

Chapitre 1 : Notions de base sur l'Ecotoxicologie

1. Introduction à l'écotoxicologie

Avec le développement rapide de l'industrie chimique depuis le début du vingtième siècle, l'environnement s'est trouvé contaminé par des quantités croissantes de polluants chimiques d'origines diverses, industrielles ou agricoles. Ces polluants qui sont susceptibles d'affecter tous les compartiments de l'écosystème (sol, eau et air), ont des impacts non seulement sur l'environnement, mais aussi sur la santé humaine, avec des conséquences économiques non négligeables.

La prise de conscience progressive des effets irréversibles de la pollution sur les écosystèmes (extinction des espèces, appauvrissement de la diversité biologique ...) a conduit à évaluer les effets toxiques directs et indirects des polluants sur les organismes non ciblés et à s'intéresser à leur devenir dans l'environnement. Ainsi, une demande majeure se dégage pour promouvoir la recherche dans le domaine de l'écotoxicologie.

L'écotoxicologie est une discipline scientifique qui étudie les effets des substances toxiques sur les écosystèmes et les organismes vivants. Elle se situe à l'interface entre la toxicologie et l'écologie, analysant comment les polluants (métaux lourds, pesticides, hydrocarbures, plastiques, produits pharmaceutiques, etc.) interagissent avec l'environnement et affectent la biodiversité. L'objectif principal de l'écotoxicologie est d'évaluer les risques environnementaux liés à ces substances, de comprendre leurs mécanismes d'action et de proposer des stratégies de prévention et de remédiation.

2. Notions de base :

Toxicologie : est la science qui étudie les effets des substances toxiques d'origine anthropique, des toxines animales, végétales ou bactériennes et des agents physiques tels que les rayonnements ionisants et les ondes électromagnétiques sur la santé des organismes (homme, animal, végétal). Ceci implique l'analyse des agents toxiques, l'étude de leur voie de pénétration dans l'organisme, la modélisation et l'observation de leur devenir, l'étude de leurs effets, les moyens de les détecter et de les combattre. 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).

Les principaux domaines de la toxicologie comprennent :

- **Toxicologie expérimentale** : Étudie les mécanismes d'action des toxiques sur les organismes.
- **Toxicologie clinique** : Analyse les effets des substances toxiques sur la santé humaine.
- **Toxicologie réglementaire** : Fixe des normes et réglementations pour limiter l'exposition aux toxiques.
- **Toxicologie environnementale** : Étudie l'impact des contaminants sur l'environnement et les écosystèmes.

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).

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.

Peut agir comme un polluant :

- **Toute modification d'un processus physique** qui conduit à accroître les flux d'énergie ou les niveaux de radiation dans l'environnement,
- **Espèce allochtone** introduite dans un écosystème éloigné de son aire d'origine.

Exp : - le CO₂ est un gaz naturel et essentiel à la photosynthèse mais lorsqu'il dépasse certain gaz il devient une substance toxique qui participe à la dégradation de la couche d'ozone.

-le DDT est une substance de synthèse fabriquée par l'Homme pour l'utilisé comme pesticide dans l'agriculture ; cette substance est polluante pour l'environnement.

Biosphère : La biosphère est considéré comme l'écosystème ultime c'est-à-dire l'ensemble des écosystèmes constitue la biosphère. La biosphère se subdivise en 03 constituants : l'atmosphère (air), la lithosphère (sol) et l'hydrosphère (eau). Les trois éléments constituent les compartiments essentiels touchés par la pollution.

Écotoxicologie est la science qui étudie le comportement et les effets toxiques d'agents d'origine anthropique sur les écosystèmes, ou bien d'agents de produits d'origine naturelle, dont l'Homme modifie la répartition dans les différents compartiments de la biosphère et ceci en fonction de la nature de ces agents, leur concentration dans les milieux et leur rémanence. Ainsi, l'Écotoxicologue étudie les mécanismes et les conséquences écologiques de la pollution à l'échelle des populations et des communautés.

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).

L'écotoxicologie est une branche de la toxicologie qui se concentre sur l'étude des effets des polluants sur les écosystèmes et les organismes vivants dans leur milieu naturel. Introduite par René Truhaut en 1969, cette discipline est interdisciplinaire et combine des notions de biologie, chimie, écologie et sciences de l'environnement.

