

Biomonitoring ou biosurveillance

- Garrec & Van Haluwyn en 2002 ont formalisé le **biomonitoring et ses concepts**, ils ont défini la biosurveillance comme étant l'utilisation des réponses à tous les niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre son évolution ».

Biomonitoring ou biosurveillance

- Selon Leblond et al. la biosurveillance est l'utilisation de systèmes biologiques (organismes et communautés d'organismes) pour suivre les changements de l'environnement dans l'espace et/ou dans le temps » (Leblond et al., 2014).

Les principes de biomonitoring :

- la biosurveillance s'appuie sur deux approches complémentaires :
- La première est basée sur l'analyse chimique d'un certain nombre de polluants dans les matrices environnementales (eau, air, sol...etc.) et permet donc l'évaluation de la contamination du milieu.
- La seconde intègre l'occurrence et l'abondance d'espèces bio-indicatrices afin de diagnostiquer la qualité des milieux et des biocénoses à posteriori d'une perturbation.

Les biomarqueurs en écotoxicologie

Définition

- Les biomarqueurs ont fait leur apparition en écotoxicologie au cours des années 1980. Initialement décrits comme la réponse d'une structure ou d'une fonction biochimique ou physiologique « normale » à la présence d'un xénobiotique.
- Nous retiendrons ici celle énoncée par [LAGADIC *et al.*, 1997] qui définit un biomarqueur comme 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 à caractère polluant.

Critères pour le choix d'un biomarqueur destiné à une utilisation sur le terrain

- mesure simple et économique: les méthodes de mesure des biomarqueurs doivent être sensibles, précises et simples de mise en œuvre.
- la réponse des biomarqueurs doit être rapide afin de pouvoir être considérée comme un paramètre d'alerte précoce.
- les niveaux constitutifs et leurs variations, dues aux effets de facteurs physiologiques ou environnementaux, doivent être définis afin de distinguer la réponse induite par un contaminant de la variabilité naturelle: influence aux facteurs non toxiques (organisme, environnement, méthode) bien comprise et dans des limites acceptables.

Critères pour le choix d'un biomarqueur destiné à une utilisation sur le terrain

- les mécanismes qui supportent la relation entre la réponse des biomarqueurs et l'exposition aux contaminants doivent être connus
- la signification toxicologique des biomarqueurs, qui peut être décrite comme le lien entre la réponse biochimique et les effets sur les organismes, doit être connue.
- bonne sensibilité.

Les différents types de biomarqueurs

- En ecotoxicologie, on distingue trois types de biomarqueurs: les biomarqueurs d'exposition à un xénobiotique; les biomarqueurs d'effets de l'exposition et les biomarqueurs de sensibilité aux effets provoqués par l'exposition.

Les biomarqueurs d'exposition

- Ceux indiquant que le polluant présent dans le milieu a pénétré dans l'organisme. Généralement, les biomarqueurs d'exposition sont le résultat de l'interaction du polluant avec des molécules biologiques dans ces tissus et/ou dans des liquides corporels. Par exemple, la mesure de la quantité de métabolites spécifiques de la conjugaison au glutathion a déjà été utilisée comme biomarqueur d'exposition aux polluants chez l'homme. La formation d'adduits à l'ADN chez l'homme ou chez l'animal comme biomarqueur d'exposition a des molécules cancerigènes ou génotoxiques.
- Ils servent à caractériser le type de contamination chimique. En effet, le dosage du contaminant et/ou de ses métabolites dans certains milieux biologiques (sang, urines, cheveux...) permet d'approcher la "dose interne".

Interets

- L'utilisation de ces biomarqueurs dans de nombreuses situations ces dernières années a permis d'apporter des arguments parfois décisifs aux décideurs.

Exemples:

- La mesure de la plombémie (concentration du Plomb dans le sang) à Métaleurop a ainsi permis d'appréhender l'ampleur du saturnisme et d'engager les actions de réhabilitation des sols, l'évitement de l'exposition et la prise en charge médicale des enfants les plus exposés.

- à Viviez (France), la mesure du cadmium dans les urines a révélé qu'une partie importante de la population était exposée à des niveaux supérieurs aux normes signifiant un risque d'atteinte rénale et l'analyse a également permis d'identifier la contribution des produits cultivés localement.
- Ainsi, la mesure de l'arsenic urinaire a permis d'identifier les populations concernées, notamment celles cultivant et consommant des produits de leur jardin (*des sols naturellement riches en arsenic*) permettant ainsi de formuler des recommandations adaptées.

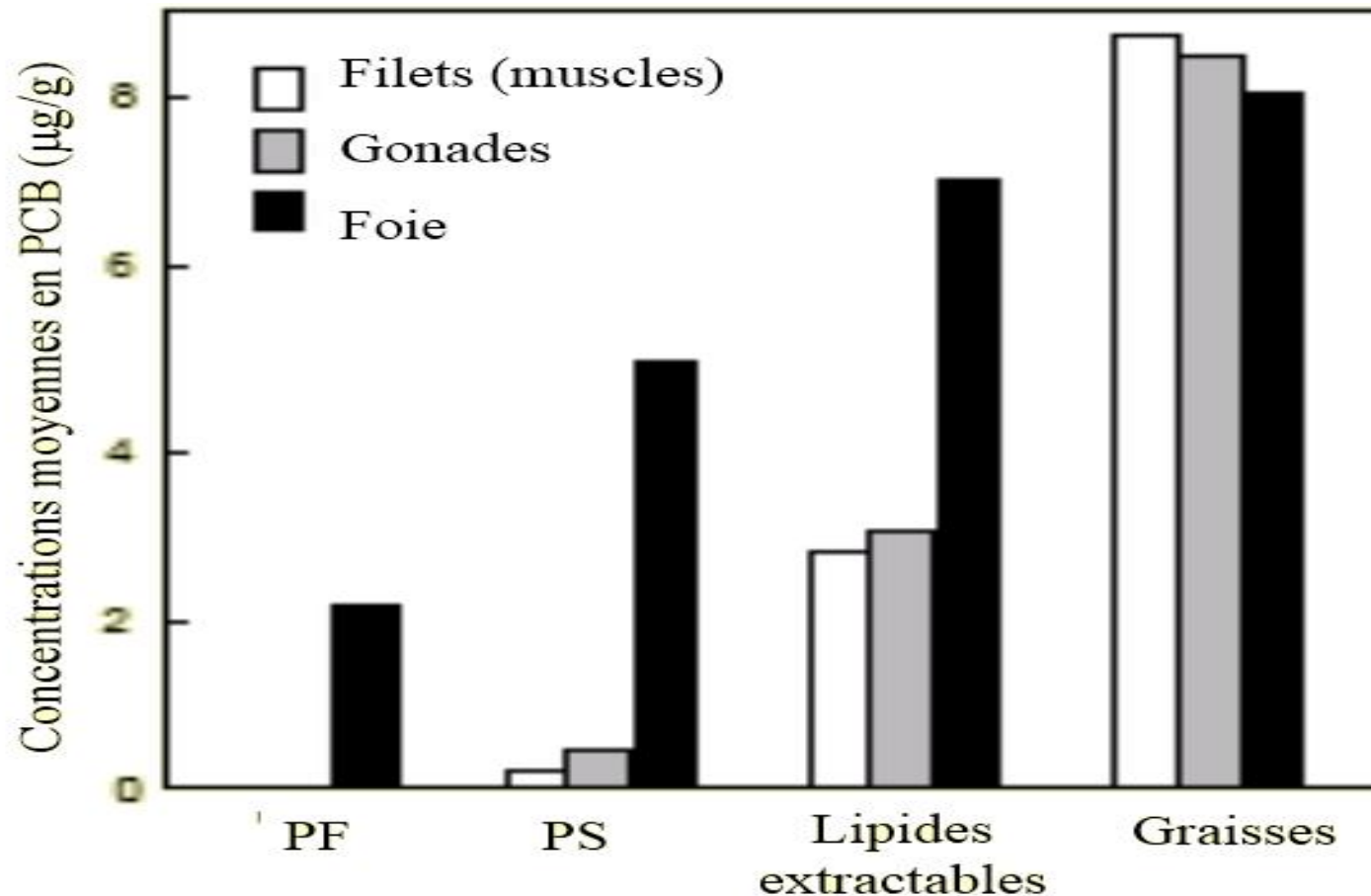
Aspects quantitatifs de la qualité de l'environnement

- Outre le fait de pouvoir mesurer et/ou prédire la concentration en polluants dans le milieu, il faut également déterminer quelle fraction des polluants est susceptible d'entrer en contact et d'exercer une action toxique sur les organismes.

