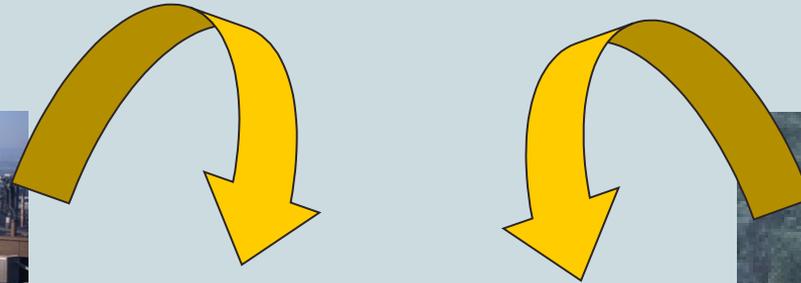


Les polluants dans l'environnement aquatique

Hélène Roche, Ecotoxicologue, IR1 CNRS

et Marc Girondot, Professeur Université Paris-sud 11

Unité Ecologie, Systématique et Evolution UMR8079 CNRS-Université Paris 11



Ecotoxicologie aquatique

- 1 - Définitions et concepts,
- 2 - Les objectifs de l'écotoxicologie
- 3 - Outils de l'écotoxicologie et protocoles
- 4 - Les polluants dans l'environnement aquatique
 - Les réseaux trophiques
 - La chaîne alimentaire
 - Les polluants organiques persistants (POPs)
 - La bioaccumulation
 - La bioamplification des PCBs et du DDT
- 5 - Caractérisation d'une bioamplification (démarche scientifique)
- 6 - Quelques questions et quelques chiffres

1- Définitions

Qu'appelle t'on polluant?

Un **polluant** est un “élément” biologique, physique ou chimique, qui peut avoir des impacts négatifs (toxicité) sur tout ou une partie d'un **écosystème** ou de l'**Environnement** en général, dans certaines conditions.



Exposition de Florence Douyrou

D'où viennent-ils ?

Leur présence peut être naturelle...

- gaz des volcans,
- minéraux dans les sols et les eaux,
- produits de dégradation,
- gaz et produits de fermentation,
- hydrocarbures (incendies) , etc.



<http://cylia44.c.v.de/ce/>



<http://img88.inogashack.us/img88>



<http://bloasimaaes.skynet>



www.le-mag.fr



.... ou due à l'Homme (origine anthropique)

... définitions et concepts...



Étang de Berre (13) photo

production d'énergie
(nucléaire, pétrole, gaz, charbon)



Usine Alcan, photo F. Ramade

activités du
secteur
agricole
(intrants, engrais,
pesticides...)



activités industrielles
(chimie, métallurgie, électronique,
automobile et aéronautique,
pharmacie, agroalimentaire,
papeterie, ...)



décharge sauvage est de Marseille F. Ramade

décharges

pollution
urbaine



Paris vue de la Tour Eiffel, photo F. Ramade

Qu'appelle t'on polluants chimiques?

Les polluants chimiques sont des substances chimiques
- solubles dans l'eau : hydrosolubles
ou - insolubles dans l'eau mais solubles
dans les graisses: lipophiles

Que font-ils dans la nature?

Ils sont dispersés et y rencontrent des « substrats ».

Dispersion - Accumulation

Propriétés physico-chimiques des molécules qui déterminent la dispersion des polluants

- **La solubilité** d'un composé dans l'eau est exprimée en mg/L à 20°C. Les composés de solubilité plus élevée sont normalement plus facilement lixiviables dans les eaux souterraines.

- **La pression de vapeur** est la pression à laquelle un liquide et sa vapeur sont en équilibre à une température donnée. Plus la pression de vapeur d'un liquide est élevée plus ce liquide s'évapore rapidement.

