

MODULE TOXICOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT

1. Définitions

2. Objectifs

3. Méthodologie et approches

4. Normes

- a. ADI (Acceptable Daily Intake)
- b. TLV (Threshold Limit Value)
- c. Dose Maximale Tolérable
- e. MRFC (maximum recommended field concentration)
- f. DAR

5. Réglementation sur les produits phytosanitaires

- a. AMM
- b. DJA
- c. NOAEL
- d. NAE0
- c. DARf
- d. LMR

6. Bioteneurs

- a. Chaîne trophique
- b. Bioconcentration
- c. Biomagnification
- d. Bioaccumulation
- e. Biodisponibilité environnementale
- f. Biodisponibilité
- g. Pyramides écologiques (nombre, biomasse, énergie, concentrations)

7. Bioindicateurs et biomarqueurs

- a. Bioindicateur : définition, types, caractéristiques et utilisations
- b. Biomarqueurs : définition, types et caractéristiques.

8. Sources de pollution

- a. Production d'énergie
- b. Activités industrielles
- c. Diversification de l'industrie chimique
- d. Agriculture
- e. Pollutions anthropiques

9. Classification des polluants

- a. Critères et classifications
- b. Différences entre les macropolluants et les micropolluants

10. Règle des trois actions polluantes

- a. Liaison aux constituants chimiques des organismes au moyen d'un groupement chimique simple
- b. Caractéristiques réactionnelles et structurales du polluant semblables à celles des fonctions chimiques constitutives des organismes
- c. Déplacement par le polluant des équilibres dans l'environnement

11. Pollution des écosystèmes et évaluation

- a. Nocivité du polluant
- b. Effet des polluants :
- c. Evaluation des effets:

12. Niveaux d'étude des polluants

- a. Le niveau biochimique et cellulaire
- b. Le niveau des organismes
- c. Le niveau des populations
- d. Le niveau des écosystèmes naturels
- e. Le niveau des écosystèmes contrôlés

13. Evaluation environnementale

- a. Définition
- b. Critères
- c. diagnostics

14. Développement durable

- a. Définition
- b. Historique
- c. Les trois piliers du développement durable

TOXICOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT

1. Définitions

a. Pollution:

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

b. Ecologie :

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

Ecologie : étude des relations (ou interactions) entre les organismes entre eux (biocénose) et avec leur environnement (biotope ou milieu ou habitat).

Ecosystème : biocénose (peuplement ou communauté) + biotope (espace qu'habite un peuplement) + interactions.

Biosphère : région de la planète où la vie est possible en permanence et qui renferme l'ensemble des êtres vivants. Elle est subdivisée grossièrement en 3 compartiments:

1. **la lithosphère** (couches les plus superficielles de l'écorce terrestre),
2. **l'hydrosphère** (ensemble des eaux présentes dans les couches superficielles de la planète et à sa surface, eaux liquides et solides),
3. **l'atmosphère** (enveloppe externe gazeuse de la planète).

c. Ecotoxicologie :

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

Par définition, c'est une science **pluridisciplinaire**. Elle étudie au sein des écosystèmes les interactions entre les espèces et le milieu et fait appel à **l'écologie**. Elle étudie les effets des polluants sur les organismes vivants et fait appel à la **toxicologie**. Enfin, elle étudie les polluants et leur dispersion dans le milieu et fait appel à la **chimie**.

d. Toxicologie :

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

e. Ecologisme :

C'est un mouvement social, philosophique et politique ; c'est également un courant de pensées et d'action qui pose la question du rapport entre la nature et la société dans un siècle où l'homme

dénaturé, enfermé dans son rôle social, est la première victime des dysfonctionnements dans ce rapport (SIMONET, 1979).

f. Environnique :

C'est l'ensemble des approches techniques qui gèrent les connaissances bio-physico-chimiques permettant l'évaluation environnementale des objets bio-physico-chimiques d'études y compris nos actes (BOUCHE, 1996).

g. Intégrologie :

C'est une technique de gestion des savoirs applicables aux systèmes complexes étudiés par l'écologie et pratiqués par l'environique. Elle est définie comme la science de l'intégration globale des connaissances produites par les diverses spécialités étudiant le réel. Son objet est la gestion de la connaissance exhaustive, pertinente et explicite. L'intégrologie est à la fois sociale et concrète :

-sociale : la société pourra juger de telle ou telle pratique en terme de risque/intérêt à un moment et en un lieu donné.

-concrète : elle porte sur des variables bio-physico-chimiques du réel et relatives aux objets constitutifs des villes et campagnes, des usines et champs avec le réel et la société (BOUCHE, 1996).

h. Définitions diverses:

Ecologie : étude des relations (ou interactions) entre les organismes entre eux (biocénose) et avec leur environnement (biotope ou milieu ou habitat).

Ecosystème : **biocénose** (peuplement ou communauté) + **biotope** (espace qu'habite un peuplement) + interactions.

Biosphère : **région** de la planète où **la vie est possible** en permanence et qui renferme l'ensemble des êtres vivants. Elle est subdivisée grossièrement en **3 compartiments**:

1. **la lithosphère** (couches les plus superficielles de l'écorce terrestre),
2. **l'hydrosphère** (ensemble des eaux présentes dans les couches superficielles de la planète et à sa surface, eaux liquides et solides),
3. **l'atmosphère** (enveloppe externe gazeuse de la planète).

2. Objectifs

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

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

L'écotoxicologie a deux objectifs principaux :

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

Elle doit donc dépasser les simples constats de niveaux de pollution et de toxicité pour appréhender les mécanismes responsables de la bioaccumulation et des transferts des contaminants au sein des systèmes biologiques ainsi que les processus entraînant les effets sub-létaux.

Cependant, l'écotoxicologie a des contraintes. Elle se heurte

- à une très grande complexité liée à la diversité des constituants de l'écosphère.
- aux variations spatio-temporelles des facteurs écologiques.
- à la diversité qualitative et quantitative des contaminants.
- aux innombrables mécanismes d'adaptation mis en œuvre par les organismes.

3. Méthodologie, approches et outils

Les objectifs de l'écotoxicologie impliquent une analyse à différents niveaux d'intégration de la molécule à la biocénose en passant par la cellule, l'organe, l'organisme et la population, afin d'apprécier l'influence des facteurs biotiques, abiotiques et de contamination.

Les méthodologies développées en écotoxicologie peuvent être distinguées par les différentes **dimensions** qui les caractérisent et par leur **représentativité** à l'égard des phénomènes naturels depuis les tests monospécifiques jusqu'aux études de terrain en passant par les expériences de laboratoire à l'aide de modèles écotoxicologiques, comme les chaînes trophiques et les écosystèmes expérimentaux et par les expériences en nature. Chacune d'elles implique un degré de réductionnisme plus au moins important, associé à un niveau de compréhension des mécanismes étudiés et à un risque d'extrapolation.

Une approche rationnelle des problèmes écotoxicologiques tient compte de la complémentarité de ces diverses approches ; les études *in situ* constituant le référentiel pour les recherches élaborés à l'échelle du laboratoire.

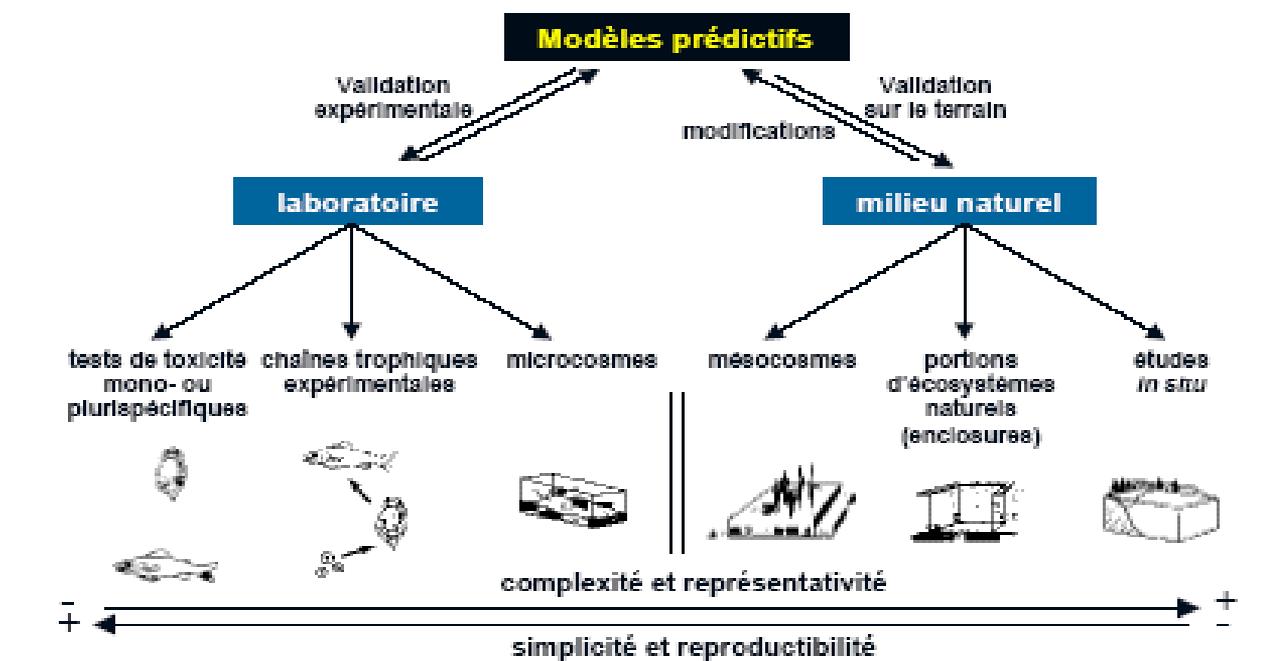
Trois approches:

a-approche **réductionniste**: étude physio-toxicologique des effets des polluants sur des organes ou modèles cibles (propre à la toxicologie).

b-approche **holistique**: étude des mécanismes de contamination des milieux (transferts, transformations, impact sur biocénoses).

c-approche **intégrative et comparative** (chaîne trophique, bioaccumulation); ces deux dernières approches concernent l'écotoxicologie.

Les outils de l'écotoxicologie:



Le monitoring des polluants:

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

Triple finalité du monitoring des polluants:

1. Étudier les concentrations et la répartition des polluants dans l'environnement.
2. Évaluer les effets de ces polluants, aux concentrations détectées, sur les populations et les écosystèmes exposés.
3. Fixer le niveau maximum de rejet au site des sources d'émission des polluants pour s'assurer que les normes de qualité de l'environnement définies ne soient pas dépassées.