L'écotoxicologie 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 (**Fig. 1**).

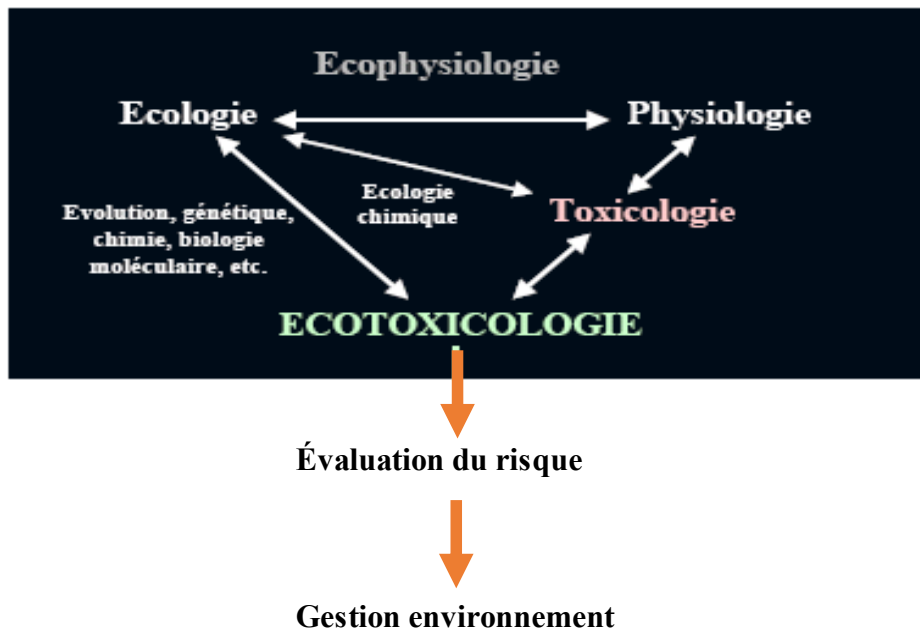


Figure 1 : Interactions des différentes disciplines liées à l'écotoxicologie

3. Principaux objectifs de l'écotoxicologie :

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. Parmi les principaux objectifs :

1. **Étudier les sources de pollution (industrielle, agricole, domestique).**
2. **Étudier la toxicité des substances chimiques (métaux lourds, pesticides, produits pharmaceutiques).**
3. **Analyser le devenir des substances toxiques dans l'environnement (biodégradation, bioaccumulation, biotransformation).** Le devenir des polluants dans l'environnement peut se faire par :
 - a. **Transport** : Mouvements des polluants dans les milieux (air, eau, sol).
 - b. **Transformation** : Modification chimique ou biologique (ex. : oxydation, photodégradation).
 - c. **Accumulation** : Rétention des polluants dans des réservoirs environnementaux (sols, sédiments, organismes).
4. **Les impacts biologiques des polluants à court et long terme sur les écosystèmes :** L'écotoxicologie analyse les effets des substances toxiques (chimiques ou physiques) sur les organismes vivants et les écosystèmes. Elle vise à comprendre leurs impacts à différents niveaux biologiques (**Fig. 2**) :

a. Niveau moléculaire :

- Modifications de l'ADN, stress oxydatif, inhibition enzymatique.
- Exemple : Les pesticides peuvent bloquer des voies métaboliques chez les insectes.

b. Niveau individuel :

- Altérations comportementales, anomalies de développement, mortalité.
- Exemple : Les poissons exposés à des hydrocarbures peuvent développer des malformations.

c. Niveau populationnel :

- Réduction de la taille des populations, déséquilibre démographique.
- Exemple : Le déclin des populations d'abeilles causé par les néonicotinoïdes.

d. Niveau écosystémique :

- Déséquilibres trophiques, diminution de la biodiversité, perte de services écosystémiques.
- Exemple : L'eutrophisation des milieux aquatiques liée aux nutriments peut entraîner l'effondrement des chaînes alimentaires.