Biodisponibilité

- La biodisponibilité d'un polluant désigne sa capacité à interagir avec les organismes, à s'accumuler dans les organismes et éventuellement à entraîner des effets
- Une molécule est dite biodisponible quand elle peut interagir ou passer au travers de la membrane cellulaire. Sur un plan écotoxicologique, ce paramètre apporte donc des informations plus pertinentes sur les polluants que le simple fait de les quantifier.

Concentrations moyennes en PCB (PolyChloroBiphényles) dans divers organes de morue *Gadus morhua* calculées sur la base du poids frais, du poids sec, des lipides extractibles et des graisses.



Bioaccumulation

- La bioaccumulation correspond à l'accumulation nette des contaminants dans et sur un organisme à partir de différentes sources (eau, air, nourriture, sédiment, particules en suspension). La bioconcentration ne concerne que les contaminants accumulés à partir de l'eau. Une fois dans l'organisme, les contaminants peuvent subir différents processus comme:
 - (1) des réactions de biotransformation et de détoxification afin de protéger l'organisme (élimination, séquestration, redistribution)
 - (2) des phénomènes d'activation (production de métabolites secondaires plus toxiques que les molécules mères).

La bioaccumulation résulte de ces différents processus.

Bioamplification

Phénomène par lequel une substance naturelle ou un contaminant présent dans un biotope connaît un accroissement de sa concentration au fur et à mesure qu'il circule vers les maillons supérieurs d'un réseau trophique.

- **Facteur de concentration** : rapport de la concentration d'un polluant dans un organisme à sa concentration dans le biotope.

$$F_c = \frac{[C]_{\text{organisme}}}{[C]_{\text{eau, sol ou air}}}$$

$$F_c = \frac{[C]_{\text{Organisme}}}{[C]_{\text{Biotope}}}$$

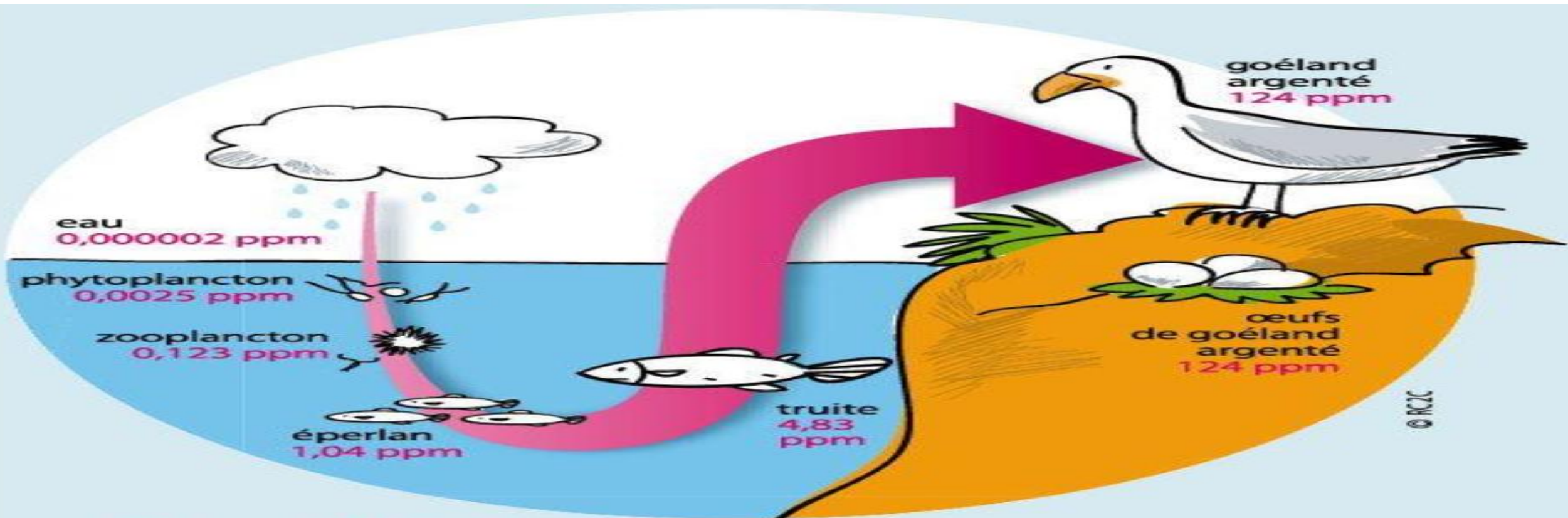
- **Facteur de transfert** : rapport de la concentration d'un polluant dans un organisme (Niveau trophique n+1) à sa concentration dans le (>1 lors de bioamplification)

$$F_t = \frac{NT_{n+1}}{NT_n}$$

$$F_t = \frac{[C]_{\text{organisme}}}{[C]_{\text{organisme niveau inférieur}}}$$

Exemple de bioamplification

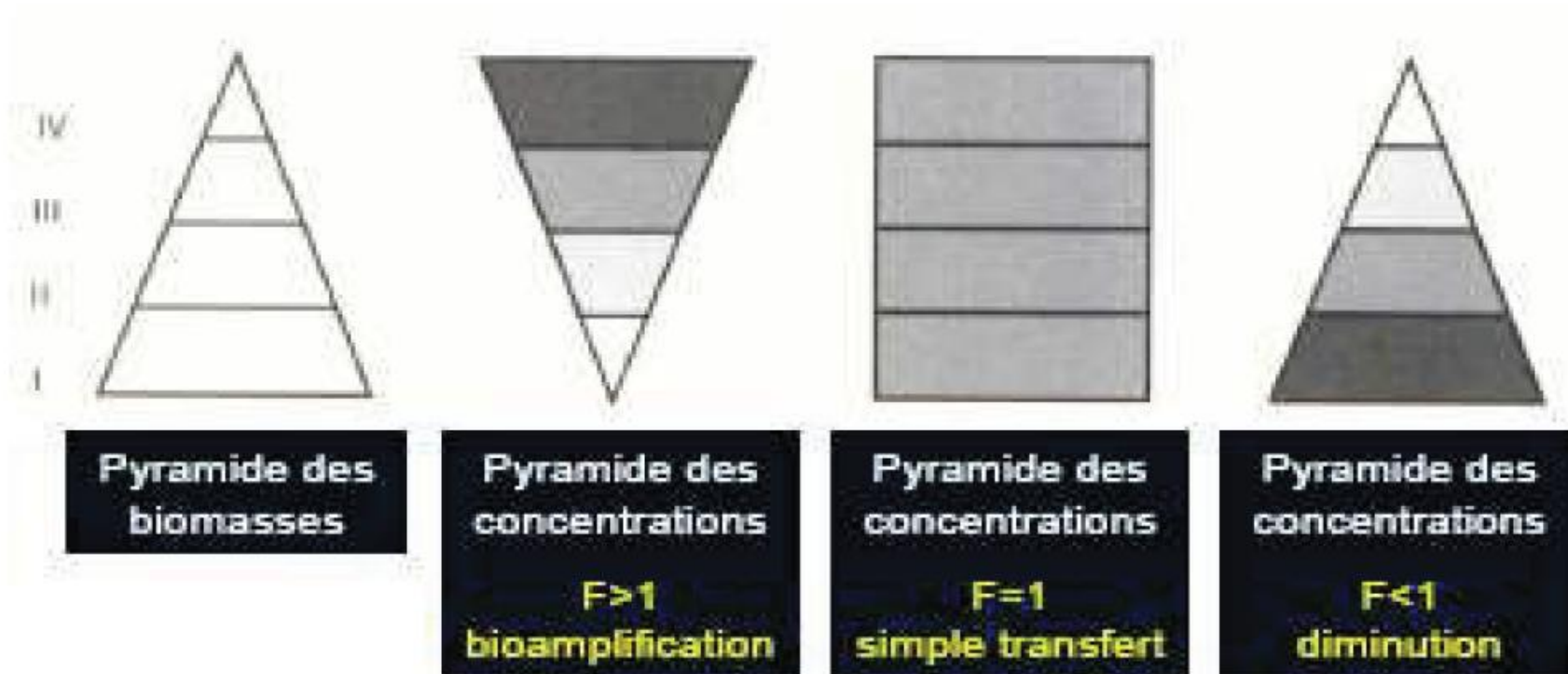
le cas des PCB (polychlorobiphényles). Les concentrations sont indiquées en ppm. Le phytoplancton (algues microscopiques) l'a déjà concentré un millier de fois dans ses cellules par rapport à l'eau de pluie, passant de 2×10^{-6} ppm à $2,5 \times 10^{-3}$ ppm. Un goéland argenté pourra atteindre 124 ppm.