Deux catégories d'indicateurs:

1. **Détection des polluants et quantifications dans les milieux physiques et biologiques : Approche Chimique.**
2. **Évaluation des effets des pollutions sur les organismes vivants : Approche biologique.**
 - a- **Sur les individus**
 - b- **Sur les populations et/ou les communautés**

Surveillance de la qualité des milieux:

Approche chimique:

Détection des polluants et quantifications

Par l'utilisation de techniques analytiques : CLHP, CPG, SM, ELISA, ...).

- **Avantages**

- Nombre réduit d'échantillons
- Différentes matrices

- **Inconvénients**

- Aucune technique ne peut doser tout les polluants à la fois.
- Problème de seuil de détection.
- Certains produits sont dégradés ou transformés : modification de la biodisponibilité et de l'effet des molécules.
- Ne tient pas compte de l'interaction entre molécules.

Approche biologique:

Dès le début du XXe siècle, **Kolkwitz & Marson** (Int. Rev. Hydrobiol. 1909): proposition d'utiliser les communautés aquatiques comme indicateurs de la qualité des eaux de rivières.

Aujourd'hui, deux approches complémentaires, basées sur l'étude des organismes vivants :

- bioindicateurs
- biomarqueurs

4. Normes

Les experts ont défini des doses maximales dites admissibles pour les principaux contaminants présents dans l'environnement. Ces doses sont considérées comme inoffensives pour notre espèce, même en cas d'exposition ininterrompue pendant toute une vie. La plupart des normes sont d'origine anglo-saxonne et sont désignées généralement par leur abréviations en anglais. Ces

normes ne s'appliquent qu'aux produits industriels et agricoles ayant fait l'objet d'un test de toxicité et d'une demande d'agrément.

ADI (Acceptable Daily Intake): C'est la quantité de polluant à laquelle peut être soumis quotidiennement un être humain sans induire des effets nocifs. Elle est établie à partir d'expériences réalisées sur rat (la dose obtenue sur rat est divisée par 100 pour obtenir l'ADI concernant l'homme).

TLV (Threshold Limit Value): C'est la concentration maximale de polluant admissible dans l'air des lieux de travail pour une exposition de 8 heures maximum par jour.

Dose Maximale Tolérable: Cette notion implique le concept de rapport bénéfice/risque. La dose maximale tolérable est établie en fonction d'un seuil économiquement rentable à ne pas dépasser vers le bas et du danger que les polluants fabriqués présentent pour la santé publique.

MRFC (Maximum Recommended Field Concentration) : C'est la concentration maximale recommandée par le fabricant pour un traitement en plein champ.

Les Quotients d'Accumulation (QA) et la Somme des Excès de Transfert (SET)

On utilise des escargots de l'espèce *Cantareus aspersus* (syn. *Helix aspersa*) ou escargots Petits Gris, dont la large répartition géographique et les facilités d'élevage, permettent de les utiliser en **bioindication active**, c'est-à-dire par **encagement** sur site d'escargots issus de l'élevage au laboratoire (animaux témoins).

Ces escargots sub-adultes de passé biologique connu sont exposés **in situ 28 jours** durant lesquels ils se nourrissent des végétaux et du sol présents dans les **microcosmes** (écosystème réduit).

A la fin de cette exposition, les **concentrations en métaux** dans les **viscères** des escargots sont déterminées.

Paramètres mesurés

- Concentration Interne de Référence** (CIRef, établies à partir d'animaux exposés sur sites non contaminés)
- QA= quotient d'accumulation** = rapport médiane des concentrations dans les viscères des escargots exposés sur site étudié / CIRef
Si $QA > 1$ alors anomalie de transfert
- SET= somme des excès de transfert** = somme des $QA-1$ pour les divers métaux étudiés.
Si $SET > 0$ alors excès de transfert d'1 ou plusieurs métal(loïdes)

Chaîne alimentaire :

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

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

Les différents niveaux trophiques

1/ Les producteurs (diverses espèces végétales) sont des autotrophes (capables de synthétiser par la photosynthèse, des molécules organiques ($C_6H_{12}O_6$) à partir de substances inorganiques (gaz carbonique et eau).

2/ Les consommateurs (les animaux) sont des hétérotrophes, ils sont incapables de synthétiser leur propre nourriture; ils dépendent ainsi des autres pour se nourrir. On trouve plusieurs types : les **consommateurs de premier ordre** (les herbivores qui mangent d'autres végétaux), les **consommateurs de second ordre** (les carnivores ou prédateurs qui mangent les herbivores) et **consommateurs de troisième ordre** (les carnivores qui mangent d'autres carnivores).

3/ Les décomposeurs (bactéries et champignons) qui dégradent la matière organique des cadavres et redonnent aux plantes les sels minéraux indispensables à la photosynthèse.

Dioxines ?

- Les dioxines constituent un groupe de composés chimiquement apparentés et sont des polluants organiques persistants.
- Les dioxines sont présentes dans l'environnement et s'accumulent dans la chaîne alimentaire, principalement dans les graisses animales.
- Plus de 90% de l'exposition humaine passe par l'alimentation, principalement la viande, les produits laitiers, les poissons et les fruits de mer.
- Elles sont très toxiques et peuvent affecter la procréation, le développement, le système immunitaire et hormonal et causer des cancers.

Exemple de transfert de polluants dans la chaîne alimentaire : contamination par les **dioxines**

- **Emission usine d'incinération: 0,5-100 ng/m³**
- **Herbe: 1-50 pg/g MS**
- **Vache: 0,7-24 pg/g MG**
- **Produits laitiers (Lait, Viande) 1-2 pg/g MG**
- **Corps femme (Placenta Lait) 20-30 pg/g MG**
- **Enfant 150-400 pg/g de poids corporel**

5. Réglementation des produits phytosanitaires

Les autorités ont mis en place l'**autorisation de mise sur le marché** (AMM) pour l'usage des produits phytosanitaires. Elle est délivrée pour un produit phytosanitaire et pour un ou plusieurs usage(s) précis. Un usage précis correspond à une culture, un mode de traitement, un ravageur, une dose à employer et les conditions d'application.

Avant d'obtenir une AMM, l'entreprise doit fournir un dossier d'évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques à l'INPV qui comporte une évaluation des risques pour les utilisateurs du produit phytosanitaire avec:

1/ **la dose journalière admissible** (DJA) obtenue à partir de la dose nommée NOAEL (no observable adverse effect level) correspondant à la quantité de produits qui peut être consommée chaque jour sans conséquences sur la santé humaine,

2/ **le niveau acceptable d'exposition de l'opérateur** (NAEO) et

3/ **la dose aiguë de référence** (DARf).

Si le produit phytosanitaire est destiné à la conservation de denrées alimentaires, une **limite maximale de résidu** du produit (LMR) est à fournir.

6. Bioteneurs

Chaîne alimentaire :

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

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

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

Les producteurs (diverses espèces végétales) sont des autotrophes (capables de synthétiser par la photosynthèse, des molécules organiques (C₆H₁₂O₆) à partir de substances inorganiques (gaz carbonique et eau). **Les consommateurs** (les animaux) sont des hétérotrophes, ils sont incapables de synthétiser leur propre nourriture ; ils dépendent ainsi des autres pour se nourrir. On trouve plusieurs types : les consommateurs de premier ordre (les herbivores qui mangent d'autres végétaux), les consommateurs de second ordre les carnivores ou prédateurs qui mangent les

herbivores) et consommateurs de troisième ordre (les carnivores qui mangent d'autres carnivores).
Les décomposeurs (bactéries et champignons) qui dégradent la matière organique des cadavres et redonnent aux plantes les sels minéraux indispensables à la photosynthèse.

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

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

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

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

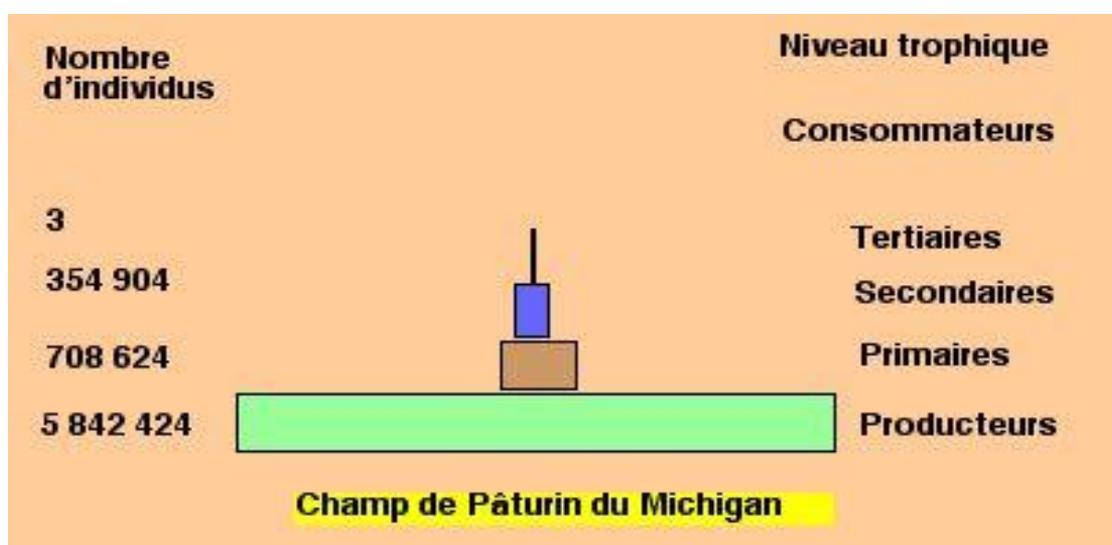


Figure 1. Pyramide des nombres.

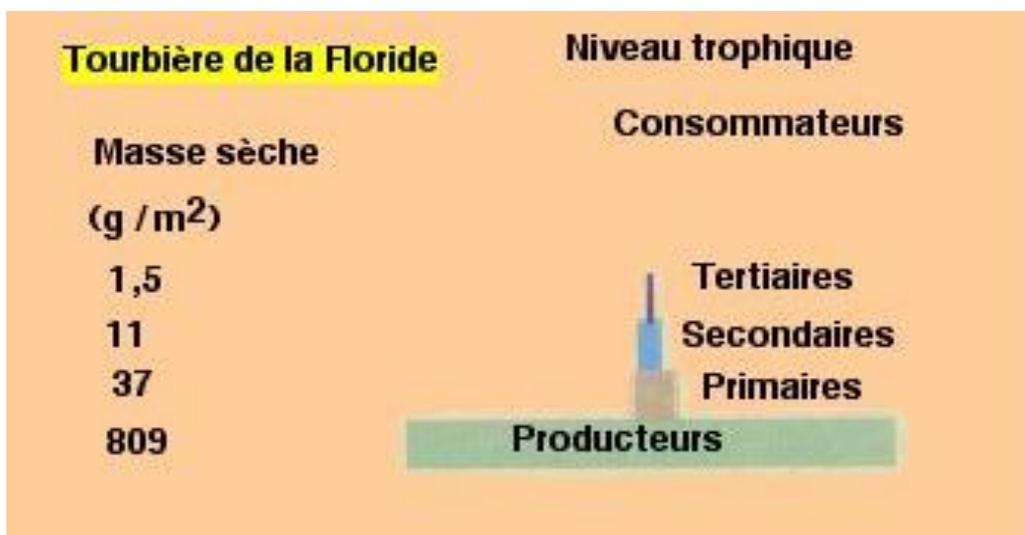


Figure 2. Pyramide de la biomasse.