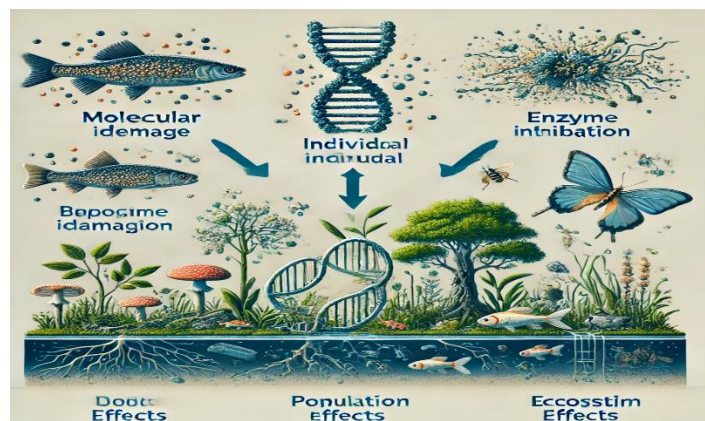


Figure 2. Les impacts des substances toxiques à différents niveaux biologiques : moléculaire, individuel, populationnel et écosystémique.

5. Évaluer le comportement et le devenir des (substances toxiques) polluants dans les écosystèmes (biodisponibilité, bioaccumulation, biotransformation, biodégradation).
6. Évaluer et analyser les effets des toxiques ou biologiques à différents niveaux : moléculaire, cellulaire, individuel, populationnel et écosystémique (toxicité aiguë et chronique).
7. Proposer des solutions de gestion et de prévention des risques environnementaux :
L'écotoxicologie analyse les effets des substances toxiques afin de mieux gérer les risques qu'elles présentent pour les écosystèmes et la santé humaine. Cette gestion repose sur :
 - a. L'identification des dangers : Évaluation des substances toxiques et de leurs propriétés intrinsèques.

- b. L'évaluation de l'exposition** : Déterminer les voies et niveaux d'exposition des organismes et des humains.
- c. La caractérisation du risque** : Établir le lien entre danger et probabilité d'exposition pour déterminer l'ampleur du risque.

➤ **Étapes de la gestion des risques écotoxicologiques**

✓ **Analyse environnementale :**

- Surveillance des concentrations de polluants dans les différents milieux (air, eau, sol).
- Modélisation de la dispersion des substances toxiques.

✓ **Tests d'écotoxicité :**

- Tests en laboratoire (effets sur les espèces modèles comme les daphnies ou les algues).
- Études sur le terrain pour évaluer les impacts réels sur les écosystèmes.

✓ **Établissement de seuils réglementaires :**

- Définir des concentrations maximales admissibles (exemple : seuils de qualité de l'eau pour les pesticides).

✓ **Actions correctives et préventives :**

- Restauration écologique des milieux dégradés.
- Sensibilisation et régulation sur l'utilisation des substances toxiques.

8. La mise en œuvre de mesures préventives : Limitation ou élimination des sources de pollution, utilisation de substances moins toxiques, et restauration des milieux impactés

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

Généralement l'écotoxicologie a deux objectifs principaux :

- ✚ Étudier les processus de contamination des milieux.
- ✚ Évaluer les effets des polluants à l'égard de la structure et du fonctionnement des systèmes naturels.

4. Méthodologies et approches en écotoxicologie :

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 (**Fig. 3**).

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.