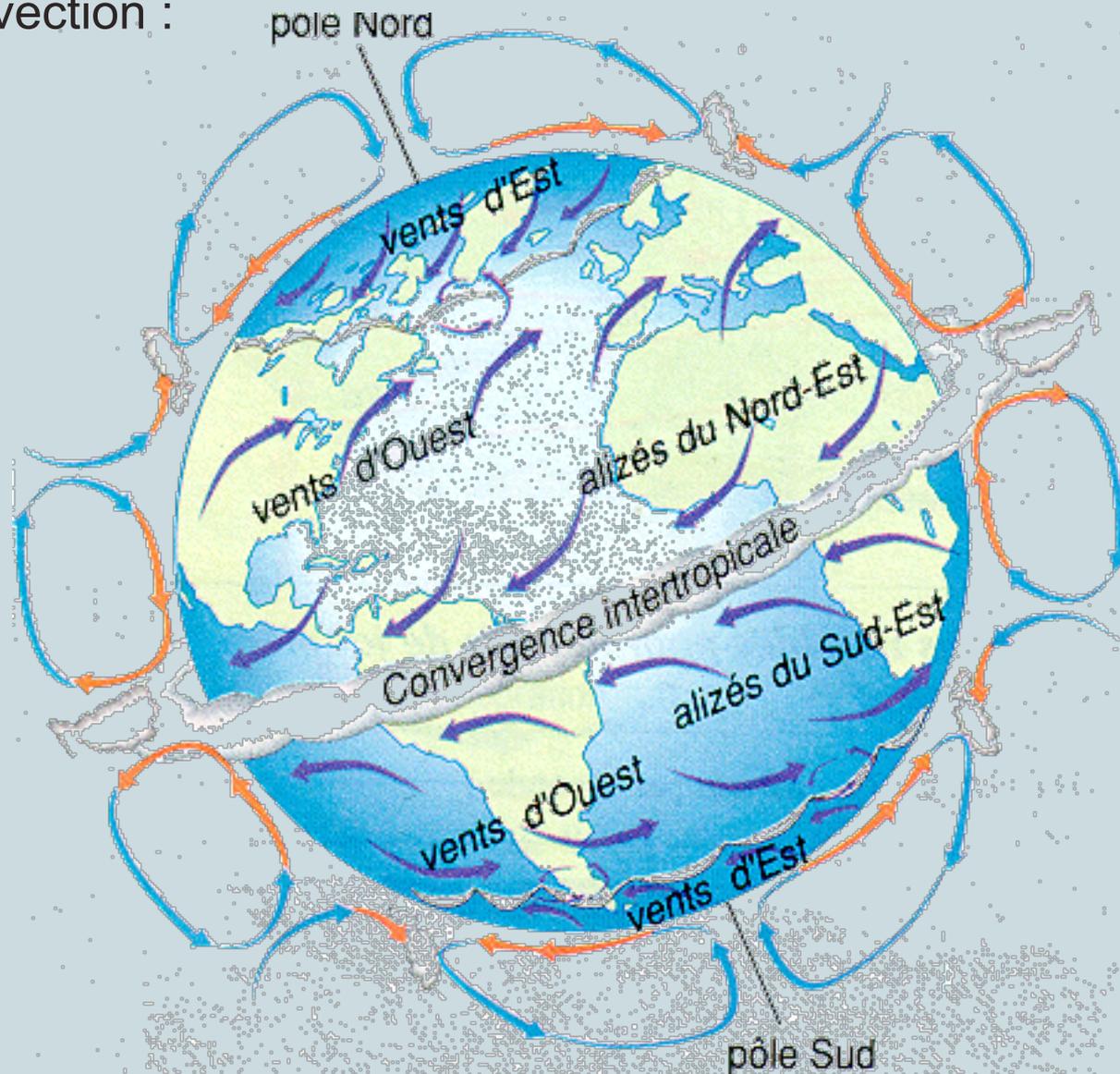
- **La rémanence** désigne l'aptitude d'un polluant à demeurer dans le milieu

le temp de 1/2 vie (DT_{50}) temps nécessaire à l'élimination de 50% du polluant

Circulation atmosphérique des polluants

... définitions et concepts...

Les cellules de convection :



Quelles sont leurs « relations » avec les substrats?

- Dans le sol, l'eau, les sédiments
 - ➔ ils sont stockés ou dégradés (physico-chimie)
- Dans les organismes (micro-organismes, animaux ou plantes)
 - ➔ ils sont assimilés, excrétés, métabolisés, mais surtout ils sont stockés: **bioaccumulés**

Bioaccumulation

Parmi les plus préoccupants :

Polluants Organiques Persistants (POPs)

Qui sont les scientifiques qui s'intéressent aux polluants?

Ils sont des écologues qui s'intéressent aux **toxiques** dans les écosystèmes: des **écotoxicologues**.

L'écotoxicologie est **l'étude** des effets des polluants sur l'environnement dans sa totalité (y compris l'homme)

Le **rôle** de **l'écotoxicologie** est de comprendre comment les substances toxiques circulent dans l'environnement, quels sont leurs effets et comment elles agissent dans les organismes et les groupes d'organismes (populations, communautés, écosystèmes, écosphère).

L'écotoxicologie est la science des contaminants dans la biosphère et leurs effets sur les constituants de la biosphère en y incluant l'homme.

(M.C. Newman & W.H. Clements Ecotoxicology: a comprehensive treatment, 2007)

... concepts...

