

8. Classification des polluants

Agents polluants exercent des influences perturbatrices sur l'environnement (Ramade, 1992).

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** ou **l'état**, la **taille** ou **l'abondance**.

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

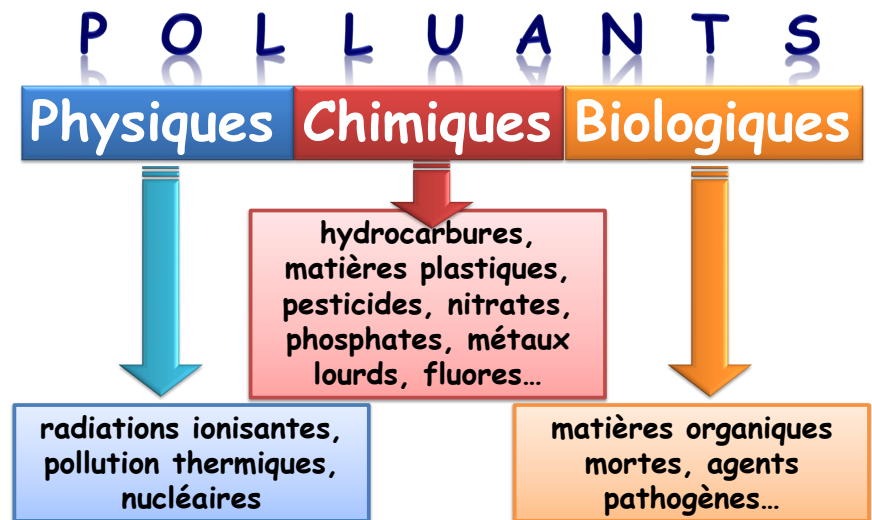


Tableau 1: Classification des polluants et leur présence dans les différents compartiments ou écosystèmes.

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 la concentration individuelle est inférieure à 0,1% avec un total de 0,6% de la masse de la croûte terrestre)
- **des éléments majeurs** (12 éléments intervenant pour un total de 99,4%) dans la croûte terrestre.

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 ($\mu\text{g/kg}$) du substrat**. C'est le cas des **PCBs (PolyChloroDiphényl)**, **HAPs (Hydrocarbures aromatiques polycycliques)**, dioxines, pesticides.

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

Exemple : Les gaz à effet de serre (GES)

- Historique :
- **-19^{ème} siècle**: découverte de "l'effet de serre" de l'atmosphère
- **-Début du 20^{ème} siècle**: hypothèses: soit les changements du CO_2 dans le passé ont pu influencer le climat, soit les activités humaines peuvent entraîner un accroissement du CO_2 atmosphérique, ce qui modifiera le climat.

