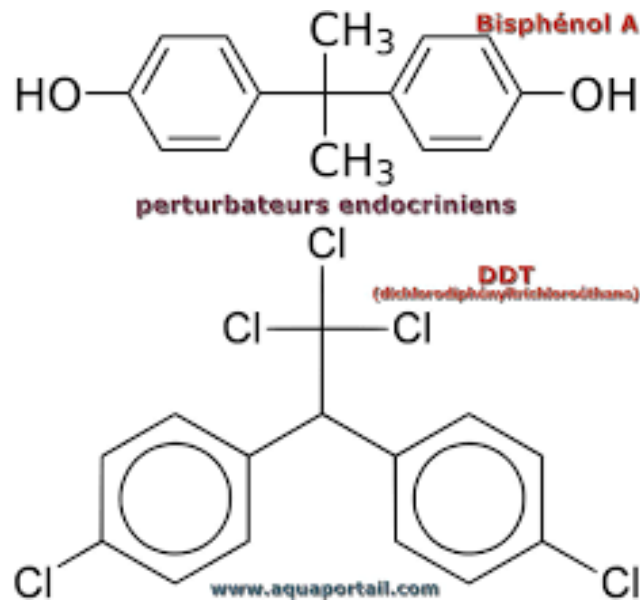
**-Relation dose-effet non linéaire** : la relation entre la dose de ces substances et l'effet produit n'est pas linéaire, l'effet pouvant être plus fort à faible dose qu'à forte dose. D'autre part, c'est la période et la durée d'exposition qui sont importantes.

**-Effet cocktail** : Ces différentes substances exercent entre elles des effets synergiques et cumulatifs constituant un effet cocktail.

### III.3.4 Mode d'action des PE :

Les perturbateurs endocriniens (PE) sont des substances chimiques ou des mélanges, d'origine naturelle ou artificielle, possédant la capacité d'interférer avec le système hormonal, appelé également système endocrinien. Ils peuvent avoir des effets nocifs sur des fonctions aussi essentielles que la reproduction, la croissance, le développement ou encore le métabolisme... Ces dangers concernent les individus directement exposés mais également leur descendance.

Les préoccupations liées aux perturbateurs endocriniens ont émergé au début des années 2000. Depuis, cette question a été majoritairement associée à des problématiques environnementales ou à des inquiétudes concernant la santé publique et portant sur certains produits de consommation courante (médicament, produits alimentaires, cosmétiques...). Dans l'environnement de travail, la fréquence et le niveau des expositions peuvent être plus élevés que pour la population générale. Ces expositions peuvent être liées à l'utilisation de certaines matières premières (plastifiants, solvants, ...), à la fabrication ou l'utilisation de produits contenant des perturbateurs endocriniens (peintures, colles, vernis...) ou encore à la présence de déchets ou de sous-produits émis par certains procédés (dioxines...) (Fig. III.6).



**Figure.III.6** : Exemple d'un PE ([www.didaquest.org](http://www.didaquest.org))

Le système endocrinien regroupe les organes qui sécrètent des hormones : thyroïde, ovaires, testicules, hypophyse... Il libère ces médiateurs chimiques dans la circulation sanguine pour agir à distance sur certaines fonctions de l'organisme comme la croissance, le métabolisme, le développement sexuel, le développement cérébral, la reproduction... Les perturbateurs endocriniens altèrent le fonctionnement habituel de l'organisme en interagissant avec la synthèse, la dégradation, le transport et le mode d'action des hormones. Ces molécules se caractérisent donc par un effet toxique non pas direct, mais indirect, via les modifications physiologiques qu'elles engendrent (**Fig.III.7**).