écotoxicologie

écosystème

communautés

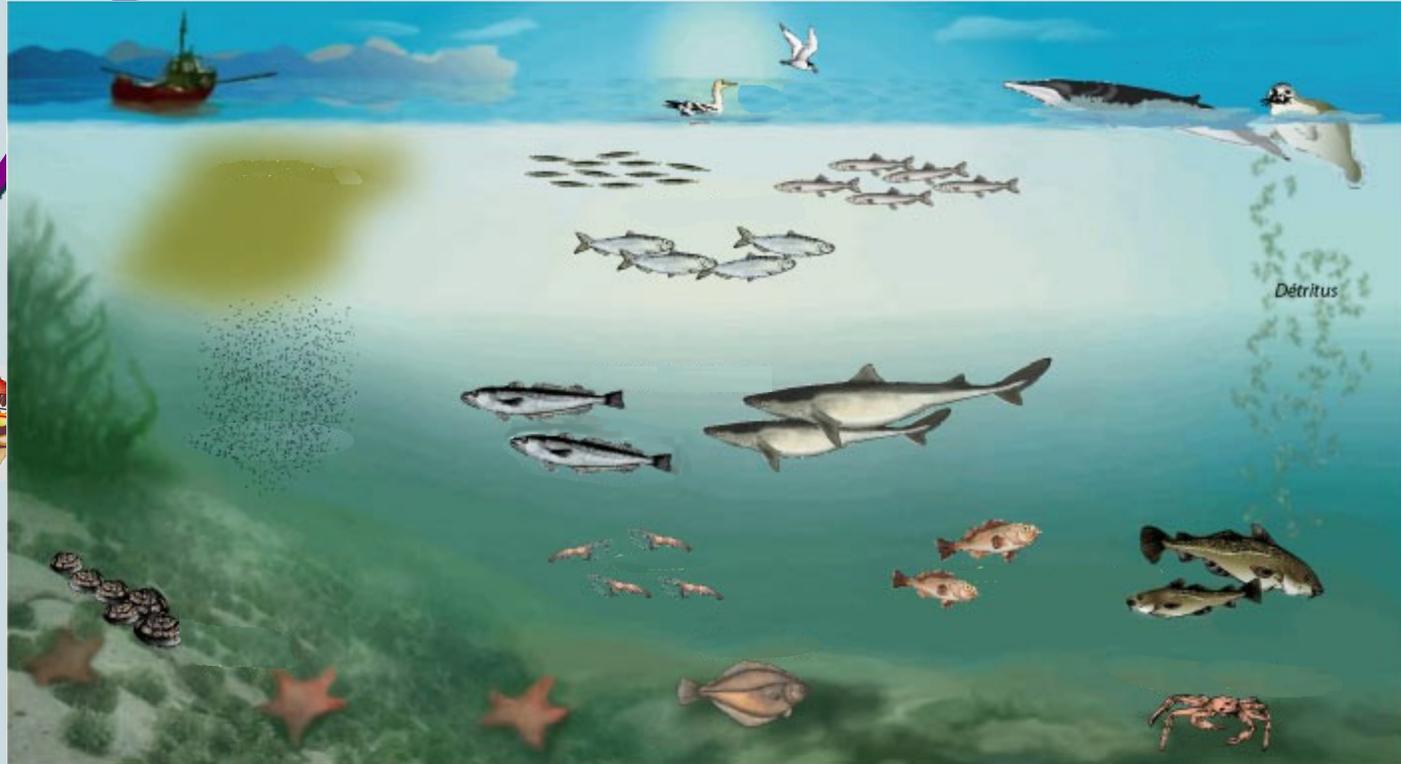
populations

individus

organes

cellules

molécules



court terme

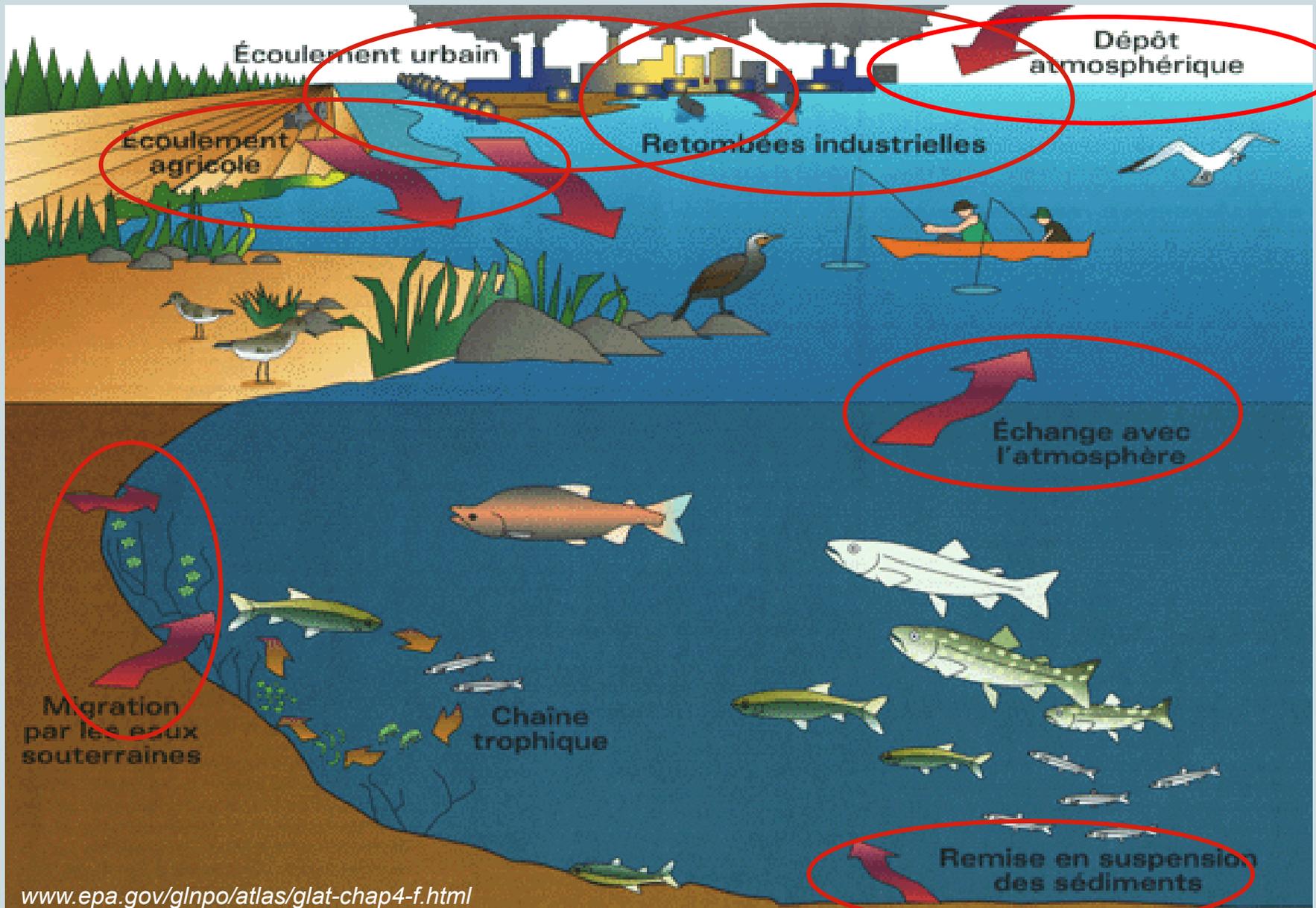
Long terme