- Remarque :
En milieu aquatique, deux processus simultanés d'absorption interviennent :
 - la pénétration de l'eau par voie transtégumentaire et transbranchiale
 - l'ingestion avec les aliments.
- La pénétration par la première joue plus que l'apport alimentaire.

Le comportement des polluants dans les réseaux trophiques peut être de trois types :

Pyramide des concentrations dans les réseaux trophiques



simple transfert

- Dans un premier cas, un *simple transfert* de ces derniers d'un niveau trophique à l'autre sans changement de concentration il à été constaté. Il concerne en particulier la plupart des éléments biogènes - divers métaux et métalloïdes - indispensables aux êtres vivants pour lesquels existent des phénomènes de régulation.

Bioamplification

- Un second cas, avec divers éléments ou composés chimiques surviennent en effet des phénomènes de **bioamplification** dans les réseaux trophiques (cas des PCB, des insecticides organochlorés, des dioxines parmi bien d'autres)

Degradation ou Biotransformation

- Enfin, un dernier cas, qui est le plus fréquent, est celui de substances incapables de franchir la barrière intestinale des vertébrés, ou encore de polluants organiques de synthèse, biodégradables, qui vont être biotransformés dans le tube digestif: diverses molécules organiques naturelles ou de synthèse, une diminution de la concentration au fur et à mesure que l'on s'élève dans la chaîne trophique des consommateurs à été enregistrée
- Les bivalves par exemple peuvent fermer leur coquille pour limiter l'absorption du polluant.

Ils possèdent aussi des mécanismes de tri au niveau des branchies, et du système digestif qui sélectionnent les particules selon leur taille, et affectent donc la biodisponibilité des contaminants présents dans la nourriture. Si le contaminant parvient à pénétrer dans les cellules, l'organisme peut réguler sa biodisponibilité intracellulaire en le métabolisant pour favoriser son élimination, le stocker, le chélater à l'aide de protéines spécifiques.

Pour une même espèce, l'accumulation des contaminants est influencée :facteurs biologiques (âge, sexe , taille, génotype, nutrition reproduction

facteurs physico chimiques (oxygène dissout , dureté e l'eau , température, ph, types de sédiments , paramètres hydrodynamique du système

Synergie et antagonisme

- La présence simultanée de contaminants dans le milieu peut entraîner des effets synergétiques ou antagonistes. Le dosage indépendant de chaque polluant peut mener à la conclusion qu'il n'y a pas de danger, si on les compare aux seuils réglementaires. En revanche, seule l'évaluation des effets biologiques d'un mélange de polluants permettra de dire si leur combinaison est dangereuse ou non pour les organismes.

Les biomarqueurs d'effet

- Leur utilisation permet de montrer que le xénobiotique est entré dans l'organisme et qu'après avoir été distribué entre les différents tissus, il a exercé un effet, **toxique ou non (notion d'adaptation au stress)**, sur une cible critique.
- Leur spécificité dépend:
 - De leur distribution tissulaire dans l'organisme
 - De la nature et des propriétés des composés toxiques en question
- Les biomarqueurs d'effet dits non spécifiques (changement de poids de l'organisme par exemple) décrivent les effets provoqués par un grand nombre de facteurs de stress ou de polluants.

Les biomarqueurs d'effet

- . Ils apportent donc des informations sur l'impact global de changements environnementaux.
- Les marqueurs plus spécifiques sont les réponses de l'organisme entier ou de tissus qui peuvent être associées à une classe particulière de xénobiotiques (paramètres biochimiques, altérations histopathologiques et cellulaires, réponses immunologiques...