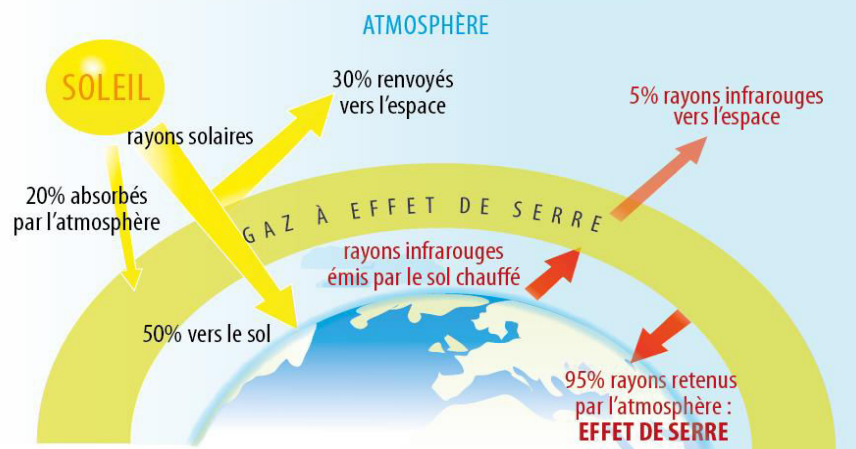
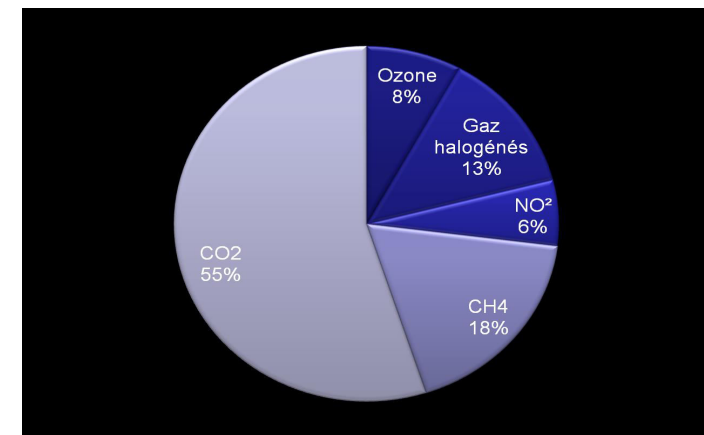
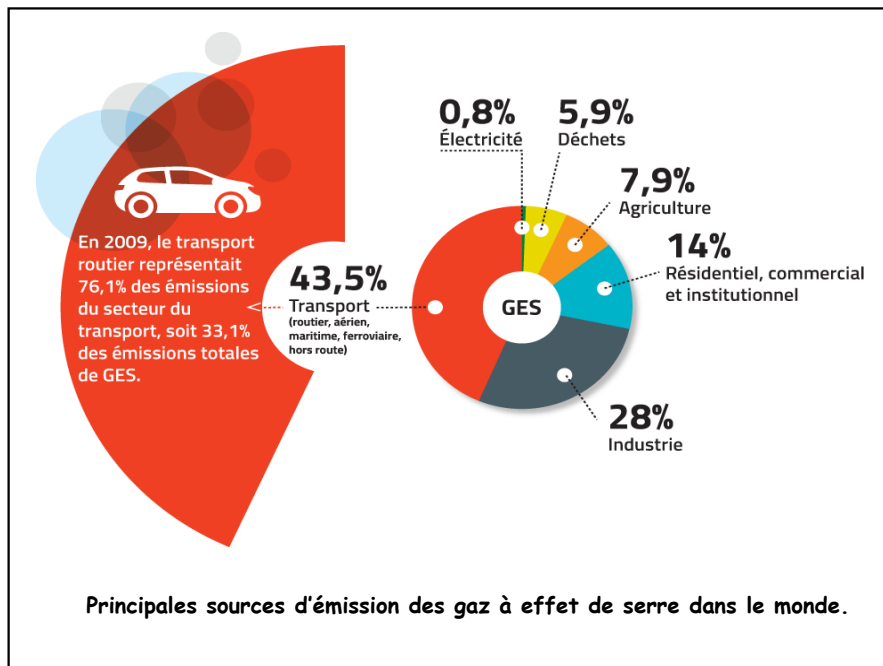


Schéma explicatif de l'effet de serre.



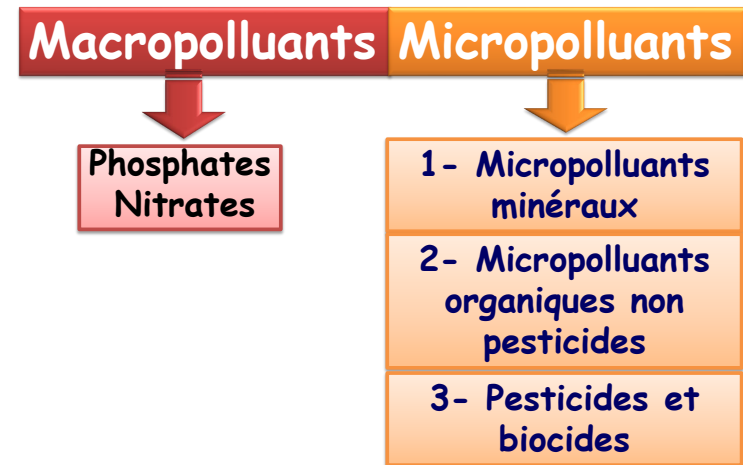
Pourcentages des différents gaz à effet de serre émis dans le monde



1- Micropolluants minéraux:

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

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



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

- ils entraînent des perturbations des écosystèmes ou des troubles métaboliques (par modification des réactions biochimiques de base telles le cycle de Krebs ou par compétition au niveau d'une fonction essentielle) chez les organismes pour des doses très faibles, généralement <1 ppm (1 mg/kg).
- ils sont souvent peu biodégradables, s'accumulent dans l'environnement et leurs produits de dégradation peuvent être aussi dangereux que les molécules mères.

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.