toxicologie

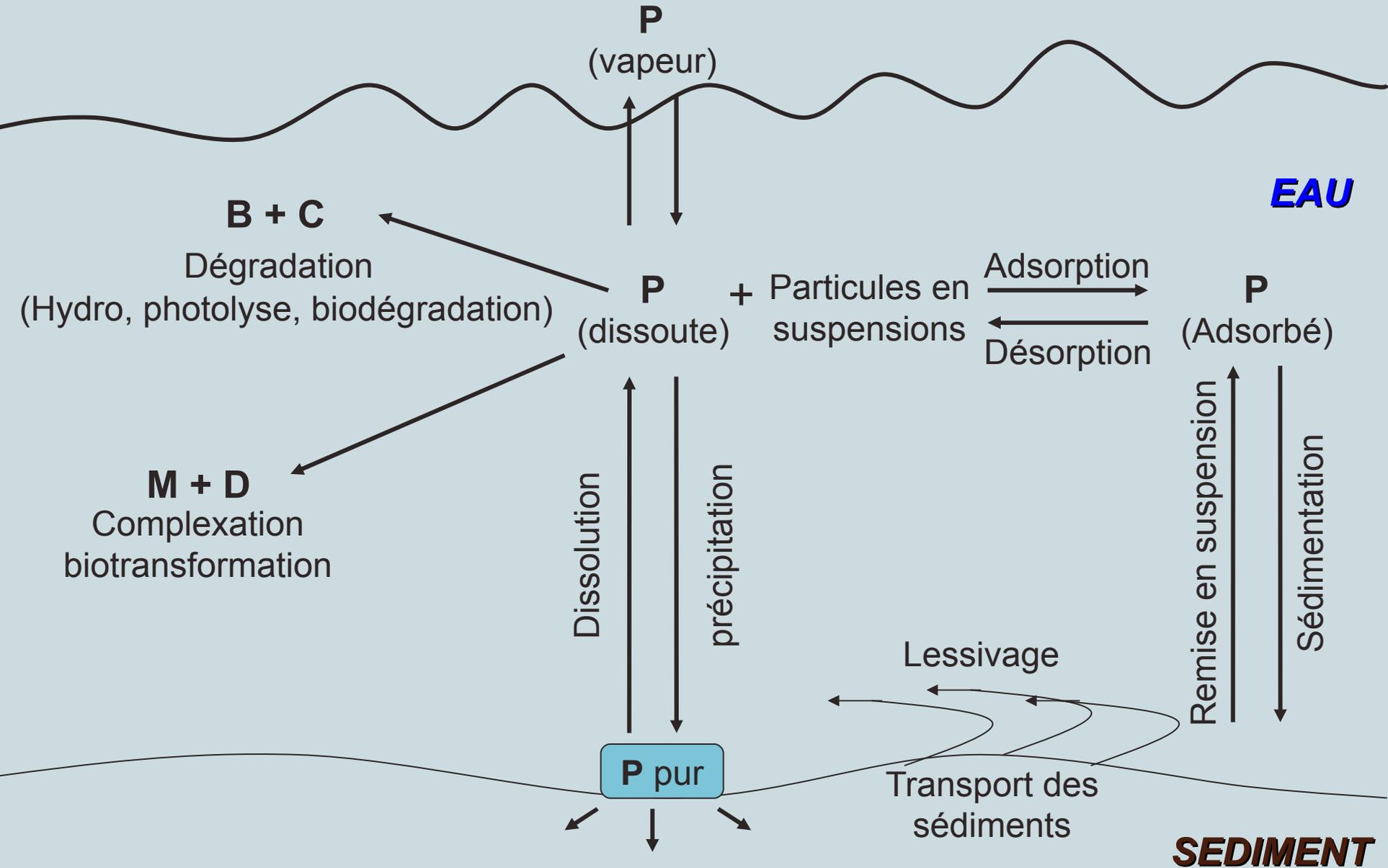
Les polluants touchent tous les niveaux d'organisation biologique L'écotoxicologie s'intéresse à tous les « compartiments » de l'écosystème