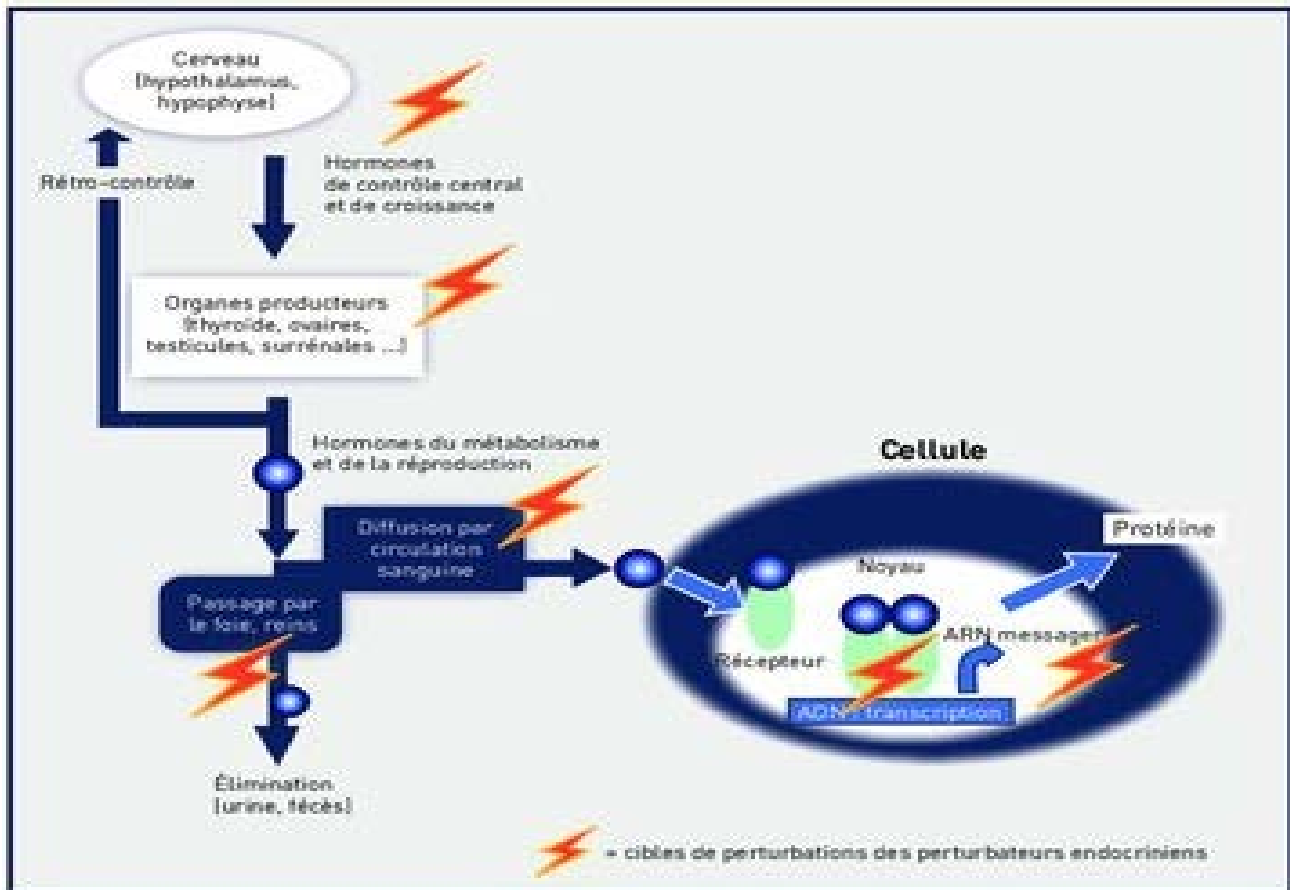
Les PE peuvent agir de trois façons différentes :

**A- Effet mimétique** : il peut imiter l'action d'hormones naturelles telles que les œstrogènes ou la testostérone : il se fixe sur le récepteur cellulaire et entraîne une réponse normale. C'est ce qu'on appelle aussi l'effet agoniste

**B- Effet de blocage** : en se fixant sur les récepteurs hormonaux, le PE empêche leur activation et entrave alors l'action de l'hormone. Il s'agit dans ce cas d'un effet antagoniste.

**C- Effet perturbant** : en agissant sur la synthèse, le transport, le métabolisme et l'excrétion des hormones, le PE modifie ainsi les concentrations d'hormones naturelles. Il peut en effet gêner ou bloquer le mécanisme de production ou de régulation des hormones ou de leurs récepteurs.

Des perturbations endocriniennes dues aux produits chimiques ont jusqu'à présent été constatées et étudiées sur le système hormonal stéroïdien (estrogènes, androgènes\*...) et thyroïdien.