Les biomarqueurs d'effet

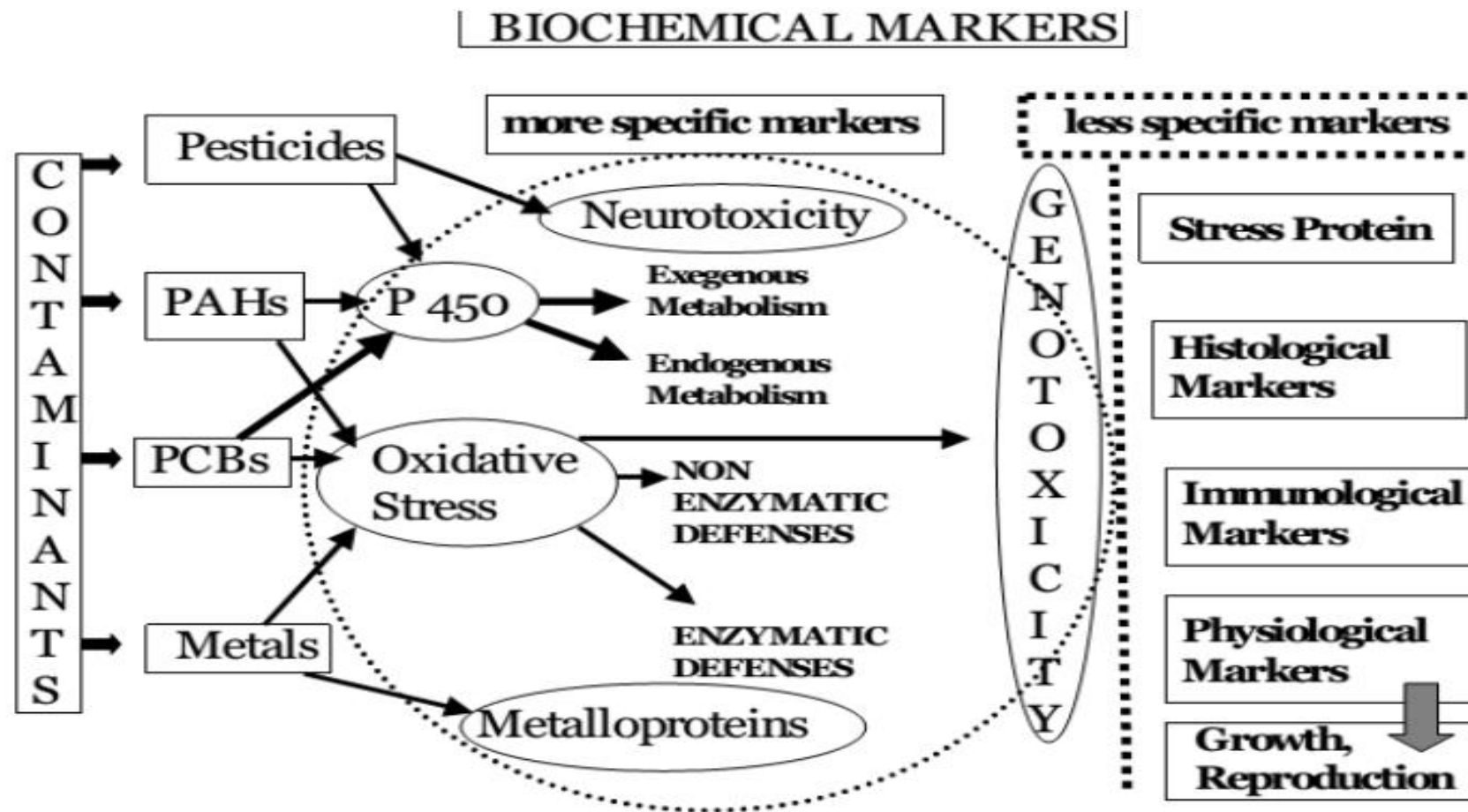


Figure 7. Relationship between main contaminants and biomarkers: modified after Michel (1993).

Les biomarqueurs de sensibilité

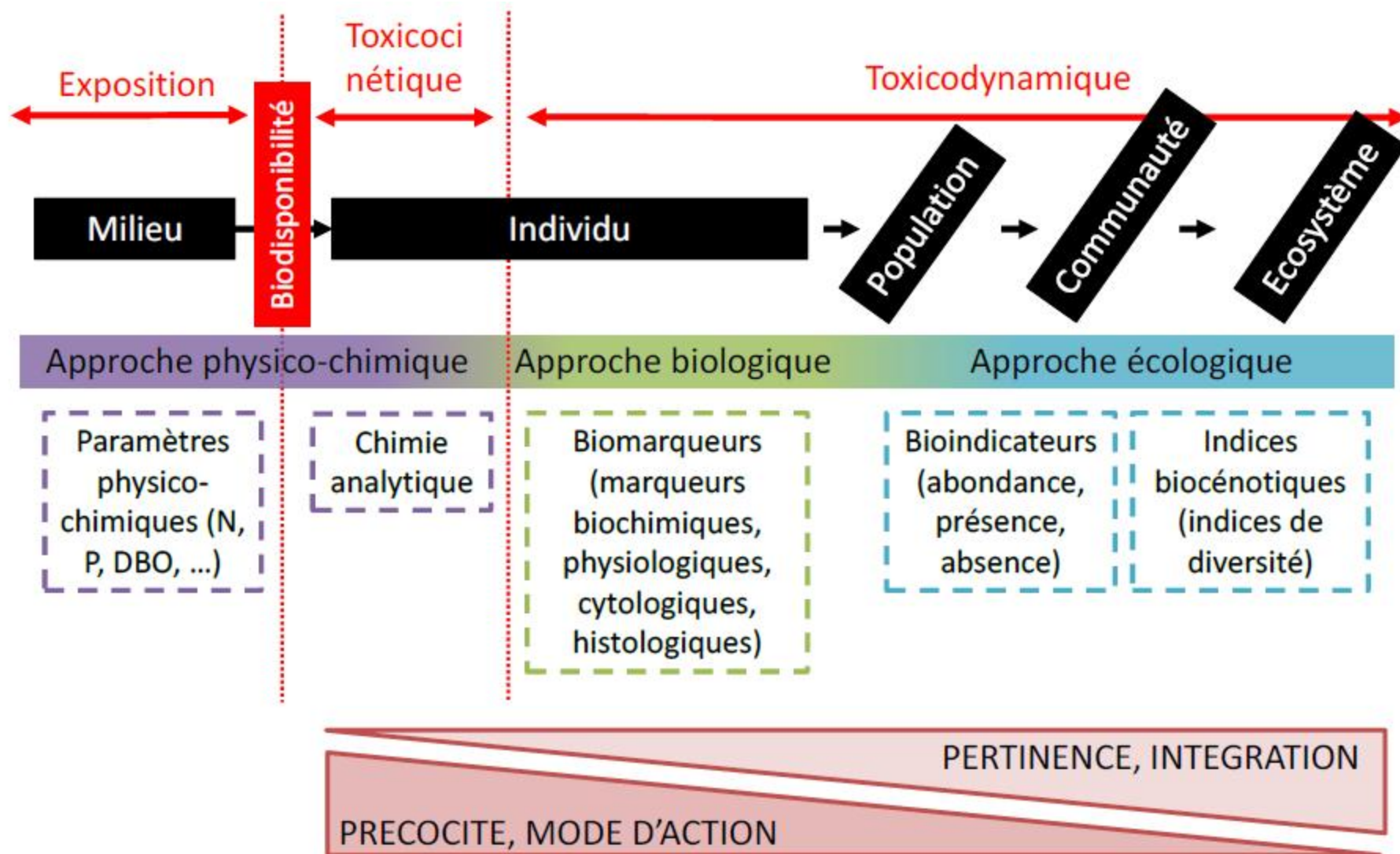
- La variation de sensibilité est une variation d'origine génétique de la réponse à la contamination par les polluants.
- La résistance qui est définie comme une diminution de sensibilité, d'origine génétique a été largement étudiée chez les invertébrés et plus précisément chez les insectes.
- Des facteurs acquises génétiquement comme la diminution de la sensibilité des AChE constituent des biomarqueurs qui peuvent être envisagés.

Etapes de validation complète d'un biomarqueur

1. Collecte de données en sites de référence et en sites pollués (avec la prédominance d'un seul polluant) pour évaluer la capacité du biomarqueur à distinguer les situations polluées des situations non polluées ;
2. expériences de laboratoire sur des espèces susceptibles d'être prélevées in situ pour quantifier les effets d'une exposition (mélange de polluants, effets long-terme...)
3. collecte de données sur des sites avec des situations complexes de pollution en utilisant plusieurs biomarqueurs ;

- 4. étude du pouvoir prédictif des biomarqueurs quant à des effets à des niveaux biologiques supérieurs (reproduction...) ;
- 5. prédiction des risques pour l'homme.

Evaluation des effets des contaminants à différents niveaux d'organisation biologique



Les especes bioindicatrices de pollution: definition

- Ce sont donc des espèces couramment utilisées lors de tests écotoxicologiques et en biomonitoring en raison d'un certain nombre de caractéristiques : facilité de manipulation, facilité d'élevage en laboratoire (afin de disposer de stocks d'organismes pour réaliser des expériences), sensibilité à certains types de polluants (comme les perturbateurs endocriniens), représentativité d'une famille d'êtres vivants (les poissons, les mollusques, etc.).