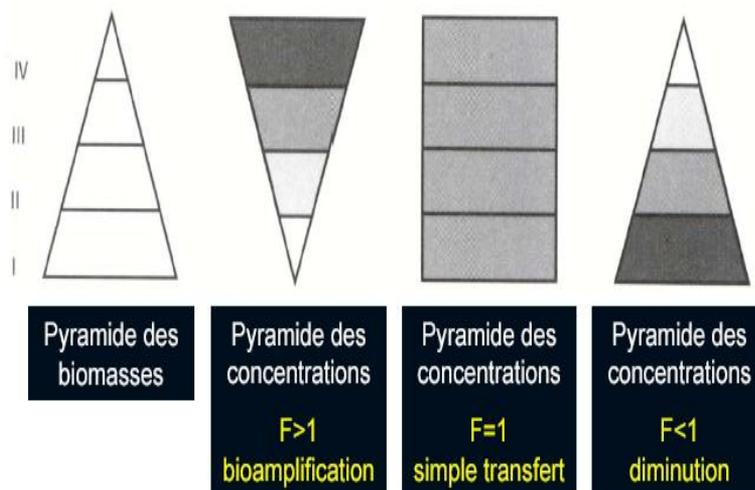


Figure 1. Pyramides des biomasses et des concentrations d'un polluant dans les réseaux trophiques.

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

$KOW = \log P$. La substance considérée est bioaccumulable si $KOW \geq 100$ ou $\log P \geq 3$. La bioaccumulation est appréhendée indirectement par la relation suivante : $BCF = KOW \times$ Concentration de la substance dans les lipides. La substance est alors bioaccumulable si $BCF > 100$. Exemples : Pentachlorophenol $\log P = 5,12$: bioaccumulable ; Chloroforme $\log P = 1,97$: non bioaccumulable.

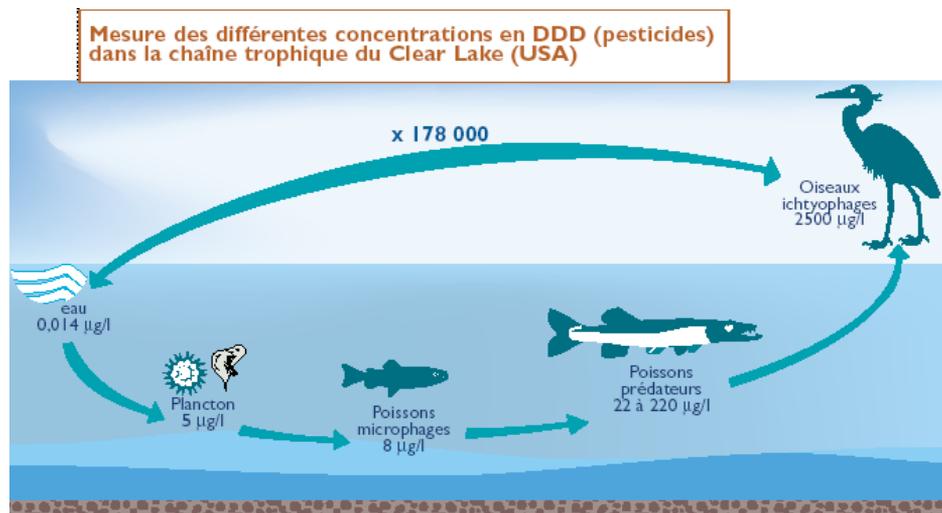


Figure 2. Mesure des différentes concentrations de DDD (insecticide organochloré) dans la chaîne trophique d'un lac aux USA.

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

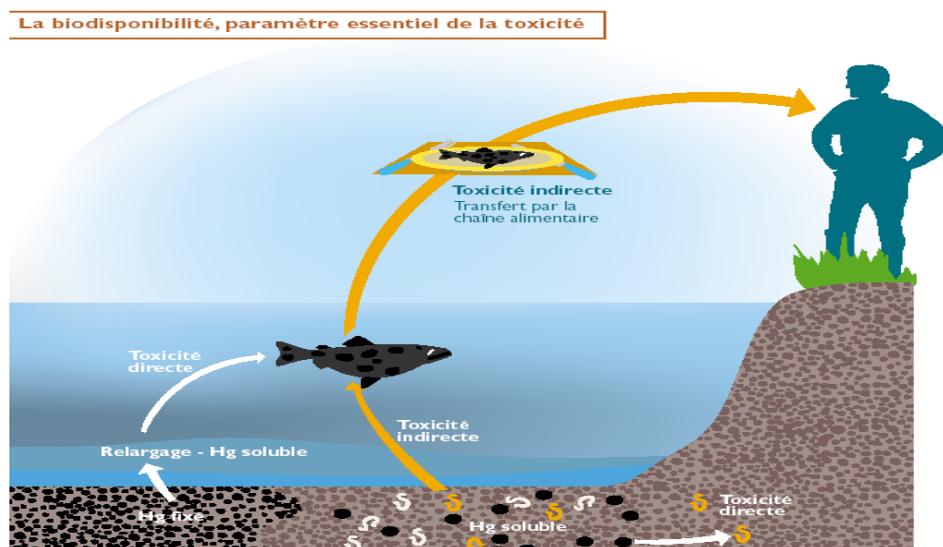


Figure 3. Rapport entre biodisponibilité et toxicité dans un écosystème aquatique.

-Disponibilité environnementale : Ensemble des processus physico-chimiques qui conditionnent la partition du polluant entre les phases solide et liquide du sol.

-Biodisponibilité environnementale: Ensemble des processus physiologiques qui régissent l'absorption des polluants

Disponibilité et biodisponibilité

- **Disponibilité environnementale** : Ensemble des processus physico-chimiques qui conditionnent la partition du polluant entre les phases solide et liquide du sol.
- **Biodisponibilité environnementale**: Ensemble des processus physiologiques qui régissent l'absorption des polluants

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

Pyramides écologiques:

- **Pyramide des nombres** : Le nombre d'individus de chaque niveau trophique.
- **Pyramide de la biomasse** : La biomasse est la masse totale de la matière organique et des êtres vivants subsistant dans une région donnée. La pyramide de la biomasse est la masse de chaque niveau trophique par unité de surface (g/mètre carré).
- **Pyramide des énergies** est la quantité d'énergie disponible à chaque niveau trophique. Elle est exprimée en Joules. Sur le 100% d'énergie disponible d'un niveau trophique, un taux de 10% en moyenne est converti en biomasse dans le niveau suivant. C'est ce qu'on appelle rendement ou efficacité écologique.
- **Pyramide des concentrations** exprime la concentration d'un xénobiotique dans les différents niveaux trophiques.

7. Bioindicateurs et biomarqueurs

a. Bioindicateur :

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

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

-Types : On distingue deux types de bioindicateurs : **bioindicateur d'accumulation** qui accumule une ou plusieurs substances issues de son environnement permettant ainsi d'évaluer son exposition ; et **bioindicateur d'effet** qui permet de révéler des effets spécifiques ou non lors de l'exposition à une ou plusieurs substances issues de son environnement.

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

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

-Utilisations :

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

b. Biomarqueurs :

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

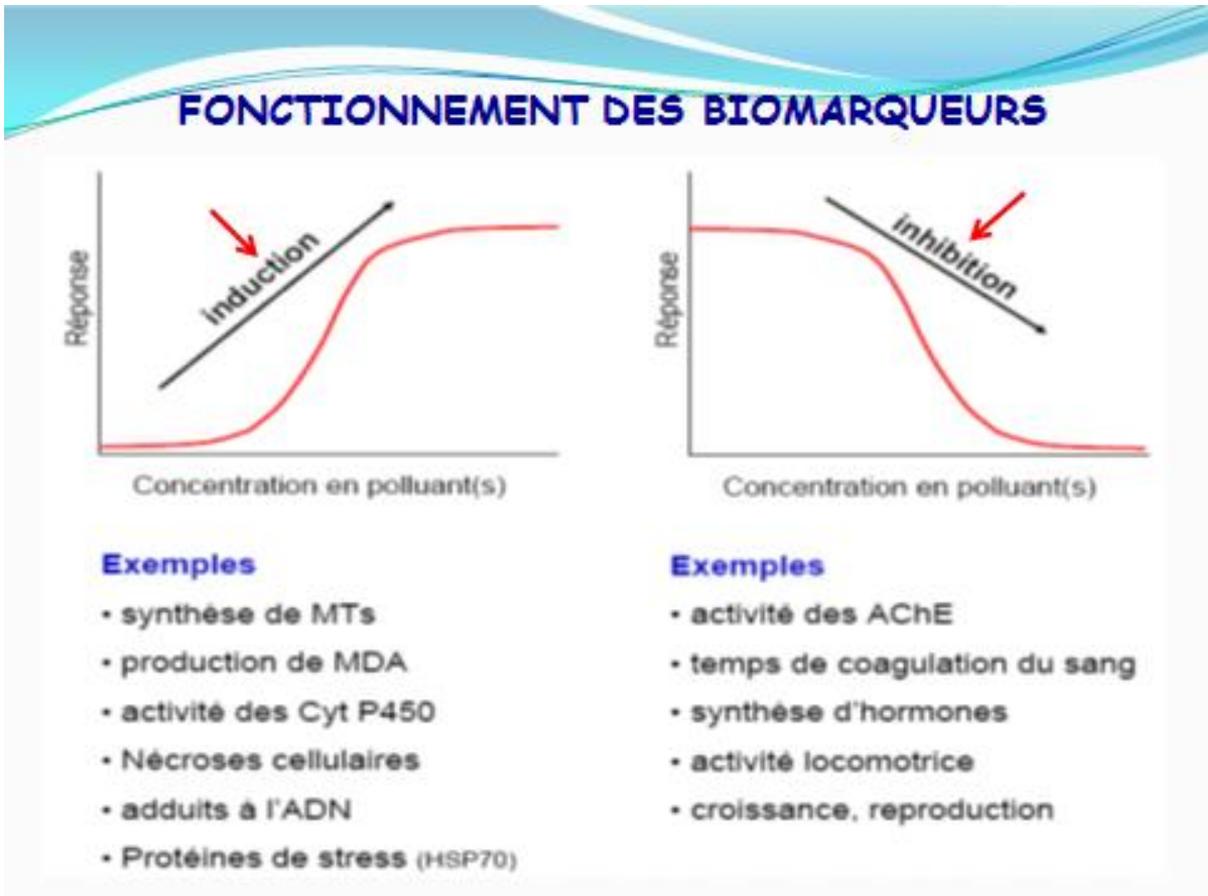
-Types :

-Biomarqueurs d'exposition: substance exogène ou son métabolite, ou le produit d'une interaction entre un agent xénobiotique et une molécule ou une cellule-cible quelconque, qui est mesurée dans un compartiment à l'intérieur d'un organisme.