Sources et cheminement de la pollution

... concepts...



Comportement des Polluants en milieu aquatique



2 - Les objectifs de l'écotoxicologie

2 - Les objectifs de l'écotoxicologie

- **Évaluation du risque chimique**
 - approche *a priori* (tests - bioessais)
 - approche *a posteriori* (bilan, constat, suivi...)

→ **Normes de protection de l'environnement**

Recherche scientifique

- *la contamination de l'environnement*
- *le comportement et effets des polluants*
- *Les conséquences écologiques sur de grandes échelles spacio-temporelles*
(cycles biogéochimiques, processus écologiques fondamentaux, du paysage à la biosphère)

Remédiation - restauration - Ingénierie écologique

- mise au point d'outils biologiques pour résoudre des problèmes de pollution, rétablir ou maximiser un service écosystémique.

Interdisciplinarité de l'écotoxicologie

3 - Outils de l'écotoxicologie et protocoles

Les outils à la disposition de l'écotoxicologie

Approche *a priori* (pronostic)

- in vitro

du tube à essai au mésocosme

réplicabilité

Approche *a posteriori* (diagnostic)

- *in situ* (*in natura*)

Écosystèmes naturels

représentativité

- *a priori* : bio-essais

- tests létaux (relation mortalité-temps d'exposition(CL50-24h) concentration efficace (CE)
tests daphnie, poisson, vers de terre (AFNOR)
- tests sublétaux
croissance d'algues unicellulaires
inhibition de la bioluminescence (microtox)
motilité (truitotest)
inhibition de la reproduction (daphnies, chlorelles)

- bioessais d'effets mutagènes et tératogènes (sur culture de cellules /bactéries)
micronoyaux
test des comètes (comet assay)
brins d'ADN
adduits à l'ADN

- *a posteriori* - Monitoring et Biomonitoring

Détermination et mesure des niveaux de contamination des biotopes ainsi que des populations végétales et/ou animales exposées

Evaluation des effets écotoxicologiques sur les individus les peuplements ou les biocoenoses exposées

Outils : **bioindicateurs et biomarqueurs**

• **Bioindicateurs** ou espèces bioindicatrices ou espèces "sentinelles"

Ce sont des espèces plus ou moins pollusensibles dont l'intérêt est basé sur leur particularité bioécologique

Principaux critères de sélection des bioindicateurs:

- . capacité à accumuler le polluant sans effet "directement" néfaste
- . abondance dans le milieu
- . sédentarité
- . longévité (+ ou -)
- . taille suffisante pour échantillonnage
- . réponses physiologiques évaluables
- . emplacement dans le réseau trophique

- **Biomarqueurs**

“les biomarqueurs sont des changements moléculaires, biochimiques, physiologiques histologiques et morphologiques spécifiques dans des populations d'animaux et de plantes, observés après une exposition à un polluant.” van Gestel et van Brummelen, 1996.

“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.

4 - Les polluants dans l'environnement aquatique

- Les réseaux trophiques

Que fait le polluant quand il « rencontre » un être vivant ?

Il peut s'incorporer dans les organismes : **bioaccumulation**

- **contamination directe**: transfert à travers les épithéliums au contact du milieu (peau, branchies, aliments ...)
- **bioamplification** : transfert alimentaire

Transfert trophique

Un réseau trophique se définit comme un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la matière circulent.

Qui mange qui ?