Les especes bioindicatrices de pollution

Caractéristiques d'un bioindicateur idéal en écotoxicologie

1. Tous les individus de l'espèce bioindicatrice devraient présenter une corrélation identique et simple entre leur teneur en la substance polluante et la concentration moyenne de cette dernière dans le biotope ou l'alimentation quelles que soient la localisation et les conditions environnementales

Les especes bioindicatrices de pollution

Caractéristiques d'un bioindicateur idéal en écotoxicologie

2. L'espèce devrait être capable d'accumuler le polluant sans être tuée ni même que sa reproduction en soit perturbée par les niveaux maximum du polluant observés dans l'environnement
3. L'espèce devrait être sédentaire afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec la localisation géographique considérée

Les especes bioindicatrices de pollution

Caractéristiques d'un bioindicateur idéal en écotoxicologie

4. L'espèce devrait être abondante dans l'ensemble de l'aire étudiée et si possible devrait avoir une distribution géographique étendue pour favoriser les comparaisons entre zones distinctes
5. Les espèces à forte longévité sont préférables car elles permettent un échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire. Elles permettent l'exposition à un contaminant pendant de longues périodes (effets à long terme)

Les especes bioindicatrices de pollution

Caractéristiques d'un bioindicateur idéal en écotoxicologie

4. L'espèce devrait être abondante dans l'ensemble de l'aire étudiée et si possible devrait avoir une distribution géographique étendue pour favoriser les comparaisons entre zones distinctes
5. Les espèces à forte longévité sont préférables car elles permettent un échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire. Elles permettent l'exposition à un contaminant pendant de longues périodes (effets à long terme)

Les especes bioindicatrices de pollution

Caractéristiques d'un bioindicateur idéal en écotoxicologie

6. L'espèce devrait être de taille suffisante pour fournir des tissus en quantité importante pour analyse, voire pour permettre des analyses dans des organes spécifiques après dissection

7. L'espèce devrait être facile à échantillonner et suffisamment résistante pour être amenée en laboratoire afin d'effectuer des études de décontamination

Les especes bioindicatrices de pollution

En réalité, aucune espèce ne peut répondre à la totalité de ces critères

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

- Les facteurs contrôlant la fiabilité des bio-indicateurs peuvent être regroupés en deux catégories correspondant aux :
- **facteurs intrinsèques**, c'est-à-dire ceux propres aux caractéristiques de l'espèce bio-indicatrice et des individus qui la composent,
- **Facteurs extrinsèques**, donc environnementaux.

Les principaux facteurs intrinsèques conditionnant la fiabilité d'un bio-indicateur sont:

- Les taux d'accumulation et d'excrétion ;
- L'état éco physiologique des individus ;
- Les caractéristiques démo-écologiques de l'échantillon (abondance , composition en âges,sexe);
- L'interférence entre polluants dans les effets toxicologiques sur l'espèce considérée

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

- **Taux d'accumulation et d'excrétion:**

Ces taux constituent un paramètre important qui conditionne la fiabilité d'un bio-indicateur, selon le taux d'excrétion et\ ou d'élimination d'un composé est comparable ou nettement inférieur au taux d'accumulation, le comportement de l'espèce bio-indicatrice pour un polluant considéré sera très différent.

- Si une substance est accumulée rapidement mais dégradée lentement, les niveaux de concentration trouvés dans une espèce bio-indicatrice seront bien supérieures à ceux observées dans l'environnement.

Exemple: un poisson mis en contact d'une eau contaminé par le DDT conservera une forte concentration de ce dernier longtemps après avoir été remplacé dans des eaux non polluées

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

L'état éco physiologique des individus de l'espèce indicatrice :

Il intervient de façon déterminante dans les taux d'accumulation et les concentrations d'équilibre des polluants. Un très bon exemple de ce rôle est donné par la relation existant entre le taux des lipides et les niveaux moyens de la concentration en résidus de composés organochlorés dans l'organisme d'animaux terrestres ou aquatiques.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Age et la taille des organismes bio-indicateurs :

Dans une population d'une espèce bio-indicatrice, la concentration en polluants varie avec la taille donc l'âge des individus. Très tôt ont été signalées des différences dans les niveaux de bioconcentration d'insecticides en fonction de l'âge des individus. Citons en particulier les variations observées chez le poisson-chat (*Ictalurus catus*) et le bass (*Micropterus salmoides*) en fonction de l'âge pour la teneur en DDT. De tels écarts de concentration ont également été décrits chez des organismes terrestres. La teneur en fluor des aiguilles de conifères ou des feuilles d'arbres caducifoliés augmente au cours de la saison et avec le nombre d'années chez les premières. Ainsi, chez le sapin, la teneur en fluor des aiguilles de trois ans et plus en zone polluée est deux à 3 fois supérieure à celle des aiguilles de l'année. Avec le DDT et autres insecticides organochlorés, des variations de un à dix ont pu être observées en fonction de l'âge chez des organismes aquatiques.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs



Ameiurus catus (Linnaeus 1758)



Micropterus salmoides

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Interactions physiotoxicologiques des polluants

La validité de l'usage d'organismes bio-indicateurs peut être en certaines circonstances biaisée lorsque plusieurs contaminants coexistent dans un biotope donné.

- En règle générale, la bioaccumulation n'est pas modifiée, c'est-à-dire que compte tenu, par exemple d'une concentration donnée dans le milieu de deux polluants différents, la concentration de chacun, dans l'organisme de référence sera identique que l'exposition soit effectuée isolément ou aux deux contaminants pris ensemble. Il existe cependant quelques exceptions, avec soit antagonisme, soit au
- contraire potentiation. Ainsi, la bioaccumulation du cuivre et du cadmium dans les poissons est plus forte lorsqu'ils sont pris ensemble que lorsque des individus sont exposés à une même concentration de ces métaux isolés.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Mécanismes influençant l'absorption ou le relargage des micropolluants :

Les mécanismes par lesquels divers toxiques peuvent influencer l'absorption ou le relargage de micropolluants peuvent être regroupés de la façon suivante:

- interaction des polluants dans les biotopes conduisant à la formation de complexes qui atténuent leur absorption;
- modifications physiologiques induites par les xénobiotiques - tels que l'accroissement de l'anabolisme - qui peuvent augmenter la bioaccumulation ;
- variations dans la perméabilité des membranes absorbantes susceptibles d'affecter le taux de pénétration des polluants;
- inhibition d'enzymes de détoxication - ou stimulation d'enzymes de biodégradation (cas des mixed function oxidase : MFO par exemple) qui peuvent modifier dans un sens ou dans l'autre les taux d'absorption et d'élimination des xénobiotiques.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Niveau trophique des organismes

Ce dernier peut constituer un paramètre important dans l'aptitude à bioconcentrer des polluants selon l'espèce prise comme bio-indicateur

En règle générale et pour les organismes appartenant à des réseaux trophiques terrestres, les polluants persistants présentent une bioamplification dans les chaînes trophiques, de sorte que tant les métaux toxiques que les composés organiques peu ou pas biodégradables atteignent leur maximum de concentration chez les oiseaux rapaces et les mammifères carnivores situés au sommet de la pyramide écologique.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Niveau trophique des organismes

Pour les communautés aquatiques, le problème est plus complexe du fait de l'absorption simultanée des polluants par contact percutané et transbranchial directement à partir de l'eau et par voie alimentaire.

Ainsi, même si dans certains cas (composés organochlorés, méthylmercure) s'est observée une bioamplification dans les réseaux trophiques aquatiques, il a été détecté pour la majorité des polluants des concentrations semblables à tous les niveaux de la pyramide écologique et donc une absence de bioamplification. Parfois même, les coefficients de concentration décroissent, le maximum s'observant dans le phytoplancton et/ou les algues macrophytiques. Ainsi, dans le cas du plutonium, qui ne traverse pas la barrière intestinale, les facteurs de concentrations les plus élevés ont été relevés chez les lichens marins, les algues et les Spongiaires qui sont des organismes microphages.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Influence des facteurs extrinsèques: Les facteurs écologiques abiotiques conditionnent de façon déterminante la bioconcentration des polluants, en particulier dans les espèces bio-indicatrices.

- La température et les précipitations chez les végétaux, la température chez les animaux poïkilothermes à sang froid), le pH des eaux, leur salinité parmi d'autres facteurs abiotiques en milieu aquatique contrôlent les taux d'accumulation des polluants.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Influence des facteurs extrinsèques:

De très nombreuses recherches effectuées avec les pesticides ont mis en évidence le rôle important de la température dans l'ampleur du facteur de concentration.