-Biomarqueurs d'effet: altération biochimique, physiologique ou d'un autre type qui peut être mesurée à l'intérieur d'un organisme et qui, suivant son ampleur, peut être reconnue comme un trouble de la santé ou une maladie, établie ou potentielle.

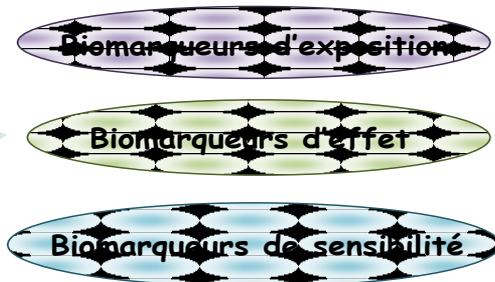
-Biomarqueurs de sensibilité: indiquent l'existence d'une sensibilité différente au toxique dans une partie de la population.

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



*** Biomarqueurs**

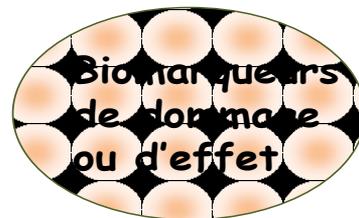
Depuis les années 80



Définition plus récente

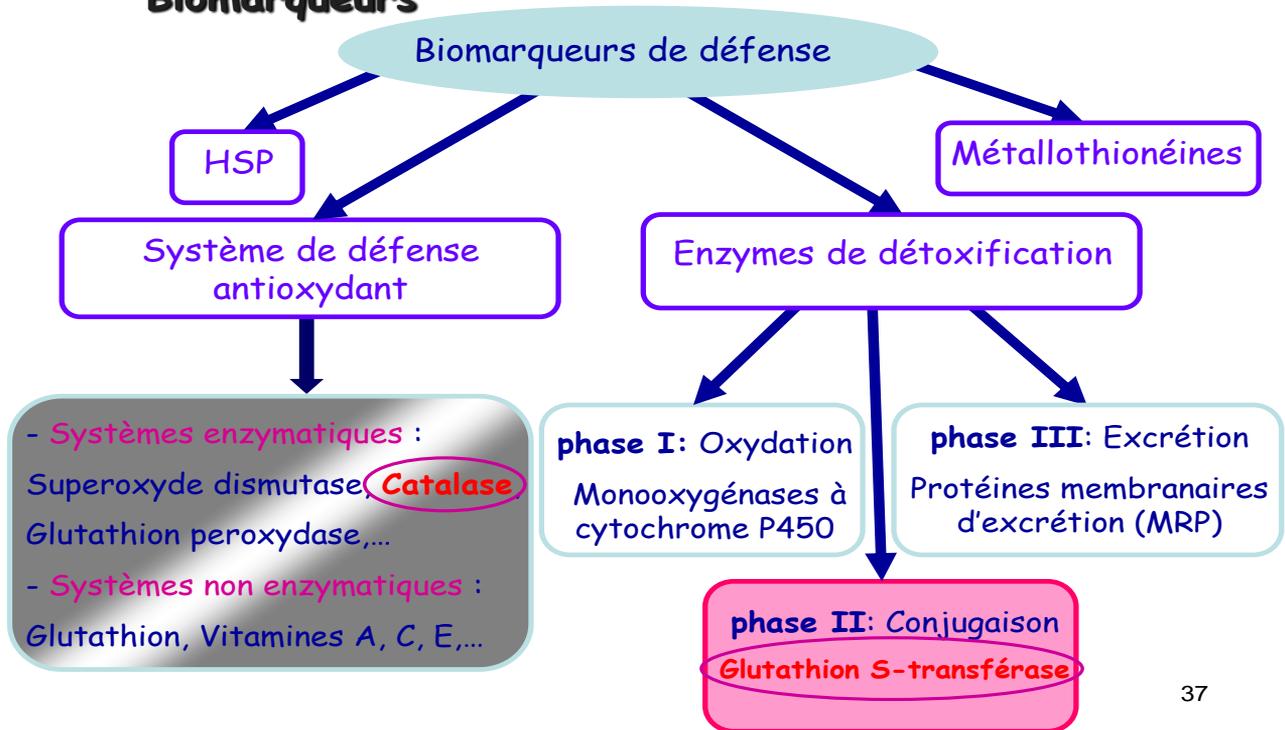


Réaction de défense de l'organisme exposé à un contaminant.



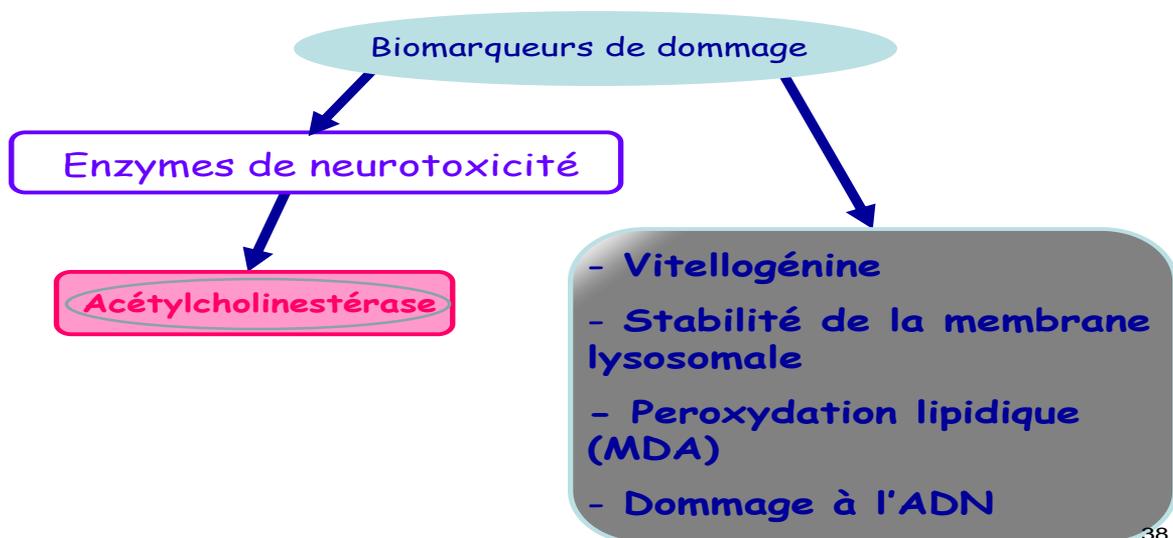
Modification directe et néfaste causée par un contaminant à un organisme.