**Figure.III.7 :** Schéma du système endocrinien et sites d'action possibles des molécules à effets PE (Diamanti-Kandarakis et *al.*, 2009).

### III.3.5. Effets des perturbateurs endocriniens sur l'environnement :

Les rejets des stations d'épuration ainsi que d'autres types d'introduction de ces polluants (ex : pesticides introduits par ruissellement dans les rivières) répandent un très grand nombre de perturbateurs endocriniens dans l'environnement.

Ainsi, depuis les années 60, les scientifiques ont mis en évidence différentes anomalies dans les populations animales, attribuables aux effets délétères de certains perturbateurs endocriniens. Ces effets ont été observés chez des populations de poissons, de reptiles, invertébrés ou encore d'oiseaux.

#### - DDT un pesticide qui altère la reproduction de populations d'oiseaux

Le DDT (dichlorodiphényldichloroéthane) est un insecticide de la famille chimique des organochlorés. Ce produit a été intensément utilisé à partir du début de la deuxième guerre mondiale contre les insectes ravageurs des cultures et les insectes porteurs de maladie.

Cependant, ce pesticide a également démontré des effets toxiques très importants vis à vis des populations aquatiques et terrestres dans les régions régulièrement traitées pour la démoustication. Selon

différents auteurs, le DDT est en partie responsable du déclin sévère des populations européennes et nord-américaines d'oiseaux piscivores (mangeurs de poissons) et des oiseaux de proie, à cause d'un amincissement de la coquille des œufs (Fig.III.7). Ainsi les alligators mâles du lac Apopka en Floride présentaient des testicules peu ou mal développés et un pénis anormalement petit, tandis que les femelles présentaient des morphologies ovariennes anormales se traduisant par un grand nombre de follicules poly-ovulaires et d'ovocytes polynucléaires. Ces altérations ont été attribuées à différentes substances organiques comme le DDE, les PCB.



**Fig.III.7** : Amincissement de la coquille d'œuf chez les grèbes et faucons (accident du Clear Lake)

- **Le TBT: un composé qui masculinise des femelles escargots**

Le Tributylétain (TBT) est un produit essentiellement utilisé dans les antifoulings (peinture antisalissure destinée à empêcher la fixation des organismes aquatiques sur la coque des bateaux) dès les années 1960 mais surtout dans les années 1970 avec l'explosion de la construction navale et de la plaisance. Depuis 2008, il est interdit de l'utiliser sur les navires en France.

Dans les années 80, ce produit a été accusé de « masculiniser » des femelles d'une espèce d'escargot marin. Ce phénomène constitue le cas le plus évident de perturbation endocrine par un polluant chimique. Le TBT est responsable du déclin et même de l'extinction de populations locales de cet escargot dans le monde entier. Certains scientifiques, le TBT empêcherait l'aromatase de jouer son rôle. Ainsi, les escargots femelles ne produiraient plus d'œstradiol, ce qui entrainerait leur masculinisation (Fig.III.8).