D'autres travaux ont démontré le rôle du pH dans les phénomènes de bioconcentration.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Influence des facteurs extrinsèques:

Ainsi, il a été observé chez le lombricide, *Aporrectodea tubulata* (Annélide Oligochète) que la concentration en plomb varie du simple au double dans l'organisme de ce vers de terre dans une gamme de pH comprise entre 4,9 et 7,1. Des variations du même ordre de grandeur sont observées avec d'autres métaux toxiques.

Facteurs influençant la fiabilité des bioindicateurs

Influence des facteurs extrinsèques:

Il convient toutefois de remarquer que les effets du pH sur l'accumulation des éléments traces n'est pas aussi significative lorsqu'il s'agit de métaux biogènes car une régulation de l'absorption par les organismes intervient. Ainsi, avec des éléments comme le cuivre ou le zinc, le pH n'agit que faiblement sur les Oligochètes. Des expériences effectuées à des pH compris entre 4 et 6 chez *Eisenia foetida* n'ont mis en évidence qu'une faible variation de l'absorption du zinc en fonction du pH

Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Les cryptogames: En [botanique](#), un **cryptogame** est une plante à organes de [reproduction](#) cachés, des plantes sans [fleurs](#) au sens général. Une plante cryptogame (cryptogamique) est une plante dont les parties de la [fructification](#) sont cachées aux [yeux](#) de l'observateur. L'appellation vient de la cryptogamie. En botanique [systématique](#), tous les végétaux qui ne contiennent pas de [graines](#) sont appelés cryptogames (*Cryptogamae*). Les cryptogames sont également appelés [sporophytes](#)



Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Les lichens :
- Performance biologique : Les lichens peuvent être considérés et analysés en fonction de la morphologie, de l'histologie, de l'écologie et de la physiologie.
- Évaluation de la performance biologique des lichens: se fait par mesure de :
 - Taux de croissance,
 - La productivité,
 - La capacité de reproduction,
 - La déformation,
 - La décoloration,
 - La teneur en chlorophylle,
 - L'intégrité membranaire,
 - L'activité respiratoire,
 - L'occurrence géographique, des limites de distribution liées au substrat ou à l'eau



Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Caractéristiques

- Sont des organismes pérennes (permanente)
- Sont des organismes à large distribution géographique
- N'ont pas de moyen de protection (stomate, cuticule...)
- N'ont pas de racine (pas d'interférence avec les ETM du substrat)
- Absorbent l'eau et leurs éléments essentiels à partir de l'atmosphère
- Ont un développement très lent.

Les bioindicateurs des milieux terrestres

- **Utilisation des lichens épiphytes** (An *epiphyte* is a plant that grows on other plants)

Les lichens constituent de puissants bioaccumulateurs à la suite de leur aptitude à prélever les contaminants présents dans l'atmosphère. Ils sont utilisés pour détecter la pollution atmosphérique par le SO₂, les métaux lourds et les éléments radioactifs.

Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Les mousses

Généralités : Le mot mousse vient du latin musci. Il s'agit d'une classe de végétaux du phylum des Bryophytes ([plantes non vasculaires](#)), réunissant de petits végétaux herbacés, vivaces pour la plupart, qui croissent en abondance sur tous les terrains, les pierres, les écorces, les rochers, plus de 20 000 sont aujourd'hui espèces répertoriées dans le monde. Leur étude (autrefois appelée Muscologie, et aujourd'hui, plus correctement, Bryologie), offre-t-elle de grandes difficultés. Les plus grandes espèces de cette famille ne dépassent guère 30 cm; la Fontinale (Une mousse fontinale vit aux abords de l'[eau douce](#)) antipyrétique (*Fontinalis antipyretica*), qui mesure près de 50 cm, est, dans les climats tempérés, l'espèce la plus grande.

Fontinalis antyperitica



Vesicularia dubyana = Mousse de Singapour



Taxiphyllum barbieri = Mousse de Java



Vesicularia montagnei = Christmas moss



Fissidens fontanus = Mousse fontaine

Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Caractéristiques et bioindication

Les mousses, très largement répandues, sont utilisées comme bioindicateurs de la pollution atmosphérique:

- Elles n'ont pas de racines,
- Elles se nourrissent de ce qu'elles trouvent dans la pluie et les poussières.
- Elles ont pour cela une paroi végétale très fine équipée de sites d'échanges cationiques qui facilitent les contacts avec l'atmosphère, ce qui accumule donc les polluants.

Les bioindicateurs des milieux terrestres

- Contrairement aux plantes vasculaires, elles poussent rarement sous forme de pied isolées, mais en groupes formant gazons, coussins, trames ou autres formes de croissance.
- Les mousses sont des bons bioindicateurs de contamination par :
 - Les métaux lourds
 - La radioactivité.

Les lichens et les mousses ont été également utilisés pour étudier la contamination globale par divers composés organochlorés

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Phanérogames aquatiques (du grec phaneros, apparent et gamos, union)

Les macrophytes aquatiques représentent une composante du compartiment végétal de cet hydrosystème. Ils désignent les grands végétaux aquatiques (bryophytes (pas de fleurs: algues), ptéridophytes (ni fleurs ni graines: fougères) et spermatophytes (plantes vasculaires produisant des graines:) et les algues filamenteuses (par exemple Cladophora sp., Characées), visibles et le plus souvent identifiables à l'œil nu sur le terrain. En fonction de l'inféodation à l'eau, on distinguera :

Spermatophytina



Adansonia digitata, le Baobab africain.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

- Les macrophytes réellement aquatiques ou **hydrophytes** (algues, bryophytes aquatiques, hydrophytes vasculaires) et
- Les végétaux **amphibies** ou amphiphytes qui différencient des formes aquatiques et des accommodats terrestres selon la profondeur de l'eau, et les végétaux de marais qui poussent " les pieds dans l'eau " ou **hélophytes**.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

LES MACROPHYTES

Les macrophytes sont des végétaux aquatiques visibles à l'œil nu. Comme la plupart des végétaux, sont des organismes vivants autotrophes, capables de réaliser, en présence de l'énergie solaire, de l'oxygène dissous et des éléments nutritifs prélevés du milieu la synthèse de leurs composés organiques.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

LES MACROPHYTES

Ils sont donc des « *végétaux aquatiques photosynthétiques* ». Ils regroupent les bryophytes, ptéridophytes et spermatophytes , phanérogames amphibies ou hydrophytes ainsi que les algues filamenteuses visibles à l'œil nu. De ce fait, ils représentent une part importante de la flore des écosystèmes aquatiques.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Différents types de Macrophytes

Hydrophyte : dans la classification de Raunkier, une plante *hydrophyte* est un type de plante qui vit en partie ou totalement immergée dans l'eau. Nous avons ;

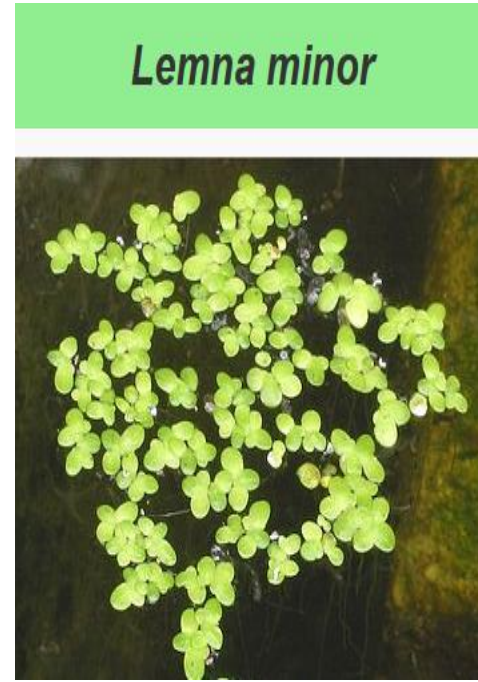
- *Hydrophytes à feuilles immergées*: Seules les fleurs apparaissent à la surface de l'eau (Rononcule).
- *Hydrophytes à feuilles flottantes* : les racines sont fixées sur un substrat et les feuilles de grande taille sont étalées à la surface de l'eau (Nénuphar).
- *Hydrophytes flottantes* : ne sont pas fixées au substrat et recouvrent la surface de l'eau (Lentilles d'eau).
- *Hydrophytes à feuilles submergés*: Ce sont des plantes aquatiques flottantes complètement immergées, à l'exception des petites fleurs blanches qui éclosent à la surface de l'eau, reliées à la plante par un fin pédoncule (Les élodées ou hélodées).