Tableau 2: Comparaison d'un macropolluant (phosphates) et d'un micropolluant (PCB polychlorodiphényl).

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

9. Règle des trois actions polluantes:

- a. Modification des réactions chimiques de base
- b. Compétition avec une fonction chimique essentielle
- c. Déplacement des équilibres dans l'environnement

Si le mercure métallique présente un certain danger:

- troubles du métabolisme
- déséquilibre au niveau des écosystèmes terrestres et aquatiques.

ce sont surtout:

- Sels de mercure (chlorure de mercure= HgCl_2)
- Dérivés organo-mercuriels (Méthyl-mercure= CH_3Hg^+).

Ce sont les plus à craindre pour la santé et l'environnement.

a. Liaison aux constituants chimiques des organismes au moyen d'un groupement chimique simple:

Une substance est 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.

- Le mercure fait partie d'une famille de pesticides organo-mercuriels très efficaces dans la protection des semences contre divers parasites (bactéries, champignons, insectes).
- Ex. le méthyl-mercure ou le nitrate de méthyl-mercure (la liaison électrovalente leur confère une hydrosolubilité (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.

b. Caractéristiques réactionnelles et structurales du polluant semblables à celles des fonctions chimiques constitutives des organismes:

Il y a alors **compétition**. Ex: l'inhibiteur de l'AChE. 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 (malathion, les esters phosphoriques de synthèse) sont de puissants inhibiteurs des acétylcholinestérases.

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**

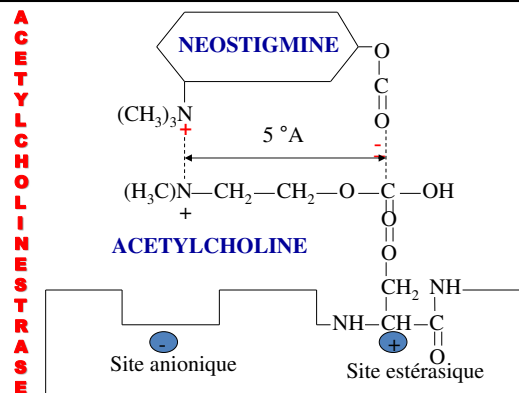


Fig. 11. Mode d'action des toxiques anticholinestérasiques.

Les deux sites actifs de l'acétylcholinestérase sont séparés par une distance de $5\text{\AA}$. La même distance sépare le groupement **ammonium quaternaire** du **groupement carboxyle** dans le substrat de cet enzyme, l'acétylcholine. Tous les inhibiteurs de l'acétylcholinestérase (comme néostigmine: carbamate) possèdent également deux groupements électropositif et électronégatif séparés par une distance de $5\text{\AA}$, ce qui permet leur captation parfaite avec les sites anioniques et estérasiques de l'enzyme.

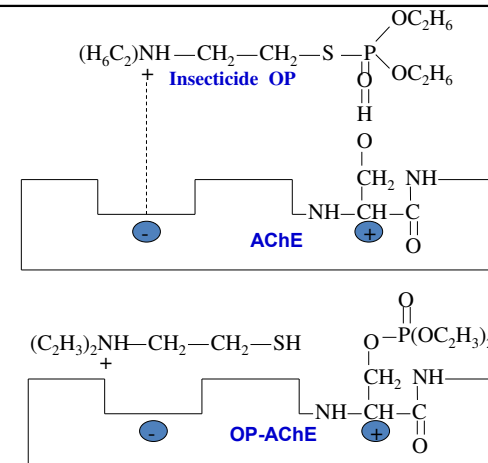


Fig. 12. Inhibition irréversible de l'AChE

Dans le cas des **inhibiteurs de compétition** (néostigmine: un carbamate naturel), la **liaison est réversible** après hydrolyse de celui-ci. Au contraire, avec un **inhibiteur irréversible** comme par exemple un insecticide organophosphoré, l'amiton, le **site estérasique est définitivement bloqué** après rupture hydrolytique de l'inhibiteur.