Dans un écosystème marin

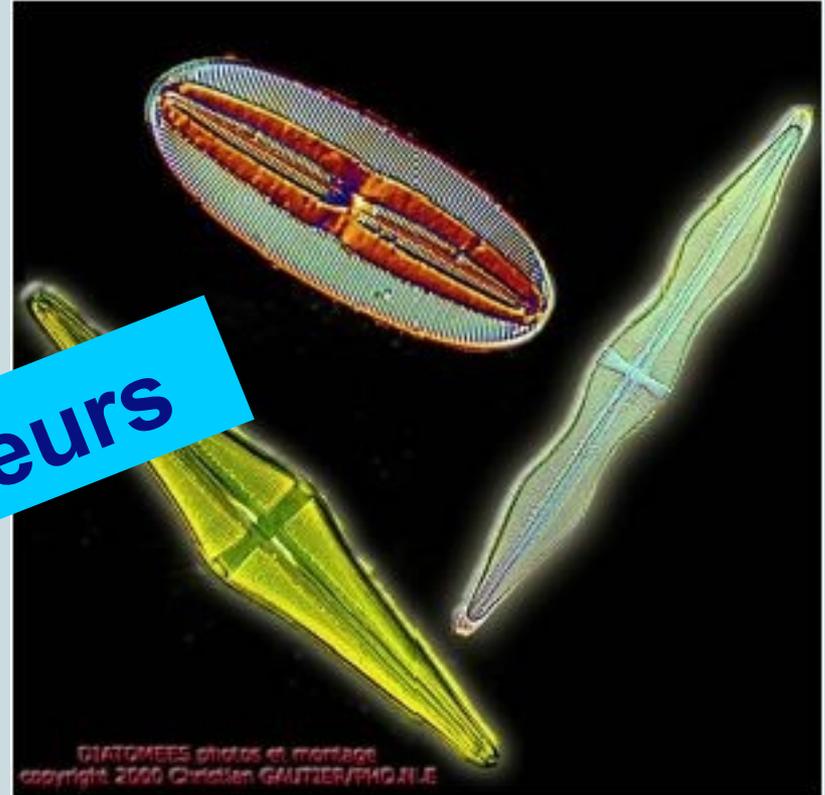
Phytoplancton → Zooplancton → Harengs → Thons → Dauphins

Le plancton: organismes de très petite taille qui flottent et se déplacent à la surface de la mer et sur une dizaine de mètres de profondeur, au gré des courants

Le plancton végétal (phytoplancton) est à la base de la chaîne alimentaire marine

Il est constitué d'algues microscopiques flottantes qui se développent grâce à l'énergie solaire (photosynthèse)

Producteurs



Les Diatomées (algues dorées) sont responsables de la majorité de la photosynthèse océanique

Phytoplancton → **Zooplancton** → Harengs → Thons → Dauphins

Le plancton animal (**zooplancton**) se nourrit du phytoplancton ou d'autres organismes zooplanctoniques

Petits animaux de pleine eau (crevettes, larves de poissons, petits crustacés)



Copépode
Petits crustacés



Méduse



Krill
Crustacés
Nourriture des baleines

Consommateurs primaires

Phytoplancton → Zooplancton → **Harengs** → **Thons** → **Dauphins**



Les harengs mangent le zooplancton

Consommateurs secondaires



Les thons mangent les harengs



Les dauphins mangent les thons...

... réseaux trophiques....

... et les organismes sédimentaires....



décomposeurs



un réseau trophique

est l'ensemble des organismes d'un écosystème liés entre eux par des **relations alimentaires**

Il est constitué d'organismes **producteurs**, de **décomposeurs** et de **consommateurs**.