* Biomarqueurs



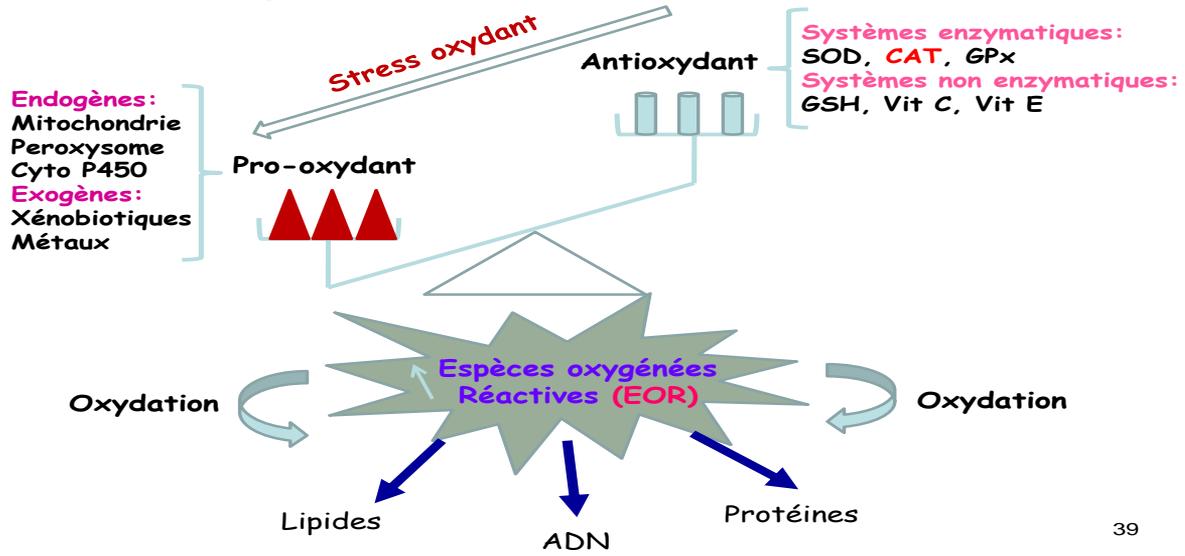
37

* Biomarqueurs



38

*** Biomarqueurs**



39

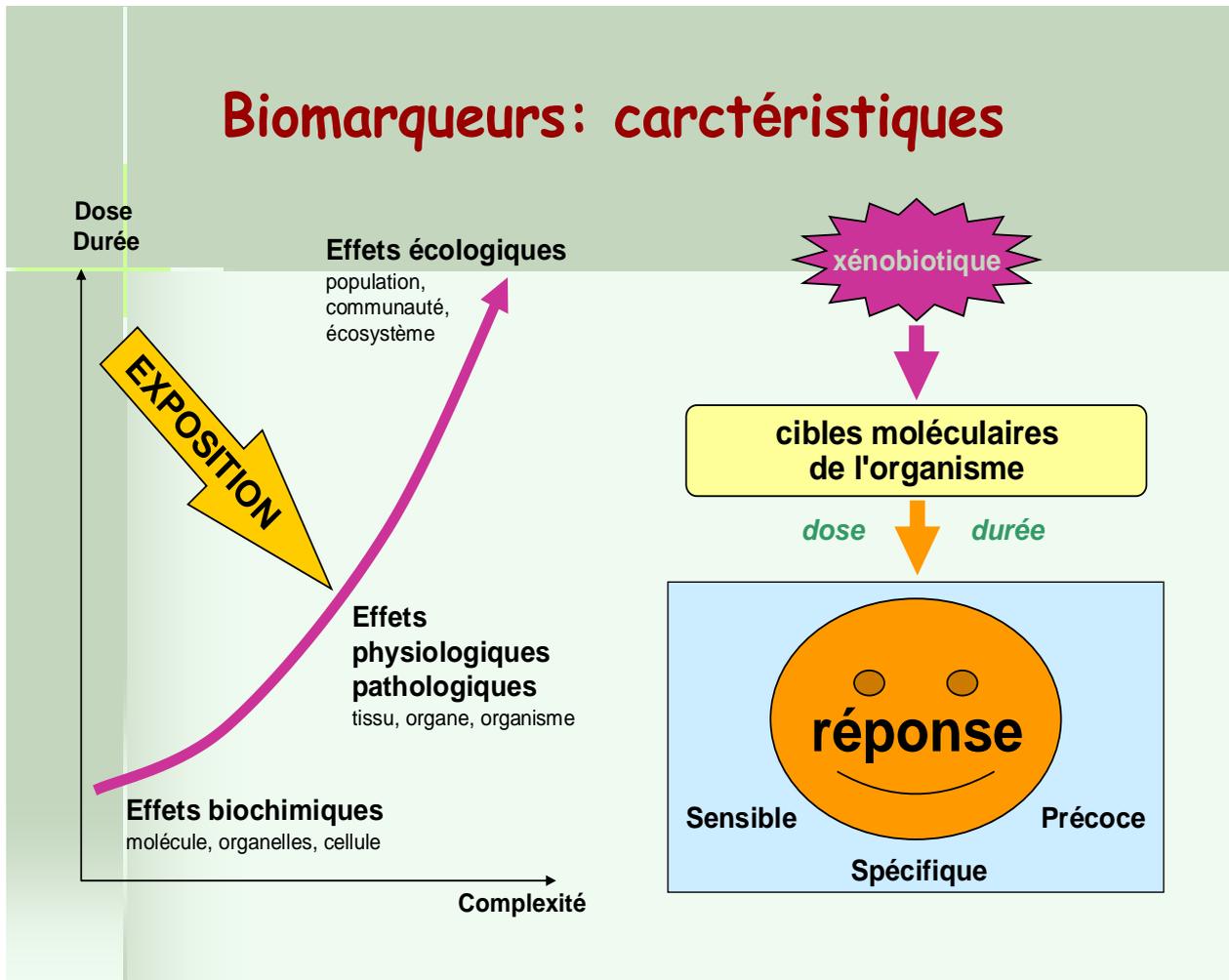


Figure 4. Caractéristiques des biomarqueurs.

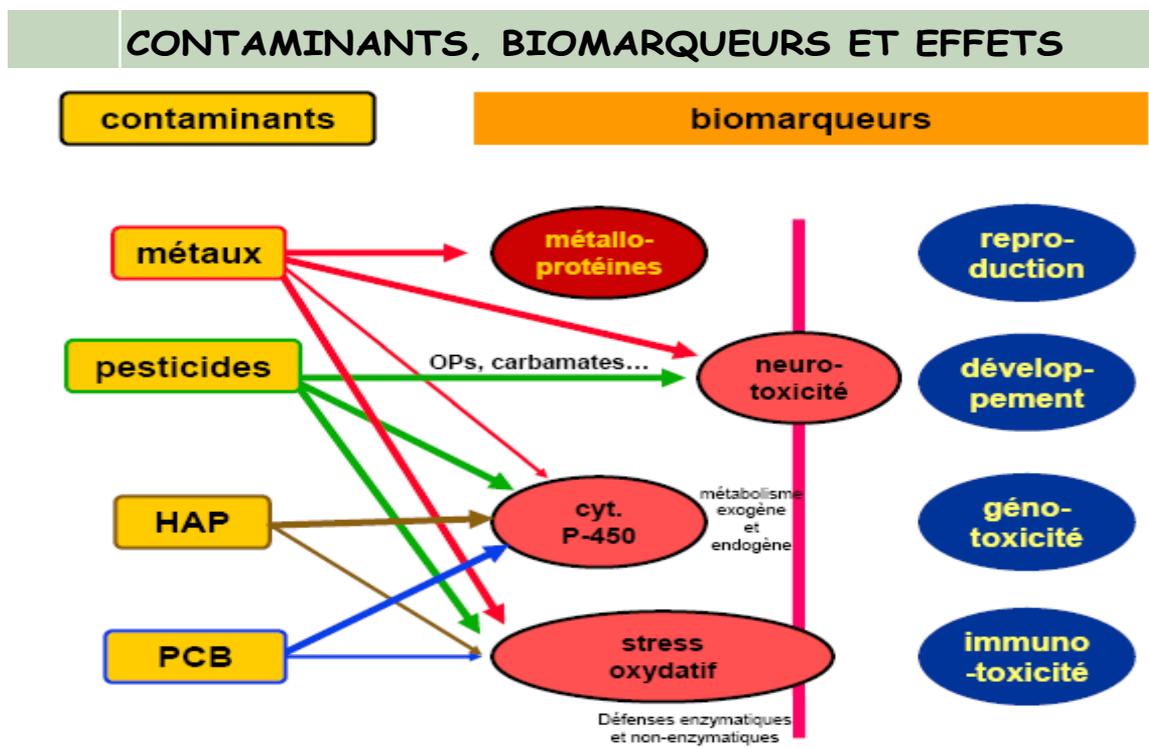


Figure 5. Les contaminants : biomarqueurs et effets.

8. Sources de pollution

Les principales sources de pollution sont les suivantes :

-Production d'énergie : utilisation et gaspillage de ressources non renouvelables avec comme conséquences de l'extraction et de la combustion du pétrole : marées noires, pollution continentale et littorale, développement du transport routier, contamination diffuse de l'air, effet de photo-oxydants produits par les gaz d'échappement sur la végétation, chauffage urbain, augmentation du SO₂.

-Activités industrielles : émissions de composés minéraux :

Métaux et métalloïdes : mercure, plomb, cadmium, arsenic

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

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

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

-Agriculture : engrais, pesticides.

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

9. Classification des polluants

a. Critères et classification :

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

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

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

Tableau 1 : Classification des polluants et leur présence dans les différents compartiments ou écosystèmes.

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

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

- Mégapolluants lorsque la substance considérée constitue environ 1% ou plus du sol/sédiment (masse sèche). C'est le cas de la matière organique morte qui peut en certains cas (absence d'oxygène être à l'origine d'effets toxiques par l'asphyxie résultant de sa décomposition).
- Macropolluants, lorsque la substance considérée représente quelques ppm (mg/kg) du substrat analysé. C'est le cas des métaux lourds ou de l'ammoniaque.
- Micropolluants, lorsqu'ils représentent quelques ppb (µg/kg) du substrat. C'est le cas des PCBs, HAPs, dioxines, pesticides.

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

Exemple : Les gaz à effet de serre (GES)

a. Historique :

-19^{ème} siècle: découverte de "l'effet de serre" de l'atmosphère

-Début du 20^{ème} siècle: hypothèses: soit les changements du CO₂ dans le passé ont pu influencer le climat, soit les activités humaines peuvent entraîner un accroissement du CO₂ atmosphérique, ce qui modifiera le climat.

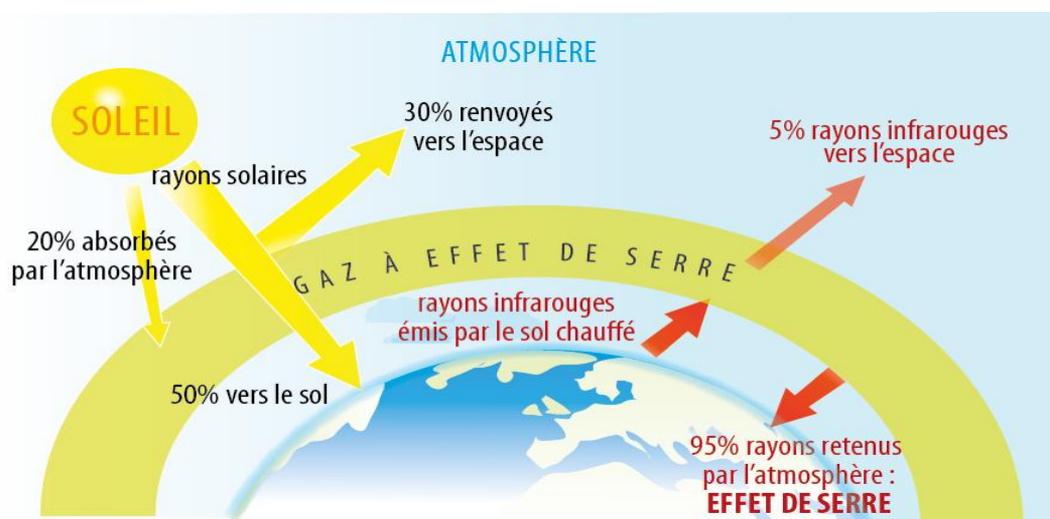


Figure 6. Schéma explicatif de l'effet de serre.

Les principaux gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	Source naturelle	Source humaine
Vapeur d'eau (H ₂ O)	Evaporation de l'eau surtout au-dessus des océans	Centrales électriques ; irrigation
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Respiration des êtres vivants ; feux de forêt ; volcans...	Utilisation massive d'énergies fossiles pour les transports, les bâtiments et l'agriculture ; déforestation
Méthane (CH ₄)	Digestion des herbivores ; décomposition des végétaux ; volcans	Intensification des élevages (bovin) et des cultures (riz) ; décharge d'ordures
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	Marécages	Utilisation d'engrais azotés
Ozone de basse atmosphère (O ₃)	Foudre	Industrie ; circulation automobile
Gaz fluorés (CFC, HFC, PFC)	N'existent pas dans la nature	Gaz des bombes aérosols et des climatiseurs