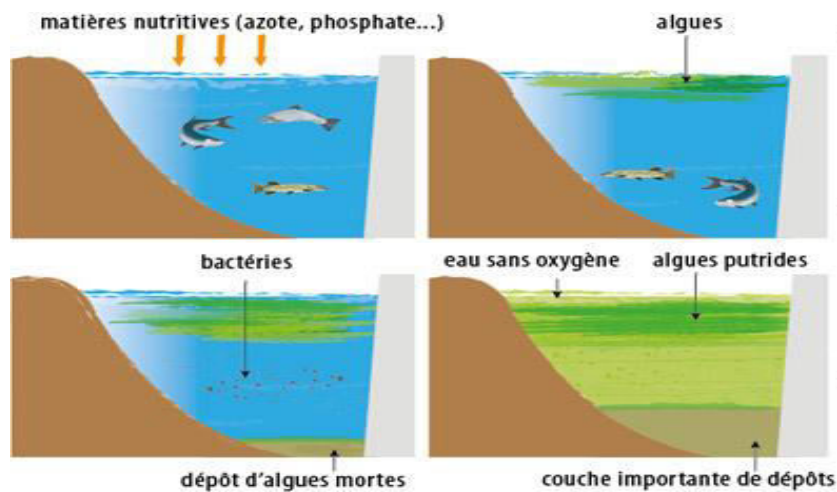
c. Déplacement par le polluant des équilibres dans l'environnement

Le **polluant** est un composé **naturel** et un élément **essentiel**, tel le phosphore ou le zinc, dont la présence dans l'environnement en **concentration élevée** déplace les équilibres.

Ex. 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**.



Le processus d'eutrophisation



L'eutrophisation

10. Pollution des écosystèmes et évaluation

a. Nocivité du polluant:

Elle dépend de plusieurs facteurs :

1. Nature chimique
du polluant

2. Caractéristiques
du milieu

3. La membrane
biologique

Nature chimique du
polluant

Caractéristiques du
milieu

Dans le cas du **mercure**,

- Les **facteurs de contamination** (les dérivés organiques ou inorganiques du mercure, les niveaux de concentrations...), ; ;
- Les **facteurs abiotiques** (pH, chlorure)

ont une influence importante dans le degré d'accessibilité du métal à la zone hydrophobe intra-lipidique et au flux transmembranaires.

La membrane biologique:

Le polluant doit franchir la membrane biologique ou se fixer sur celle-ci.

- L'action des membranes biologiques est 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 nocivité du polluant dépend de la **quantité pénétrant** dans l'organisme 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.

2/ **Les formes organiques**, labiles dans le temps qui sont généralement des métalloprotéines.

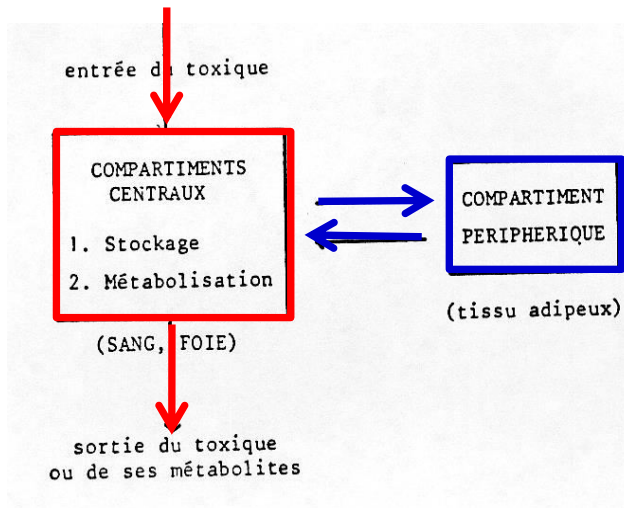


Fig. 13. Transfert des micropolluants organochlorés dans l'organisme

b. Effet des polluants:

L'effet du polluant au niveau de l'organisme dépend du rôle physiologique rempli par 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 concentre dans l'organisme tout au long de son existence, cas du Cd et Hg chez les mammifères).

L'ingestion de certains organes de stockage de polluants très toxiques peut présenter un risque pour le prédateur (ou l'homme qui est consommateur).

Ex. Dans les Iles Féroë (Danemark), 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 d'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** qu'il ait un rôle biologique ou non et qu'il soit réguler ou non par l'organisme.
- **facteurs biotiques** comme le stade vital, l'âge, le sexe et l'état physiologique.
- **facteurs abiotiques** comme le degré de pollution, la saison (facteurs climatiques).

La plupart de ces **facteurs interagissent** et il est souvent difficile de faire la part de chacun.