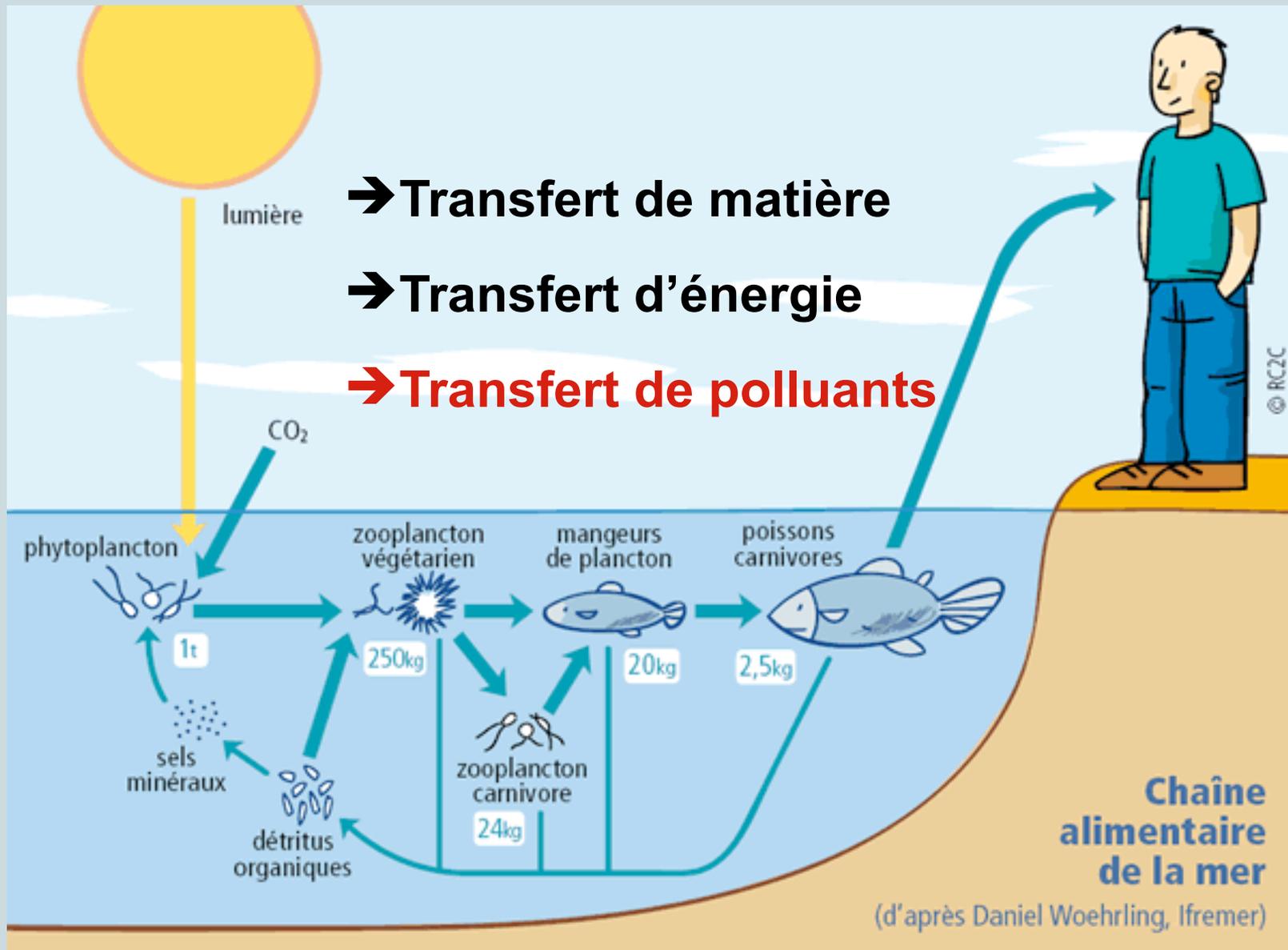
On définit des

Guildes trophiques
ou compartiments trophiques

4 - Les polluants dans l'environnement aquatique

- Les réseaux trophiques
- La chaîne alimentaire

Fonctionnement d'une chaîne alimentaire



4 - Les polluants dans l'environnement aquatique

- Les réseaux trophiques
- La chaîne alimentaire
- Les polluants organiques persistants (POPs)

Dans l'ensemble des polluants, les POPs sont

... les POPs...

- ✓ Des pesticides **organochlorés** (DDT, lindane....)
- ✓ Des **PCBs** (polychlorobiphényles) (isolants, plastiques...)
- ✓ Des **HAPs** (hydrocarbures) (pétrochimie, combustion)
- ✓ Des **dioxines** (organochlorés polychlorés) (combustions incomplètes, incinérateurs, défoliants....)
- ✓ Des **PBDE** (polybromodiphényles) (retardateurs de flammes)
- ✓ + autres polluants émergents..

Quelles sont leurs particularités ?

- ✓ Micropolluants (traces)
- ✓ Troubles métaboliques à partir de doses faibles (perturbateurs endocriniens; carcinogènes, immunodépresseurs...) (toxiques)
- ✓ Sources diffuses et difficilement contrôlables
- ✓ **Incorporation facile dans l'organisme** (lipophiles)
- ✓ **Long temps de demi-vie** et dégradation limitée
- ✓ Détection et analyse difficiles

PBT Persistant Bioaccumulatif et Toxique

Liste des 12 produits PBT considérés prioritaires
Convention de Stockholm (2001)

- aldrine/dieldrine
- mercure et ses dérivés
- benzo(a)pyrène
- mirex
- chlordane
- octachlorostyrène
- DDT, DDD, DDE
- PCBs
- hexachlorobenzène
- dioxines and furanes
- alkyl plomb
- toxaphène

Impacts des POPs sur les écosystèmes

dans les organismes

- ✓ bioaccumulation directe ou **bioamplification**
- ✓ toxicité
- ✓ altérations métaboliques ou endocriniennes

dans les écosystèmes

- ✓ altération des « relations » trophiques : flux d'énergie; circulation de la matière; abondance et disponibilité des sources alimentaires; intensité de la prédation
- ✓ effets sur la longueur des chaînes trophiques dans le cas d'une exposition chronique
- ✓ effets sur la **biodiversité**.....

4 - Les polluants dans l'environnement aquatique

- Les réseaux trophiques
- La chaîne alimentaire
- Les polluants organiques persistants (POPs)
- La bioaccumulation

Exemple célèbre de Bioaccumulation (Arctique)

d'après Inuit Tapiriit Kanatami



- transfert atmosphérique des POPs
- contamination du sol et des végétaux
- consommés par des herbivores
- consommés par des carnivores et des omnivores

- transfert atmosphérique des POPs
- contamination des dépositaires et des producteurs primaires
- puis des consommateurs 1aires (invertébrés)
- des consommateurs 2aires
- des carnivores et des omnivores.....



4 - Les polluants dans l'environnement aquatique

- Les réseaux trophiques
- La chaîne alimentaire
- Les polluants organiques persistants (POPs)
- La bioaccumulation
- La bioamplification des PCBs et du DDT

La **bioamplification** (biomagnification) est le phénomène par lequel une substance, présente dans le biotope, naturelle ou polluante, connaît un accroissement de sa concentration au fur et à mesure qu'il circule vers les maillons supérieurs d'un réseau trophique.