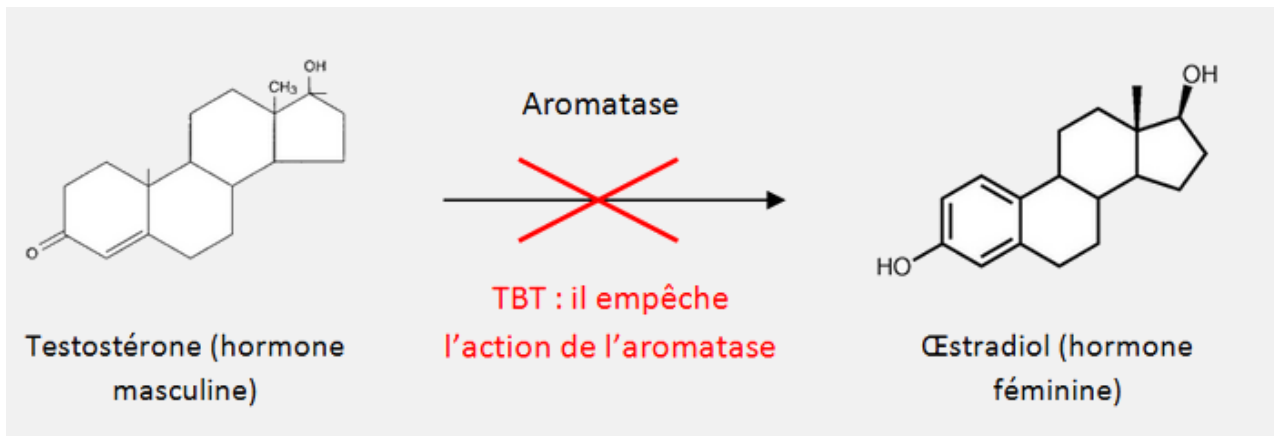


Figure.III.8 : Inhibition de l'aromatase par le TBT (ecotoxicologie.fr)

#### III.4. Apports de l'écotoxicologie dans le domaine de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques :

Evaluer le bon état des masses d'eau, évaluer les impacts des activités humaines, détecter les polluants émergents à de très faibles doses, et évaluer leurs risques sur le long terme, etc., pour faire face à ces défis, de nouvelles connaissances et des technologies innovantes sont nécessaires. La prise en compte de l'état écologique au même titre que l'état chimique. L'état écologique est l'appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Il est évalué à partir d'éléments de qualité hydromorphologiques, chimiques (polluants spécifiques), physico-chimiques, et biologiques prédéfinis par catégorie de masses d'eaux (cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition, eaux côtières). Pour les eaux continentales, les compartiments biologiques clés (ou éléments de qualité biologique : EQB), à la base de la construction des indicateurs, sont le phytoplancton, le phytobenthos, les macrophytes, les invertébrés benthiques et les poissons. L'état chimique, quant à lui, est apprécié sur la base des concentrations en substances toxiques définies par la directive cadre sur l'eau (DCE). L'état écologique est évalué par rapport à des conditions de référence, elles-mêmes déclinées selon une typologie des masses d'eau basée sur des caractéristiques physiques et chimiques de celles-ci « déterminantes pour la biologie ».

La gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques impose de s'appuyer sur des recherches finalisées de haut niveau. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) a confié à l'Onema (**L'Agence française pour la biodiversité (AFB)**, anciennement **Office national de l'eau et des milieux aquatiques**) une mission explicite afin de renforcer l'utilisation des connaissances scientifiques et techniques pour éclairer la conception, la mise en œuvre et le suivi des politiques publiques dans le domaine de l'eau par une expertise de haut niveau. L'Onema conduit cette mission avec ses moyens propres et en construisant des partenariats avec les organismes nationaux de recherche. A travers plusieurs exemples de projets de recherche ou d'études menés dans le cadre des conventions partenariales de l'Onema, nous verrons dans quelle mesure les résultats de la recherche appliquée le domaine de l'écotoxicologie peuvent aider à la

mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau, notamment par le soutien à des travaux permettant de mieux comprendre les phénomènes de transfert des contaminants organiques hydrophobes dans les réseaux trophiques, le soutien à des travaux sur les effets des substances chimiques sur les écosystèmes soumis à des expositions chroniques et multiples pour en tirer des marqueurs d'effets utilisables sur le terrain, etc.

✓ **Quelques chiffres sur les pollutions aquatiques globales :**

Plus de 120.000 substances chimiques sont commercialisées dans le monde alors que la plupart n'ont pas fait l'objet d'une évaluation préalable de leur impact potentiel sur l'environnement.

- Environ 80 % des fleuves du monde coulant dans des zones habitées servent surtout à transporter des déchets dans les océans
- Les pluies acides ravagent les habitats d'eaux continentales sur des dizaines de millions de km<sup>2</sup>
- Près de 2 milliards de personnes ne disposent pas d'eau potable en raison des pollutions microbiologiques et de plus en plus chimiques.....
- Les eaux superficielles et souterraines sont de plus en plus contaminées par des substances chimiques d'origine industrielle et/ou agricoles (on dénombre en France plus de 50 pesticides différents dans certains aquifères...)
- Plus de 60 millions de km<sup>2</sup> d'océan sont recouverts en permanence d'une fine couche de pétrole.

## Références bibliographiques

Atienzar, F. A., & Jha, A. N. (2006). The random amplified polymorphic DNA (RAPD) assay and related techniques applied to genotoxicity and carcinogenesis studies: a critical review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 613(2-3), 76-102.