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 la 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 des 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 sont liés:

a. aux relations entre l'**acclimatation de certaines espèces animales** aux métaux et la présence dans leur organisme de **métallo-thionéines** (ou autres métalloprotéines) ou l'augmentation de la synthèse de cette protéine.

b. à la **redistribution du polluant** au sein de l'organisme correspondant à un stockage au niveau de sites biochimiques moins sensibles.

c. à la **variation des capacités d'absorption et/ou d'excrétion**.

c. Evaluation des effets:

Le développement de **l'industrie** a entraîné une **contamination de l'environnement** par une quantité et une diversité croissante de **substances toxiques**

- d'origine **industrielle** (métaux lourds)
- d'origine **agricole** (fertilisants ou pesticides).

Les **effets** des polluants sont souvent **peu décelables** rendant ainsi leur évaluation difficile.

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).

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).

Plusieurs types d'effets sont induits par une contamination:

- **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.
- **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.
- **Effets à long terme (toxicité chronique)** sont plus importants et se manifestent à des doses plus faibles.

Ex. **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).

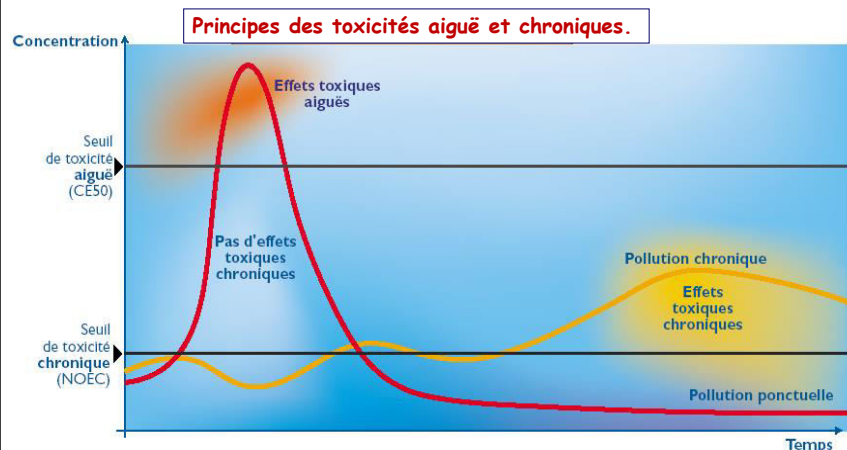
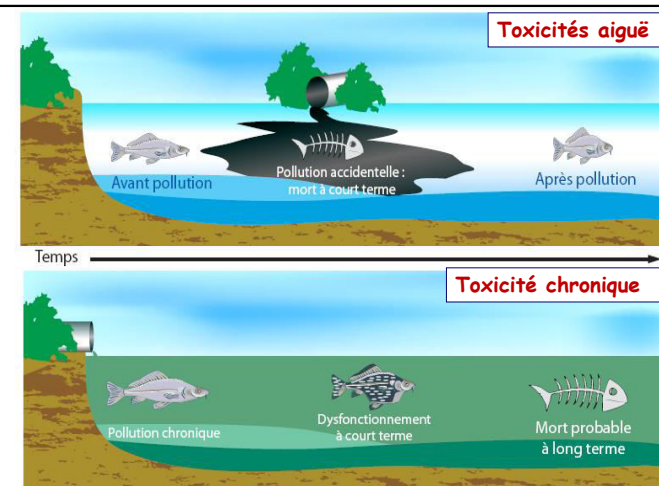


Fig. 14. Principe des toxicités aiguë et chronique.



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:

a- 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.

- 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)

- d'une manière non intentionnelle (expérimentation accidentelle).

b- les écosystèmes aquatiques, des tests assez nombreux ont été développés tant sur des Vertébrés, des Invertébrés que sur des végétaux.

Signalons les tests réalisés sur:

- des algues unicellulaires,
- les Daphnies
- 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.

5 principaux critères d'évaluation en épidémiologie

- **Spécificité:** Description des signes pathologiques associés à la pathologie.
- **Force du lien entre les variables:** Les statistiques permettent une validité à la relation entre l'intensité des symptômes et les teneurs en toxique.
- **Relation d'ordre temporelle:** La causalité n'est démontré que si la cause précède l'effet.
- **Reproductibilité:** La relation cause-effet peut être retrouvée (équipes et époques différentes, protocoles variés).
- **Cohérence:** Identification d'un mécanisme plausible sur la cause responsable des effets observés.

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-à-d 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).

- **Temps léthal:** Détermination des mortalités consécutives à l'application d'une dose constante en fonction de temps croissants.
- On en déduit le **temps léthal 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.