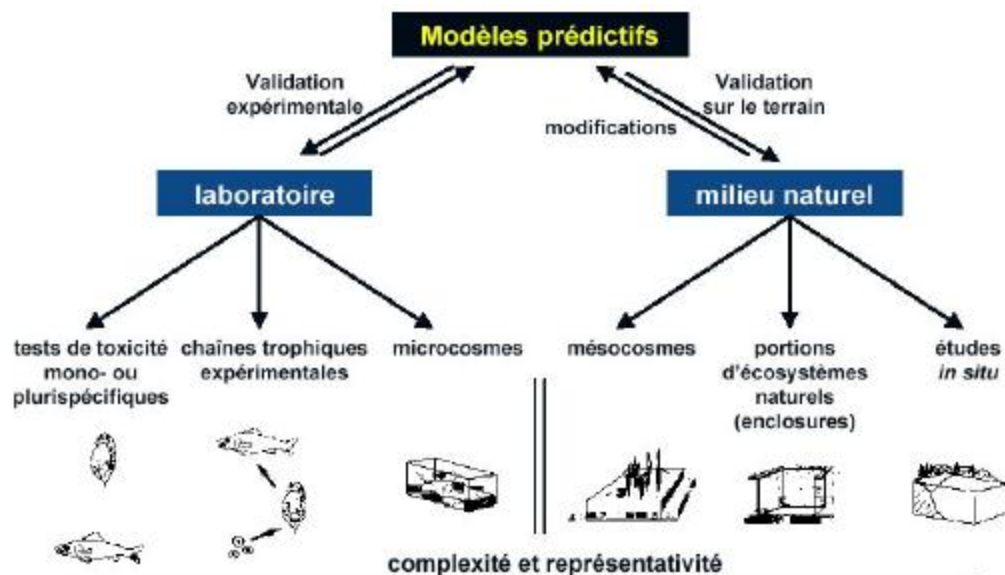


Figure. 3 : Échelles différentes d'études en écotoxicologie.

La méthodologie en écotoxicologie s'appuie généralement sur quatre points essentiels :

- Enquête sur le terrain :** Consultation des statistiques, recours aux enquêtes épidémiologiques ...
- Nature du toxique :** Analyses quantitatives et qualitatives, mode d'introduction du toxique, présence naturelle ...
- Devenir du toxique :** Transformation, biodégradabilité, accumulation ...
- Tests d'écotoxicité :** Test directe (espèces isolées) et Test intégrée (des écosystèmes).

5. Méthodes et Outils d'Évaluation : L'écotoxicologie utilise divers tests pour évaluer l'impact des polluants :

- Tests *in vitro* et *in vivo* (sur cellules ou organismes modèles).
- Biomarqueurs (mesure des effets biologiques des polluants).
- Modélisation environnementale (simulation de la dispersion et des effets des polluants).

6. Concepts Clés en Écotoxicologie (Fig. 4, 5).

-Bioindicateur : Le bioindicateur est défini comme un simple relais faisant référence uniquement à des effets observables au niveau de l'individu se traduisant par des altérations morphologiques, tissulaires ou physiologiques. Son utilisation ne concerne, d'une part, que des polluants fortement phytotoxiques ou présents à des concentrations élevées et, d'autre part, que des végétaux sensibles.

-Bioaccumulation : fait référence à l'accumulation progressive de substances chimiques (souvent des polluants) dans les tissus d'un organisme au fil du temps, résultant de l'absorption de ces substances plus rapidement qu'elles ne peuvent être éliminées. Ce processus peut se produire à travers l'alimentation, la respiration ou l'absorption cutanée. Certains polluants peuvent devenir toxique en s'accumulant dans certaines plantes par petites doses jusqu'à l'apparition d'effets nocifs. Donc C'est l'accumulation progressive d'une substance toxique dans un organisme vivant au fil du temps.

- **Exemple** : Le mercure peut s'accumuler dans les tissus des poissons et être transmis aux prédateurs supérieurs.

-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.

-Biomagnification : Ce processus se produit lorsque les polluants bioaccumulés dans les organismes sont transférés à travers la chaîne alimentaire. Cela peut entraîner une augmentation des concentrations de contaminants à chaque niveau trophique. Par exemple, un prédateur au sommet de la chaîne alimentaire (comme un aigle ou un grand poisson carnivore) peut accumuler des concentrations beaucoup plus élevées de contaminants (tels que le mercure ou les PCB) que ses proies.

-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).

-Biodisponibilité : La biodisponibilité est un concept clé en écotoxicologie Capacité d'une substance à être absorbée par un organisme. Elle désigne la proportion d'un contaminant qui est disponible pour être absorbée par un organisme à partir de son environnement.

-Biomagnification : Augmentation de la concentration d'un toxique à travers la chaîne alimentaire.

-Effets sublétaux : Les **effets sublétaux** sont des effets toxiques qui ne provoquent pas directement la mort de l'organisme, mais qui peuvent **altérer sa physiologie, son comportement, sa reproduction ou son développement.**

- **Exemples :**

- Modification du comportement (ex. désorientation chez les poissons exposés aux pesticides).
- Réduction de la fertilité chez les oiseaux exposés aux perturbateurs endocriniens.
- Développement anormal des amphibiens exposés aux métaux lourds.

-Substances prioritaires : Polluants identifiés comme dangereux en raison de leur toxicité, persistance et capacité à se bioaccumuler (par ex., PCB, DDT).