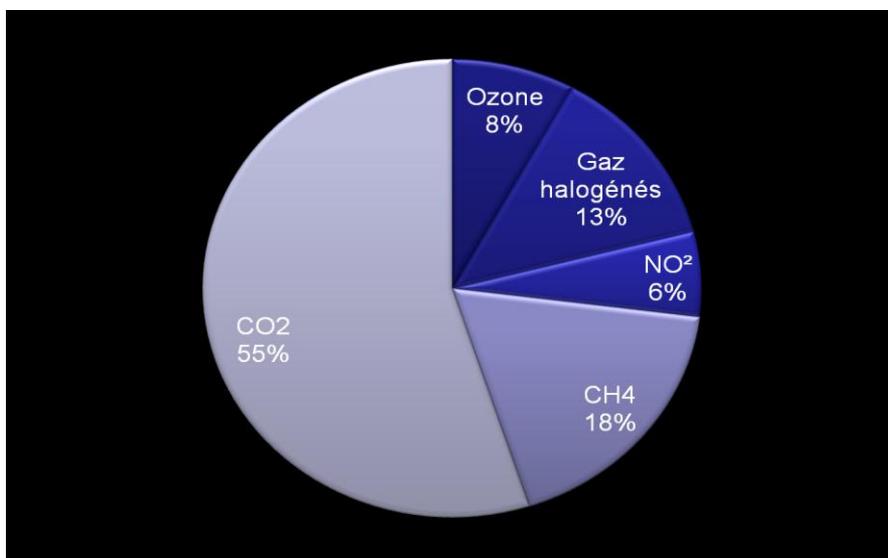


Figure 7. Pourcentages des différents gaz à effet de serre émis dans le monde

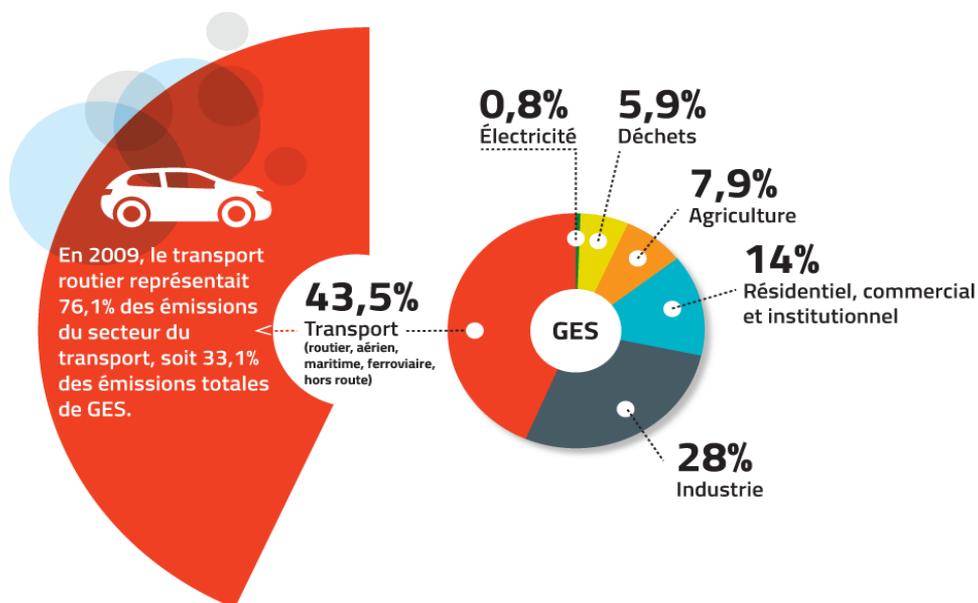


Figure 8. Principales sources d'émission des gaz à effet de serre dans le monde.

Tableau 2 : Comparaison éléments majeurs et éléments mineurs.

Caractéristiques des éléments mineurs et des éléments majeurs

Caractéristiques	Éléments mineurs	Éléments majeurs
Nombre	68	12
Concentration individuelle (%)	<0,1	>0,1
Concentration totale (%)	0,6	99,4
Exemples	Sr, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Rb	O, Si, Al, Na, Ca, K, Mg

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

-Les micropolluants:

1-Micropolluants minéraux:

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

2-Micropolluants organiques non pesticides:

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

3- Pesticides et biocides:

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

-Les Macropolluants:

- Phosphates,
- Nitrates
- Éléments majeurs

Tableau 3. Comparaison d'un macropolluant (phosphates) et d'un micropolluant (PCB).

Concentrations	Phosphates	PCB
Eaux d'égouts (mg/l)	1	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Poissons des eaux polluées (g/kg)	12	$5 \cdot 10^{-3}$
Production mondiale (tonnes/an)	60×10^6	40×10^3
Quantité journalière rejetée (g/hab./j)	6	8×10^{-4}

b. Différences entre les macropolluants et les micropolluants:

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

- les sources des micropolluants sont le plus souvent diffuses et difficilement contrôlables.
- leur faible concentration dans les déchets (gazeux, liquides ou solides) rend leur élimination difficile et leur analyse délicate et nécessitant un ensemble de techniques particulières.
- ils pénètrent facilement dans l'organisme.
- ils agissent selon l'un des deux premiers types d'action polluante à savoir par modification des réactions biochimiques de base ou par compétition au niveau d'une fonction essentielle.
- ils engendrent la perturbation des écosystèmes ou des troubles métaboliques chez les organismes pour des doses très faibles, généralement inférieures à 1 ppm (1 mg/kg).
- ils interfèrent avec les mécanismes biochimiques de base comme le cycle de Krebs.
- ils sont souvent peu biodégradables, s'accumulent dans l'environnement et leurs produits de dégradation peuvent être aussi dangereux que les molécules mères.

10. Règle des trois actions polluantes:**a. Modification des réactions biochimiques de base :**

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

b. Compétition au niveau d'une fonction essentielle :

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

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

c. Déplacement des équilibres dans l'environnement:

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

11. Pollution des écosystèmes et évaluation

a. Nocivité du polluant :

La nocivité dépend de plusieurs facteurs :

-La membrane biologique : Le polluant doit franchir la membrane biologique ou se fixer sur celle-ci. L'action des membranes biologiques est en effet double. 1/ Contrôler le passage de l'extérieur vers l'intérieur de l'élément en bloquant, ralentissant ou accélérant l'absorption. 2/ Fixer préférentiellement certains polluants de façon transitoire ou définitive en provoquant des atteintes structurales ou fonctionnelles souvent extrêmes pour la vie de la cellule.

-La nature du contaminant et des caractéristiques du milieu : Dans le cas du mercure, les facteurs de contamination (tels que les dérivés organiques ou inorganiques de mercure, les niveaux de concentration...) et les facteurs abiotiques (tels que : pH, chlorure) ont une influence importante dans le degré d'accessibilité du métal à la zone hydrophobe intra-lipidique et au flux transmembranaires.

-La nocivité du polluant dépend de la quantité pénétrant mais aussi de la spéciation chimique du polluant. Il est important de connaître les transformations, la localisation et les formes physico-chimiques de l'élément dans la cellule. Les formes physico-chimiques peuvent être divisées en deux grandes catégories : 1/ Les formes minéralisées relativement stables dans le temps et 2/ Les formes organiques, labiles dans le temps qui sont généralement des métalloprotéines.

b. Effet des polluants :

L'effet du polluant au niveau de l'organisme dépend de la **fonction physiologique** que remplit la cellule, le tissu ou l'organe altéré par le polluant. Ceci implique l'importance des **études de la localisation** du polluant dans l'organisme. Selon la réponse des **organes** aux phases de contamination et de décontamination, on peut distinguer :

-Les organes receveurs et les organes donneurs.

-Les voies préférentielles d'entrée et de sortie des polluants.

-Les processus cumulatifs ou limitatifs (cumulatifs se concentrent dans l'organisme tout au long de son existence, cas du Cd et Hg chez les mammifères ovins).

L'ingestion de certains organes de **stockage** de polluants très toxiques peut présenter un risque pour le prédateur (ou l'homme qui est consommateur). Dans les Iles Feroë, il a été déconseillé aux habitants de manger le foie et les reins d'un mammifère qu'ils chassent, car ces organes contiennent de quantités énormes de cadmium et de mercure (notion de organotropisme qui a un intérêt sanitaire).

La bioaccumulation au niveau de l'organisme sera tributaire de **nombreux facteurs** et en premier lieu :

- de la nature de l'élément métallique suivant qu'il ait un rôle biologique ou non et qu'il soit réguler ou non par l'organisme.
- de facteurs biotiques comme le stade vital, l'âge, le sexe et l'état physiologique.
- de facteurs abiotiques comme le degré de pollution, la saison (facteurs climatiques ?).

De plus, la plupart de ces facteurs interagissant et il sont souvent difficiles de faire la part de chacune. **L'étude de la bioaccumulation** au niveau d'un organisme entier aura un **triple intérêt** :

- possibilité d'effectuer des bilans en terme de quantité utiles dans le calcul des flux biogéochimique.
- possibilité de quantifier le transfert par voie trophique.
- possibilité d'utiliser ensuite certaines espèces comme indicatrices de pollution (Mollusques Bivalves, Lichens, Echinodermes...).

Chez les organismes aquatiques, la pénétration des polluants (dont les métaux) peut se faire soit **directement par l'eau** (pénétration branchiale, cutanée, digestive...) soit par **l'intermédiaire de la nourriture**. La part respective de ces deux voies aura des conséquences sur :

- l'organotropisme.
- l'élimination (mécanisme de détoxification, métalloprotéines)
- la spéciation chimique du polluant (biodisponibilité et toxicité).

L'exposition chronique à des doses sub-létales peut induire une **tolérance** à ce polluant. **Plusieurs hypothèses** ont été avancées concernant l'acquisition de la tolérance. Les mécanismes responsables de cette tolérance :

- a- les relations entre l'acclimatation de certaines espèces animales aux métaux et la présence dans leur organisme de métallothionéines (ou autres métalloprotéines) ou l'augmentation de la synthèse de cette protéine.
- b- La redistribution du polluant au sein de l'organisme correspondant à un stockage au niveau de sites biochimiques moins sensibles.
- c- La variation des capacités d'absorption et/ou d'excrétion.

c. Evaluation des effets:

Le développement de l'industrie, surtout après la deuxième guerre mondiale, a entraîné une contamination de l'environnement par une quantité et une diversité croissante de substances toxiques d'origine industrielle telles les métaux lourds, et d'origine agricole telles les fertilisants ou le pesticides.

La toxicité de ces produits s'exerce à différents niveaux de l'écosystème:

- soit sur les proies des animaux Vertébrés et/ou Invertébrés.
- soit sur les constituants de leurs habitats (herbicides).
- soit sur la faune elle-même (réduction de la fertilité et augmentation de la mortalité). Les effets des polluants sont souvent peu décelables rendant ainsi leur évaluation difficile. On peut distinguer principalement trois modes d'absorption du toxique dans l'organisme :
- la voie respiratoire (toxicité par inhalation).

- la voie trans-tégumentaire (toxicité percutanée ou par contact)
- la voie orale (toxicité par ingestion ou per os).

Plusieurs types d'effets sont induits par une contamination:

- les effets immédiats de mortalité (toxicité aiguë) sont difficiles à constater surtout quand il s'agit de fortes doses de polluants absorbées en une ou plusieurs fois.
- les effets sub-létaux (toxicité sub-létale) observés chez une population contaminée qui présente une proportion significative d'individus survivants bien que tous les individus manifestent des troubles métaboliques.
- les effets à long terme (toxicité chronique) sont plus importants et se manifestent à des doses plus faibles.

Exemple : le toluène

- Seuil de toxicité aiguë = 6,3 mg/l (tests effectués sur poissons, *Oncorhynchus kisutch*, pendant 96 heures).
- Seuil de toxicité chronique = 1,4 mg/l (tests effectués sur poissons, *Oncorhynchus kisutch*, pendant 40 jours).