Baize, D., & Paquereau, H. (1997). Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etude et gestion des sols*, 4, 77-94.

Bispo, A., Grand, C., & Galsomies, L. (2009). Le programme ADEME "Bioindicateurs de qualité des sols". *Etude et gestion des sols*, 16(3-4), 145-158.

Dajos, R. (1983). *Écologie générale*. Vozes, São Paulo, Brésil. 470p

David Delmail Available online:

Dégremont, C., & Cachot, J. (2009). La Génotoxicité, quel risque pour les espèces aquatiques. *Fascicules Seine-Aval*.

Dégremont, C., & Cachot, J. (2009). La Génotoxicité, quel risque pour les espèces aquatiques. *Fascicules Seine-Aval*.

Diamanti-Kandarakis, E., Bourguignon, J. P., Giudice, L. C., Hauser, R., Prins, G. S., Soto, A. M., ... & Gore, A. C. (2009). Endocrine-disrupting chemicals: an Endocrine Society scientific statement. *Endocrine reviews*, 30(4), 293-342.

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.

Godet, E., Vasseur, B., & Sabut, M. (1993). Essais de génotoxicité in vitro et in vivo applicables à l'environnement hydrique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 6(3), 285-314.

Haeckel, E. (1866). *Morphologie générale des organismes. Principes généraux de la science des formes organiques, fondés mécaniquement sur la théorie de la descendance réformée par C. Darwin, etc.* (Vol. 1).

Honeyman, B. D. (1999). Colloidal culprits in contamination. *Nature*, 397(6714), 23-24.

Iarmacovai, G., Botta, A., & Orsière, T. (2007, July). Micronoyaux et polymorphismes génétiques: de l'exposition à la susceptibilité. In *Annales de Biologie Clinique* (Vol. 65, No. 4, pp. 357-363).

Jha, A. N. (2008). Ecotoxicological applications and significance of the comet assay. *Mutagenesis*, 23(3), 207-221.

Lagadic, L., Caquet, T., & Amiard, J. C. (1997). Biomarqueurs en écotoxicologie: principes et définitions (introduction).

Molle, L. (1984). Eloge du Professeur René Truhaçut. *Revue d'histoire de la pharmacie*. 72, 262 : 340-348.

Moriarty, C. (1983). Age determination and growth rate of eels, *Anguilla anguilla* (L). *Journal of Fish Biology*, 23(3), 257-264.

Ramade, F. (1977). *Ecotoxicologie*. Paris: Masson. 214p

Robles, I., Lakatos, J., Scharek, P., Plank, Z., & Hernández, G. (2014). Remediation of Soils and Sediments Polluted with Mercury: Occurrence, Transformations, Environmental Consideration and San Joaquin's Sierra Gorda Case.

Smith, W.E. (1972). Death flow from a pipe. *Minamata*.

Truhaut, R. (1975). Ecotoxicology – a new branch of toxicology: a general survey of its aims, methods and prospects. *Ecological Toxicology Research*. Edited by AD Mc Intyre, CF Millis, New York, Plenum USA.

Truhaut, R. (1976). ECOTOXICOLOGIE. OBJECTIFS, PRINCIPES ET PERSPECTIVES.

Truhaut, R. (1977). Ecotoxicology: objectives, principles and perspectives. *Ecotoxicology and environmental safety*, 1(2), 151-173.

### e-références

Agence de l'Eau RMC, 2002

<http://avery.rutgers.edu/WSSP/StudentScholars/project/archives/onions/rapd.html>

<https://ecotoxicologie.fr/evaluer-en-laboratoire>

<https://ecotoxicologie.fr/notions-essentielles>

<https://www.entpe.fr>

<https://www.epa.gov/glnpo/atlas/glat-chap4-f.html>

[https://didaquest.org/wiki/Perturbateurs\\_endocriniens](https://didaquest.org/wiki/Perturbateurs_endocriniens)

<https://lamaisondalzaz.files.wordpress.com/2011/02/pyramide-ecologique1.jpg>

[http://www.univubs.fr/1290600507630/0/fiche\\_article/&RH=ACTU](http://www.univubs.fr/1290600507630/0/fiche_article/&RH=ACTU)