-Danger : Le danger, en écotoxicologie, correspond aux propriétés intrinsèques d'une substance ou d'un agent (chimique, physique ou biologique) susceptibles de causer des effets néfastes sur les organismes vivants ou les écosystèmes.

- Exemple : Un pesticide peut être toxique pour des insectes ciblés mais aussi pour d'autres espèces comme les abeilles.

- **Danger ≠ Risque :** Le danger se réfère à la toxicité potentielle, tandis que le risque prend en compte la probabilité d'exposition et les conditions environnementales.

Caractéristiques du danger :

1. **Toxicité aiguë :** Effets immédiats sur les organismes après une courte exposition (ex. : DL50, dose létale pour 50 % des organismes).
2. **Toxicité chronique :** Effets à long terme dus à une exposition prolongée à de faibles doses.
3. **Type de toxicité :**
 - Effets cancérogènes, mutagènes, tératogènes.
 - Impacts sur les systèmes immunitaire, endocrinien, et reproducteur.
4. **Mode d'action :** Mécanismes biologiques par lesquels les substances toxiques affectent les organismes (ex. : inhibition enzymatique, perturbation hormonale).

Exemples de substances dangereuses

- **Métaux lourds** (plomb, mercure, cadmium) : Bioaccumulation et impacts neurotoxiques.
- **Pesticides** (DDT, glyphosate) : Effets sur la reproduction et déséquilibres trophiques.
- **Substances organiques persistantes (SOP)** : Haute toxicité et longévité dans l'environnement (ex. : dioxines, PCB).

-Exposition : L'exposition en écotoxicologie désigne le contact des organismes vivants avec des substances toxiques présentes dans leur environnement. Cette exposition peut être directe (ingestion, inhalation, contact cutané) ou indirecte (via la chaîne alimentaire ou les transferts trophiques). Elle dépend de :

- La concentration de la substance dans l'environnement.
- La durée et la fréquence du contact.
- Le mode d'exposition (inhalation, ingestion, contact cutané).

-Dégradation et biodégradation : La **dégradation** et la **biodégradation** sont des processus clés en écotoxicologie et en gestion de la pollution, et elles jouent un rôle important dans la gestion des contaminants dans l'environnement

Dégradation : La dégradation fait référence à la décomposition ou la dégradation chimique ou physique d'un polluant en produits plus simples (exemple : dégradation des hydrocarbures dans le sol), souvent sous l'effet de processus abiotiques (non biologiques). La dégradation peut se produire par différents mécanismes, y compris :

-Dégradation chimique : Cette dégradation se produit par des réactions chimiques. Par exemple, un polluant peut réagir avec l'oxygène (oxydation), des rayonnements (photodégradation) ou d'autres substances présentes dans l'environnement. Un exemple de dégradation chimique est la dégradation des hydrocarbures sous l'effet de la lumière (photodégradation) ou des rayons UV.

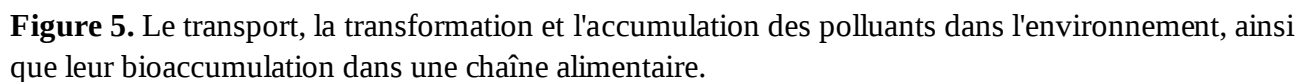
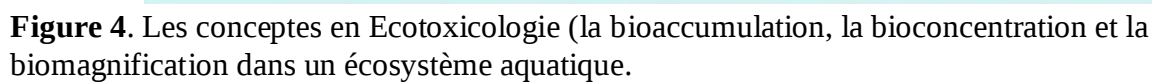
-Dégradation thermique : Certaines substances peuvent se décomposer sous l'effet de températures élevées. C'est le cas des déchets organiques dans des processus industriels ou de compostage.

Biodégradation : Processus naturel par lequel des micro-organismes décomposent les polluants en substances moins nocives. C'est la dégradation d'une substance chimique par des organismes vivants, tels que des bactéries, des champignons ou des plantes. C'est un processus biologique où les polluants sont transformés en produits moins toxiques, souvent par l'action d'enzymes spécifiques.

i. Risque : Le risque est une combinaison du danger d'une substance et de la probabilité d'exposition à celle-ci. La notion de risque en écotoxicologie est centrale pour comprendre comment les contaminants affectent les organismes, les écosystèmes et, ultimement, la santé humaine. Le risque écologique fait référence à la probabilité d'un impact environnemental ou biologique négatif, dû à l'exposition à des agents toxiques, des polluants ou d'autres facteurs perturbateurs dans l'environnement. Il se mesure généralement en fonction de l'intensité de l'effet négatif, de la probabilité d'occurrence de cet effet, et de la vulnérabilité des organismes ou des écosystèmes exposés. C'est le potentiel d'un polluant ou d'une substance à causer des effets biologiques nocifs (toxicité).