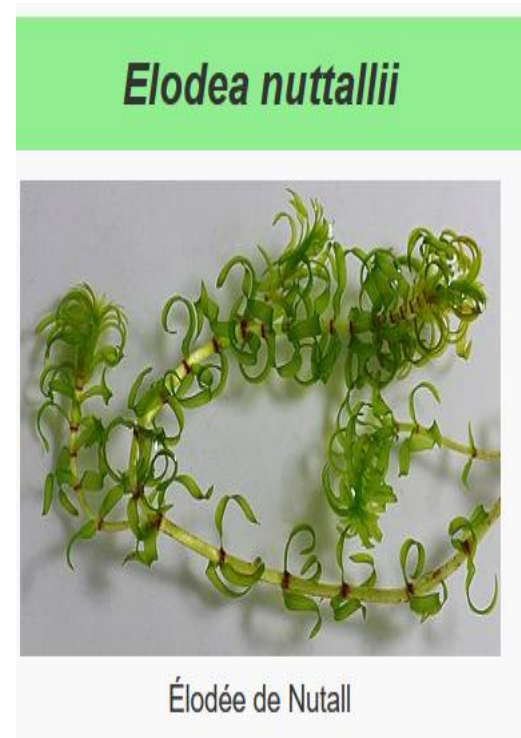
Ranunculus aquatilis



Victoria amazonica



Lentille d'eau



Élodée de Nuttall

Les Hydrophytes

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Différents types de Macrophytes

Hélophyte : une plante ***hélophyte*** est une plante semi-aquatique, typiquement de marais, dont les racines vivent toujours sous l'eau, mais les tiges, les fleurs et feuilles sont aériennes (Typha...).

Typha latifolia



Massette à larges feuilles.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les caractéristiques des macrophytes

- Comme ce sont des organismes sessiles, les macrophytes permettent d'avoir un portrait local de la contamination.
- Ils sont sensibles aux perturbations qui surviennent dans la colonne d'eau et dans les sédiments.
- La majorité des macrophytes sont des plantes annuelles, à cycles végétatifs courts, qui peuvent être prolongés par la production de rhizomes et de racines plus durables.
- Les macroalgues et les bryophytes ont la capacité de bioaccumuler différents métaux lourds. Celles-ci peuvent donc être utilisées pour évaluer la teneur en métaux lourds dans les milieux aquatiques.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les caractéristiques des macrophytes

Les algues sont faciles à collecter , transporter et conserver, ce qui simplifie leur utilisation.

- Elles répondent aux perturbations environnementales de façon quantifiable. Ces caractéristiques constituent des avantages notables en termes de bio-indication.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Facteurs environnementaux de distribution des macrophytes

- la température intervient à la fois dans le cycle de développement et dans la sélection des espèces et leur développement saisonnier.
- la lumière disponible détermine la photosynthèse et sélectionne les espèces
- Les paramètres physico-chimiques principaux: la minéralisation et la trophie de l'eau, déterminent la présence et le développement des espèces.
- la profondeur de l'eau détermine à la fois les conditions hydrodynamiques locales pour un débit déterminé et les possibilités de photosynthèse corrélées à la transparence du milieu

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Facteurs environnementaux de distribution des macrophytes

- La roche mère du bassin versant et le substrat (nature et structure) du lit sont étroitement liés à la dynamique du courant. La stabilité du substrat est, dans la plupart des cas, la première exigence pour la croissance des macrophytes. Ainsi les bryophytes exigent des substrats stables, les hélophytes ayant besoin de substrats meubles pour s'enraciner.
- Les gaz dissous, notamment le CO₂ dissous qui sert à la photosynthèse

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les facteurs biotiques

- La *compétition interspécifique* végétale, sélectionne les espèces en fonction non seulement de leur compétitivité, mais aussi de leur date relative d'installation
- La coopération entre macrophytes peut favoriser les successions végétales.
- La coopération animale, les animaux assurant le transport et la propagation des diaspores.
- La *consommation* et les dégâts physiques aux macrophytes effectués par les consommateurs primaires ou les organismes fouisseurs qui peuvent déraciner les macrophytes ou accroître les matières en suspension.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

Parmi les phanérogames aquatiques, *Typha latifolia* qui s'est avéré un efficace bioaccumulateur du *zinc* des concentrations de 1400 mg/kg dans les racines de plantes croissant sur des sédiments ayant une teneur de 10 mg.kg ont été relevées.

Les mousses aquatiques des genres *Fontinalis*, *Amblystegium*, *Rhynchostegium*, *Platyhypnidium*, *Cindidotus* (entre autres), constituent par leur fort potentiel de bioaccumulation, d'excellents bio-indicateurs en milieu dulçacicoles.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

L'aptitude de *Fontinalis antipyretica* à bioconcentrer par exemple le zinc et autres métaux toxiques a été plus particulièrement utilisée dès le milieu des années 1970, de même que celle d'une autre espèce voisine, *Fontinalis squamosa*. Ces deux espèces

montrent une bonne corrélation entre la concentration du zinc dans l'eau et les teneurs en ce métal relevées dans leurs tissus.

Des recherches ultérieures ont également mis en évidence l'aptitude de *Fontinalis antipyretica* à bioaccumuler les PCB et autres contaminants organiques xénobiotiques.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

LES ALGUES

Le groupe des algues correspond à l'ensemble des végétaux microscopiques aquatiques faisant partie du phytoplancton (plancton végétal) et du périphyton (algues benthiques, fixées sur les substrats submergés). Ces organismes autotrophes vivent dans les milieux d'eau douce ou salée, de même qu'en eaux libres ou stagnantes.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

LES ALGUES

Classification :

Les algues macrophytiques se classent en trois principales catégories selon les teneurs relatives de certains pigments de leur cellule :

- Les algues brunes ou **phaeophyceae**, riches en fucoxanthine, se développent surtout dans la zone de balancement des marées et dans l'infralittoral.
- Les algues rouges ou rhodophytes, riches en phycoérythrine et de taille plus modeste que les brunes, vivent souvent en épiphytes de grandes algues comme les laminaires, des zostères, de l'épifaune sessile ;

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

LES ALGUES

Classification :

Les algues vertes ou chlorophytes, riches en chlorophylle a et b, ont une taille le plus souvent inférieure à 0,5 m. Plus tolérantes aux eaux douces ou saumâtres que les précédentes, elles peuvent proliférer dans des zones où les apports en nutriments (eutrophisation) sont élevés et/ou fréquents.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les espèces les plus utilisées

LES ALGUES

Caractéristiques:

- Les algues sont des organismes photosynthétiques qui assurent 45% de la production végétale.
- Ces producteurs primaires, situés à la base de la chaîne alimentaire, représentent donc une majeure source de nourriture pour le plancton animal et la macrofaune aquatique.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Principaux facteurs d'influence

- L'apport de nutriments dans les milieux aquatiques. En effet, la photosynthèse, qui permet aux algues de convertir l'énergie lumineuse en biomasse, est limitée par la quantité de nutriments disponibles dans le milieu. De ce fait, plus les nutriments sont abondants, plus la biomasse algale augmente.
- Les algues sont très sensibles à la qualité physico-chimique de l'eau, notamment quant au pH, au niveau de salinité, à la présence de polluants organiques toxiques (particulièrement les herbicides) et de métaux lourds.