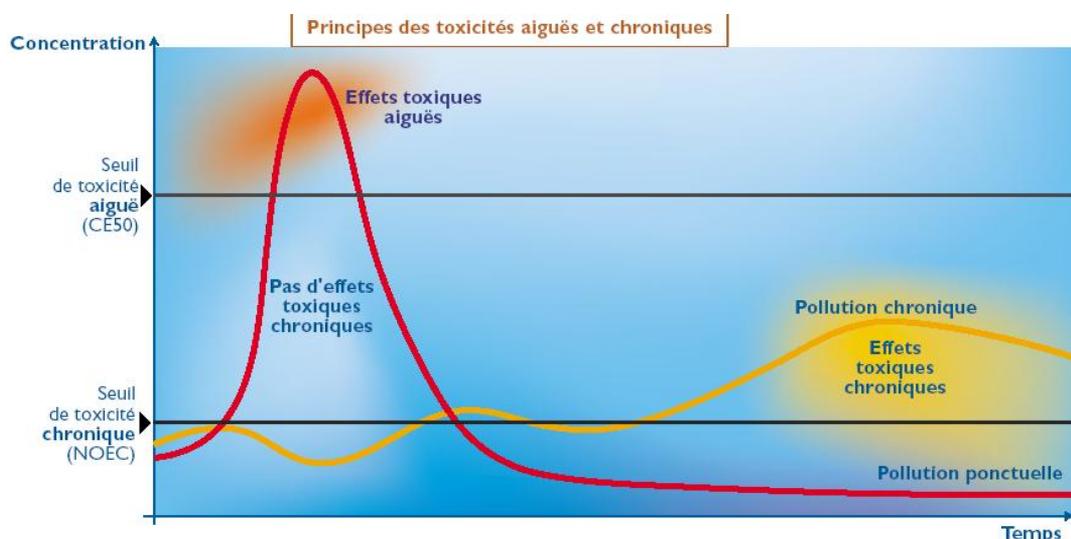


Figure 9. Principe des toxicités aiguë et chronique.

Tableau 4: Comparaison de la toxicité aiguë et la toxicité chronique.

Type de toxicité	Dose contaminant	Durée exposition	Processus	Norme de toxicité*
Toxicité aiguë	Elevée	Court terme	Limitatif	CE ₅₀
Toxicité chronique	Faible	Long terme	Cumulatif	NOEC

* : CE50= Concentration médiane efficace; NOEC= no observed effect concentration.

Les tests d'écotoxicité sont réalisés sur des espèces sauvages ou qui peuvent servir de modèle pour ces espèces:

- Pour les écosystèmes terrestres, des tests de toxicité chronique (toxicité à long terme) sont réalisés sur diverses espèces d'oiseaux telles la caille japonaise (*Coturnix coturnix japonica*) qui est la plus utilisée.

- Pour les écosystèmes aquatiques, de nombreux tests ont été développés tant sur des Vertébrés, des Invertébrés que sur des végétaux. Signalons les tests réalisés sur des algues unicellulaires, sur les Daphnies et sur diverses espèces de poissons appartenant aux genres *Salmo* (*S. gairdneri*) et *Brachydanio* (*B. rerio*). Ces deux espèces de poissons servent surtout dans le cadre d'étude d'impact des pesticides organochlorés.

Relations de causalité et létalité des organismes

a. Relations de causalité :

Etablir les conditions expérimentales assurant la relation de causalité entre la présence d'un toxique et les effets induits d'une manière intentionnelle (expérimentation provoquée) ou non intentionnelle (expérimentation accidentelle). **5 principaux critères** d'évaluation en épidémiologie:

1-La spécificité: Description des signes pathologiques associés à la pathologie.

2-La force du lien entre les variables: Les statistiques permettent une validité à la relation entre l'intensité des symptômes et les teneurs en toxique.

3-La relation d'ordre temporelle : La causalité n'est démontré que si la cause précède l'effet.

4-La reproductibilité : La relation cause-effet peut être retrouvée (équipes et époques différentes, protocoles variés).

5-La cohérence : Identification d'un mécanisme plausible sur la cause responsable des effets observés.

b. Létalité des organismes :

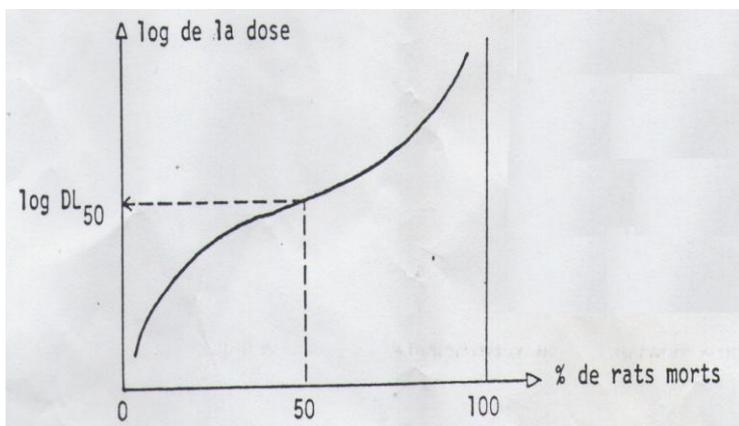
Doses et concentrations létales: Différentes formes de toxicité (inhalation, contact, ingestion ou injection sous-cutanée ou intra-péritonéale) sont déterminées sur un échantillon de population d'une espèce animale de référence.

-Estimation de la dose létale 50 (**DL50**) c'est à dire la dose de toxique dans la nourriture ou l'eau qui entraîne la mort de 50% des animaux testés au terme d'une période courte d'intoxication (24, 48 ou 96 h) ou toxicité aigüe.

-Il est possible de calculer la **DL10** (marque la limite entre toxicité aigüe et subaigüe) et la **DL90** (intérêt pratique dans la recherche intentionnelle de la toxicité comme le screening des pesticides).

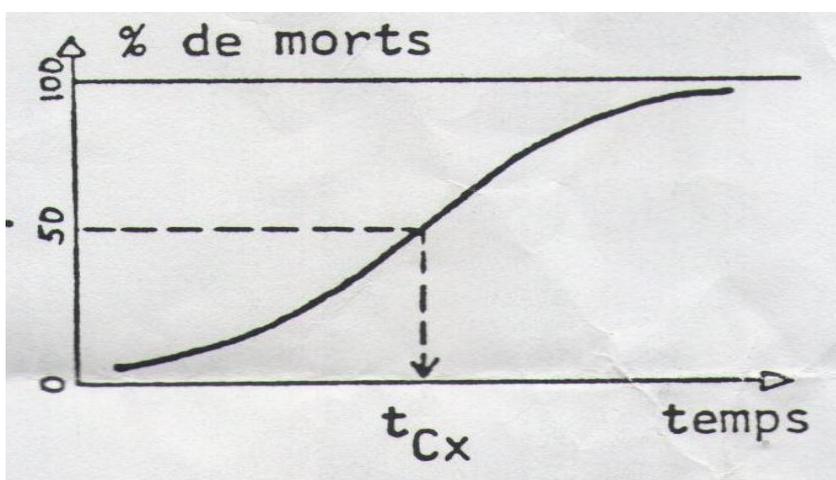
Temps létales: Détermination des mortalités consécutives à l'application d'une **dose constante** en fonction de temps croissants. On en déduit le temps létales moyen (**TL50**), temps théorique au bout duquel doivent périr 50% des individus exposés à une teneur déterminée de toxique. On porte tous les points correspondants à la TL50 de chaque concentration en polluant dans l'eau sur une courbe en fonction du log des concentrations testées. On définit arbitrairement la **CL50** comme étant la concentration correspondant à un temps de survivance de 96 heures.

Pourcentage de mortalité en fonction de la dose (DL50)



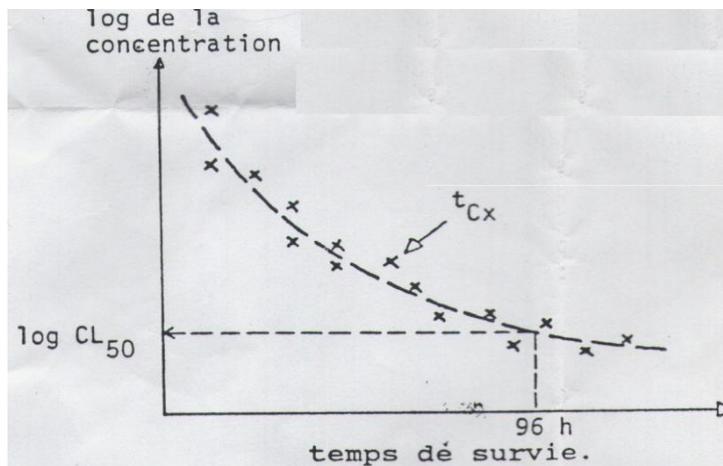
On donne à différents lots de rats des doses croissantes de produit. On note le % de morts dans chaque lot et on le porte sur un graphique en fonction du log des doses administrées.

Pourcentage de mortalité en fonction du temps (TL50)



Pour chaque concentration C_x en polluant dans l'eau on porte la courbe du % de morts en fonction du temps. On note le temps t_{Cx} correspondant à 50% de morts.

Détermination de la concentration létale 50 (CL50)



On porte tous les points t_{Cx} sur une courbe en fonction du log des concentrations, on définit arbitrairement la CL₅₀ comme étant la concentration correspondant à un temps de survie de 96 heures.

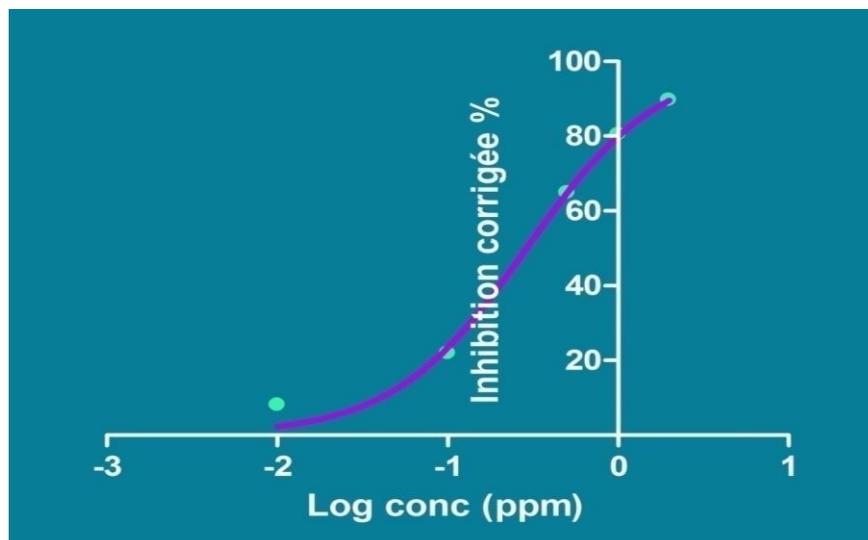


Figure 2. Courbe dose-réponse exprimant le pourcentage d'inhibition corrigée en fonction du logarithme de la concentration du pyriproxyfène (ppm) chez les larves du troisième stade de *Drosophila melanogaster* ($R^2= 0,993$).