Il permet d'évaluer :

- Risque faible : Si le danger est élevé mais l'exposition est faible.
- Risque élevé : Si à la fois le danger et l'exposition sont importants.



7. Classification des contaminants : La nature des polluants est extrêmement variée. Les polluants sont disséminés dans tous les compartiments : hydrosphère, atmosphère, lithosphère, biosphère. La classification la plus usitée est celle de Ramade (1977) qui distingue (**Fig. 6**):

-des **polluants physiques** (radiations ionisantes, pollution thermique, nucléaires).

-des **polluants chimiques (organiques)** (hydrocarbures aromatiques polycycliques, matières plastiques, pesticides, nitrates, phosphates, métaux lourds, fluores...).

-des **polluants biologiques** (matières organiques mortes, agents pathogènes...).

- Métaux lourds (plomb, mercure, cadmium).

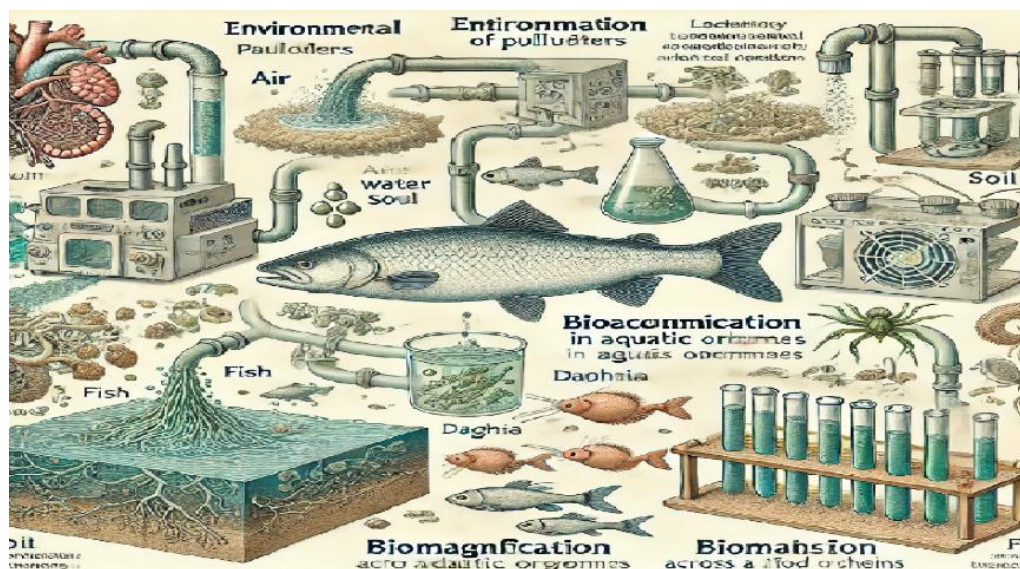
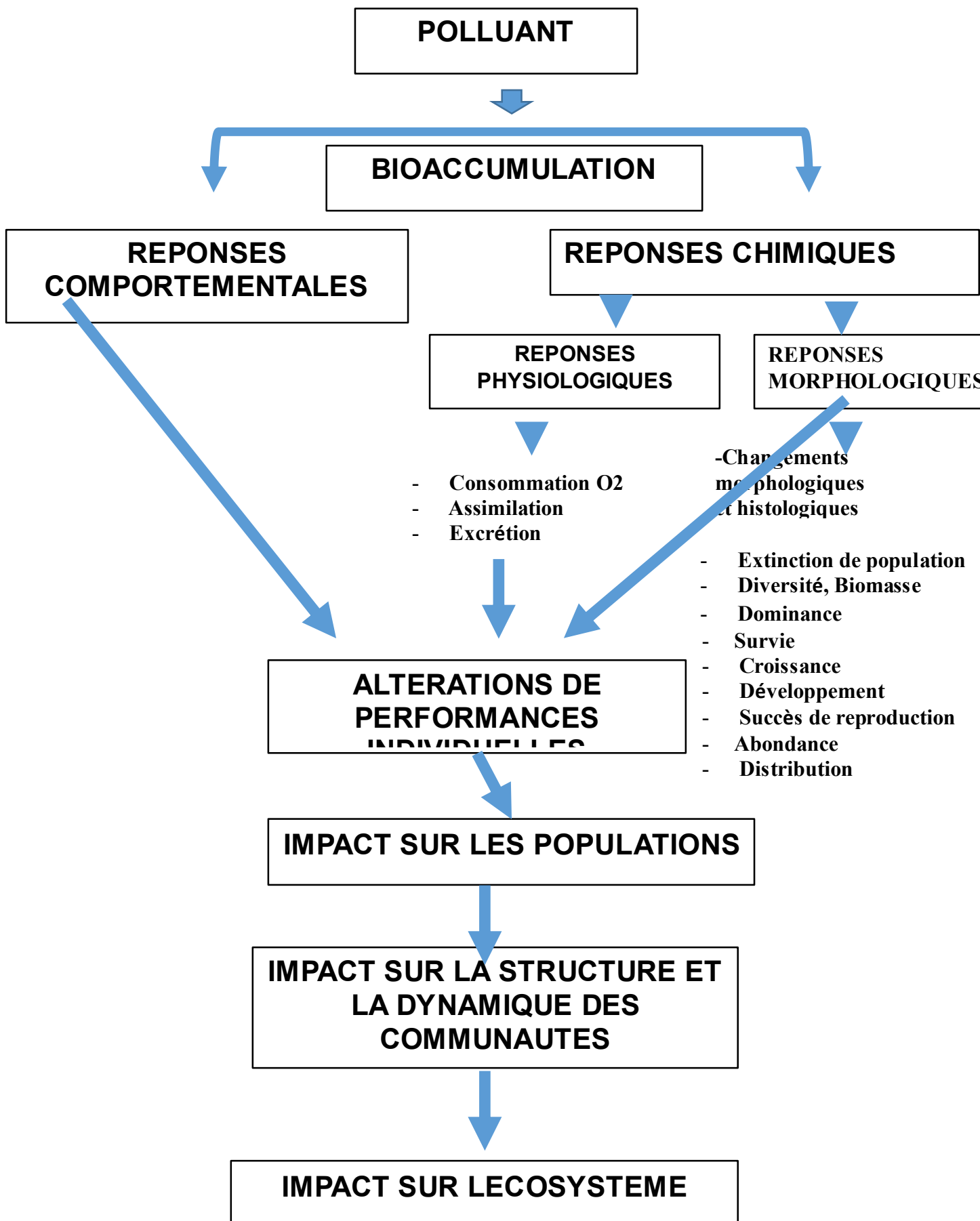