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Les macroinvertebres

Définition : Les macroinvertébrés benthiques sont des organismes qui vivent dans le fond d'un cours d'eau ou qui ne s'en éloignent que de peu durant la majeure partie de leur vie. Dépourvus de colonne vertébrale, ils sont visibles à l'œil nu. On retrouve dans cette catégorie les larves d'insectes aquatiques, quelques insectes aquatiques adultes, les crustacés, les mollusques et les vers. Les principaux ordres d'insectes aquatiques appartenant à cette catégorie d'organismes sont les suivants : Éphémères, Plécoptères, Trichoptères, Diptères, Coléoptères, Mégaloptères, Hémiptères, Odonates et Lépidoptères (Gagnon et Pedneau, 2006).

Les bioindicateurs des milieux aquatiques

Ephemeroptera



Ephemera danica.

Plecoptera



Plécoptère de la famille des *Pteronarcyidae*

Trichoptera



Diptera



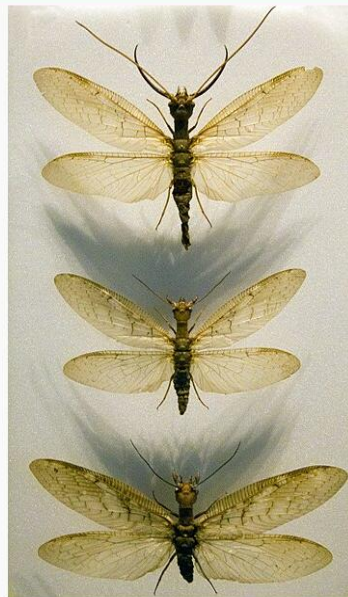
Différentes espèces de diptères.

Coleoptera



Différentes espèces de coléoptères

Megaloptera



Mégaloptères

Odonata



Libellula quadrimaculata.

Lepidoptera



Pourquoi etudier les MIB?

Le suivi des macroinvertébrés benthiques est utile pour :

- Évaluer l'état de santé des écosystèmes aquatiques;
- Suivre l'évolution de l'état de santé d'un cours d'eau au fil du temps;
- Évaluer et vérifier l'impact d'une source de pollution connue sur l'intégrité de l'écosystème;
- Évaluer les effets des efforts de restauration (des habitats et de la qualité de l'eau);
- Documenter la biodiversité du benthos dans les cours d'eau.

Caractéristiques des macro-invertébrés

- Ils sont utilisés dans les études écotoxicologiques car :

1. Ils sont représentatifs du milieu, d'ailleurs ils colonisent un grand nombre d'habitats et de microhabitats.

2. Ils sont caractérisés par la présence d'espèces potentielles aux fortes capacités indicatrices. Ils ont des exigences écologiques variées et une grande diversité physiologique et comme les sources de contamination sont multiples ce qui leur confère des sensibilités différentes aux toxiques.

3. Ils occupent plusieurs niveaux trophiques et ont un rôle fonctionnel important au sein de l'écosystème.

Caractéristiques des macro-invertébrés

4. Ce sont des organismes sédentaires ils ne peuvent pas échapper aux polluants

5. Ils ont un cycle de vie relativement long (un à trois ans dans les eaux des régions tempérées

de l'hémisphère Nord), qui permet l'intégration, avec le temps, des agents de stress environnementaux et de leurs effets cumulatifs.

6. Ils sont abondants, ils présentent une grande variété avec au moins 150 familles, 700

genres et 4400 espèces et relativement faciles à collecter, faciles à attraper ainsi qu'à identifier et leur manipulation est aisée. De plus, leur prélèvement a peu d'impact négatif sur

le biote en place.

7. Ils sont des espèces à forte valeur patrimoniale (pertinence),

Caractéristiques des macro-invertébrés

8. les macroinvertébrés sont utilisés de façon courante dans plusieurs pays et par la plus part des agences de la qualité de l'eau (existence d'une base de données), ce qui permet de transposer et d'adapter des protocoles expérimentaux.

Facteurs d'influence

- 1- Les macroinvertébrés benthiques sont tous poïkilothermes(a sang froid: T corporelle varie en fonction de celle du milieu) très dépendants de la température de leur milieu de vie car elle conditionne leur cycle biologique (développement des œufs, croissance des larves, métabolisme).
2. Les macroinvertébrés benthiques sont, sensibles à la teneur en oxygène des eaux (L'anoxie des eaux, la trophée du milieu et la granulométrie des substrats sont aussi des facteurs importants notamment pour leur taille et abondance

Facteurs d'influence

3. La vitesse de courant est aussi déterminante car elle conditionne le transport des nutriments, le renouvellement de l'oxygène et la dérive d'une partie de la nourriture et des invertébrés eux-mêmes.

4. En effet, de nombreux paramètres physico-chimiques tel que La turbidité, la transparence de l'eau, la quantité totale de solides dissous, et la profondeur de l'eau ont un important impact sur l'occurrence, l'abondance ainsi que la distribution des communautés de macroinvertébrés.

Facteurs d'influence

5. Le type, la composition ainsi que la taille des plantes émergentes se trouvant dans les points d'eau sont d'importants paramètres influençant le développement et la croissance des communautés de macroinvertébrés
6. Les solides en suspension (TDS)
7. Les sédiments qui se déposent sur le fond
8. La construction de barrières
9. L'augmentation des nutriments (eaux de ruissellement des pluies, ...)
10. Les effluents industriels (métaux lourds, pesticides, pollution organique...)

MI et bioindication

- Les macro-invertébrés benthiques possèdent des sensibilités variables à différents stress comme la pollution ou la modification de l'habitat. Certains groupes de macro-invertébrés tels que les vers sont ainsi peu sensibles aux perturbations, ils sont dits «polluotolérants», contrairement à d'autres tels que les plécoptères dit «polluosensibles».

MI et bioindication

- Généralement les organismes les plus tolérants sont les oligochètes, les diptères (chironomes), les mollusques bivalves et les amphipodes. Ces organismes possèdent la capacité de bioaccumuler les contaminants et d'en survivre. Les organismes les plus sensibles sont généralement les éphémères, plécoptères et trichoptères.

Échelle de tolérance des grands groupes taxonomiques

Échelle de tolérance	Groupes taxonomiques
SENSIBLE	Plécoptères
SENSIBLE	Éphéméroptères
SENSIBLE	Trichoptères
MOYEN	Crustacés (amphipodes, isopodes)

MOYEN	Mollusques (gastéropodes, bivalves)
MOYEN	Odonates (anisoptères, zygoptères)
MOYEN	Coléoptères
MOYEN	Hémiptères
MOYEN	Lépidoptères

MOYEN	Mégaloptères
MOYEN	Diptères (sauf chironomides)
TOLERANT	Diptères (chironomides)
TOLERANT	Annélides (oligochètes, sangsues)

Évaluation de la qualité de l'eau

- Après le dénombrement des macroinvertébrés, notez le nombre de macroinvertébrés de chaque groupe récoltés.
- Notez les deux groupes les plus nombreux « Groupes dominants
- Avec les deux groupes de macroinvertébrés les plus abondants récoltés et identifiés, utilisez la table de la qualité de l'eau en fonction de l'échelle de tolérance des macroinvertébrés

Table indiquant la qualité de l’eau de la rivière en fonction de l’échelle de tolérance des macroinvertébrés.

		GROUPE 1				
		Très tolérant	Tolérant	Moyen	Sensible	Très sensible
G R O U P E 2	Très tolérant	Dégradée	De dégradée à pauvre	Pauvre	Moyenne	De bonne à moyenne
	Tolérant	De dégradée à pauvre	Pauvre	Pauvre	De moyenne à bonne	Bonne
	Moyen	Pauvre	Pauvre	Moyenne	Bonne	Bonne
	Sensible	Moyenne	Moyenne	De moyenne à bonne	Bonne	Excellente