12. Niveaux d'étude des polluants

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

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

- d/ le niveau des écosystèmes naturels,
- e/ le niveau des écosystèmes contrôlés (=écosystèmes expérimentaux ou bassins de simulations).

a. Le niveau biochimique et cellulaire:

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

b. Le niveau des organismes:

L'impact des polluants est étudié sur :

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

c. Le niveau des populations:

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

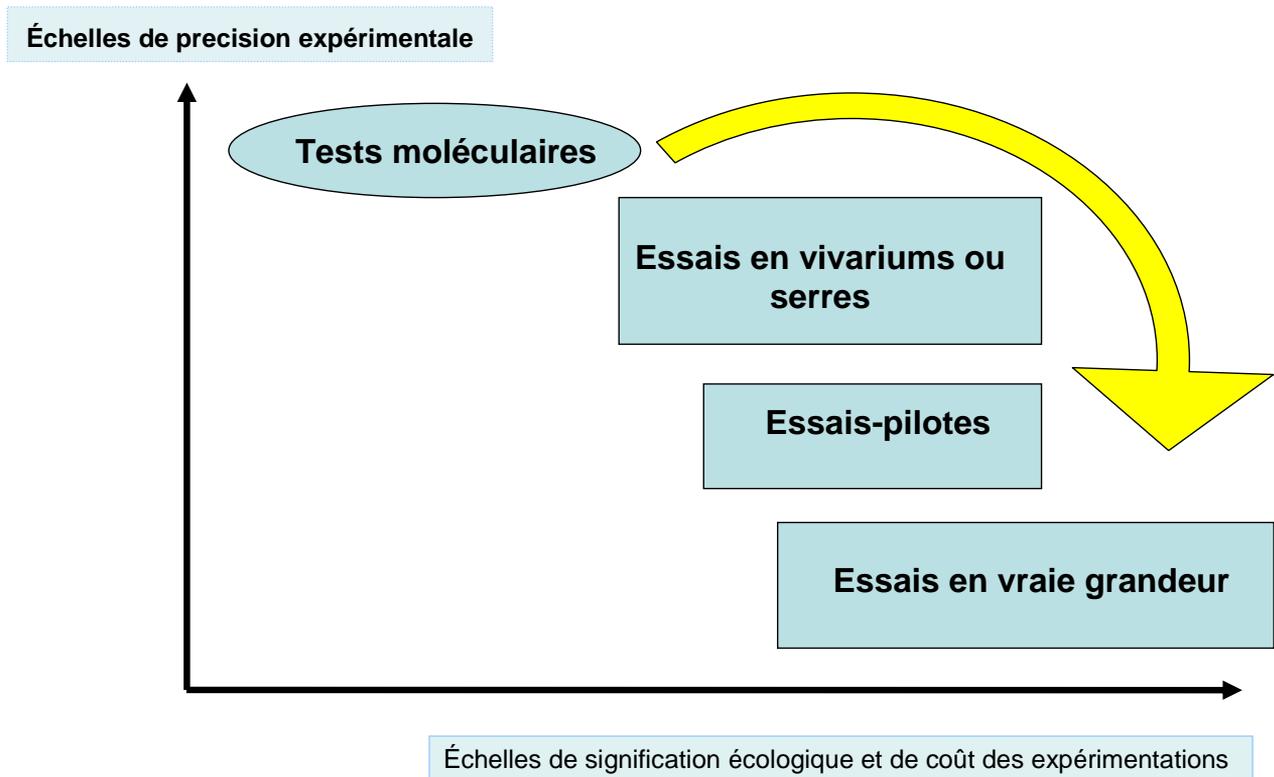
- paramètres de structure: détermination des classes d'âge et des classes de génération.
- paramètres de fonction: détermination des taux de croissance des individus des différentes classes d'âge et les taux de reproduction par exemple.

d. Le niveau des écosystèmes naturels:

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

e. Le niveau des écosystèmes contrôlés:

Il n'est qu'une variante du niveau des écosystèmes naturels. Il permet de combler le vide qui existe entre les essais de laboratoire et l'observation du milieu naturel. Les études portent sur de petits écosystèmes tels les microcosmes (quelques litres) ou mésocosmes (quelques m³). La durée est comprise entre 1 mois et 1 année. On distingue deux types de recherche: 1/ les recherches menées en laboratoire (difficilement extrapolables pour le milieu naturel), se réalisant au niveau biochimique et des organismes et permettent d'établir des seuils d'action (toxicité d'une substance et normes) pour un niveau donné, et 2/ des recherches de terrain (niveau des populations et niveau des écosystèmes naturels) plus réaliste sur le plan écologique, plus longue et coûteuse.



Les problèmes de la recherche aux diverses échelles de l'expérimentation.

Figure 10. Précisions expérimentale et échelle de signification écologique.

13. Evaluation environnementale :

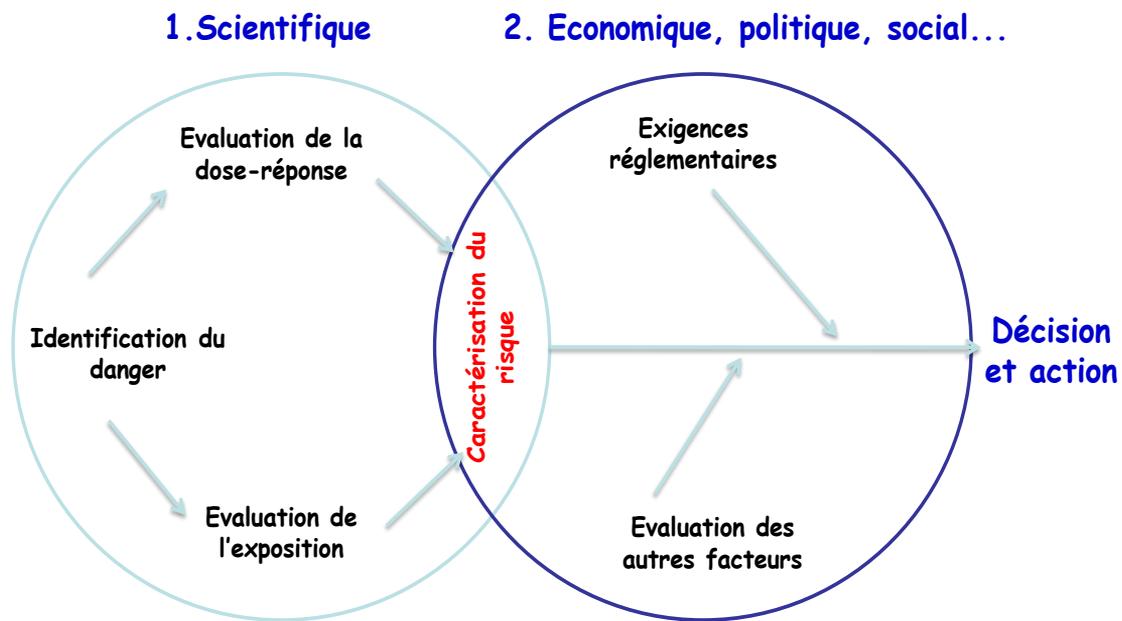
a. Définition : L'évaluation environnementale est **un processus** qui consiste à évaluer et à documenter les possibilités, les capacités et les fonctions des ressources, des systèmes naturels et des systèmes humains afin de faciliter la planification du développement durable et la prise de décisions en général, ainsi qu'à prévoir et à gérer les effets négatifs et les conséquences des propositions d'aménagement, en particulier (ANDRE *et al.*, 1999).

b. Critères : L'évaluation environnementale se base sur les **critères** suivants :

- Exploitabilité
- Diversité
- Efficacité
- Salubrité
- Bien être
- Pérennité

c. Diagnostics : Les **diagnostics environnementaux** se fondent sur deux types d'éco-évaluation :

- 1- Etude fondée sur les analyses physico-chimiques de l'abios.
- 2- Approche basée sur une bio-évaluation (biocénoses).



Éléments fondamentaux de l'évaluation du risque et leurs interrelations (Scala, 1991).

14. Développement durable

Développement Durable

- 1980: Union Internationale pour la Conservation de la Nature
- 1987: Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement
«Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs »
- Valeurs: Responsabilité, Partage, Participation, Précaution....
- Double approche: Temps et espace

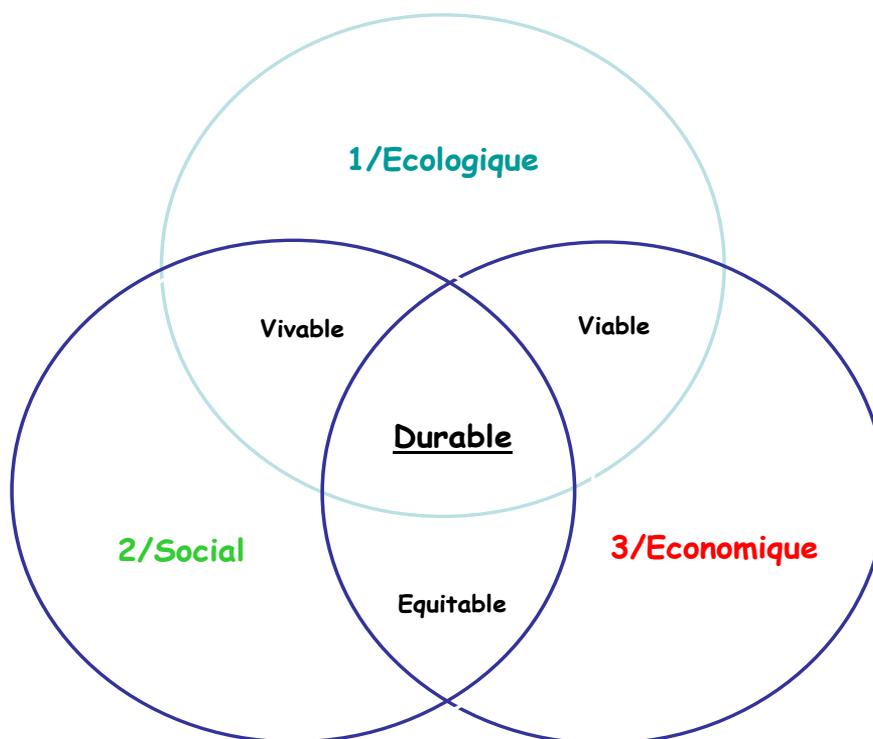


Schéma du développement durable: confluence de trois préoccupations ou « trois piliers du développement durable »