Figure 6. Les voies environnementales des polluants, la bioaccumulation dans les organismes aquatiques et la biomagnification dans une chaîne alimentaire, tests en laboratoire.

8.Impacts du polluant selon le niveau d'organisation biologique



9. Méthodes d'évaluation des risques écotoxicologiques :

L'évaluation des risques écotoxicologiques (ERE) repose sur des approches expérimentales et de modélisation :

a) Tests écotoxicologiques en laboratoire

- Tests sur espèces modèles :

- Daphnies (*Daphnia magna*) : toxicité sur les invertébrés aquatiques.
- Poissons (*Danio rerio*, *Oryzias latipes*) : impact sur la physiologie et le comportement.
- Algues (*Pseudokirchneriella subcapitata*) : effets sur la photosynthèse et la croissance.

- Tests de toxicité aiguë et chronique :

- DL50 (dose létale pour 50 % des individus).
- NOEC (No Observed Effect Concentration) et LOEC (Lowest Observed Effect Concentration).

b) Modélisation et prédiction des impacts

- QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationship) : prédit la toxicité des substances en fonction de leur structure chimique.
- Modèles de transport et de dispersion des polluants : estiment la propagation et l'accumulation dans les écosystèmes.

c) Études in situ et bioindicateurs

- Analyse des biomarqueurs (enzymes, stress oxydatif) chez les poissons et mollusques.
- Utilisation d'indicateurs biologiques (ex. : présence de cyanobactéries dans l'eau).