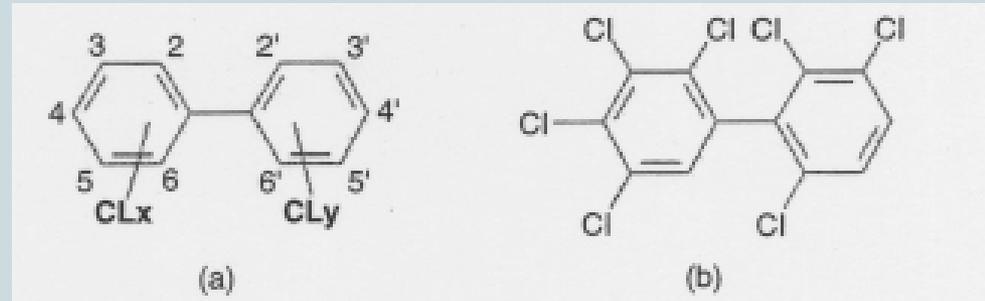
Les PCBs: les Polychlorobiphényles

- 209 molécules (congénères) (pyralène, arochlor..) possibles dont 120 sont présents dans les produits commerciaux, *fabriqués entre 1929 et 1977*

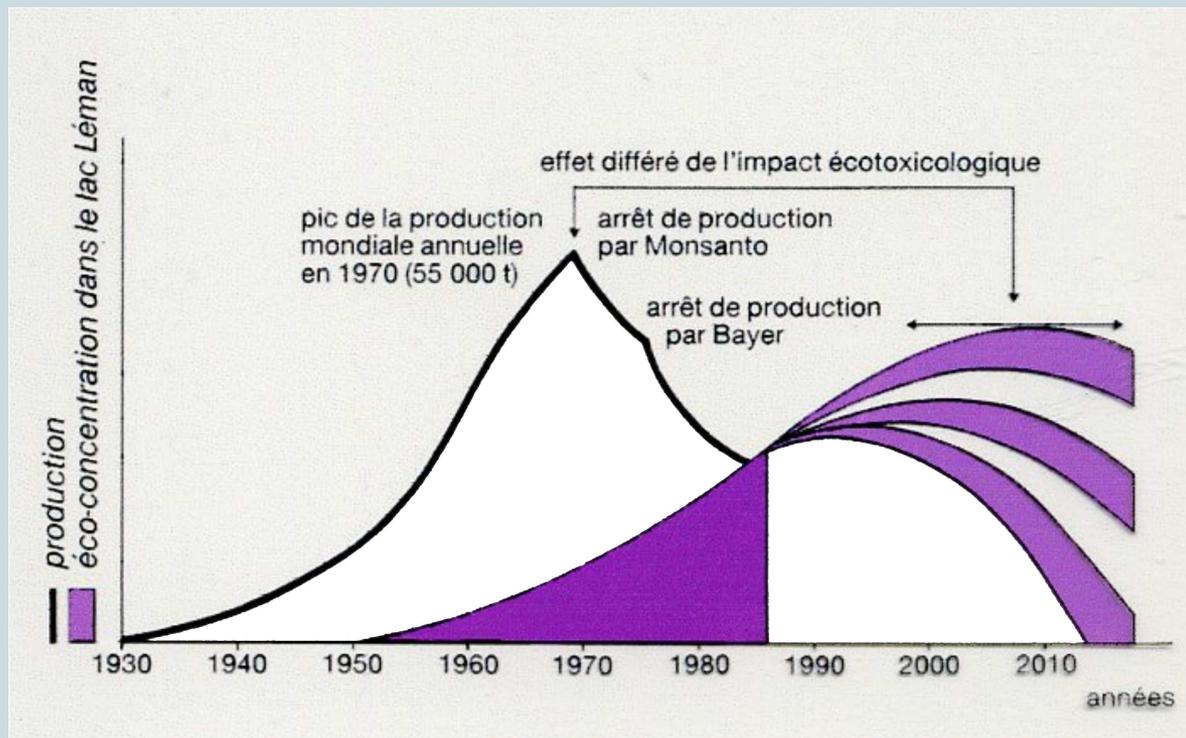
- Interviennent de la composition de nombreux matériaux utilisés comme additifs d'huiles, de produits de soudure, dans certains adhésifs, certaines peintures, transformateurs, condensateurs, certains composants électroniques...

Propriétés

- peu dégradables (chimiquement inertes)
- thermiquement stables
- excellents isolants
- persistants
- leur combustion incomplète → dioxines, furannes
- bioaccumulables, très lipophiles
- rémanents
- transfert atmosphérique, eau de ruissellement, trophique
- bioamplifiables (+ chlorés)
- toxicité humaine (chloracnée, cancer, diminution de fertilité, immunosuppression....)



Modélisation de la concentration en PCB dans les poissons du Lac Léman

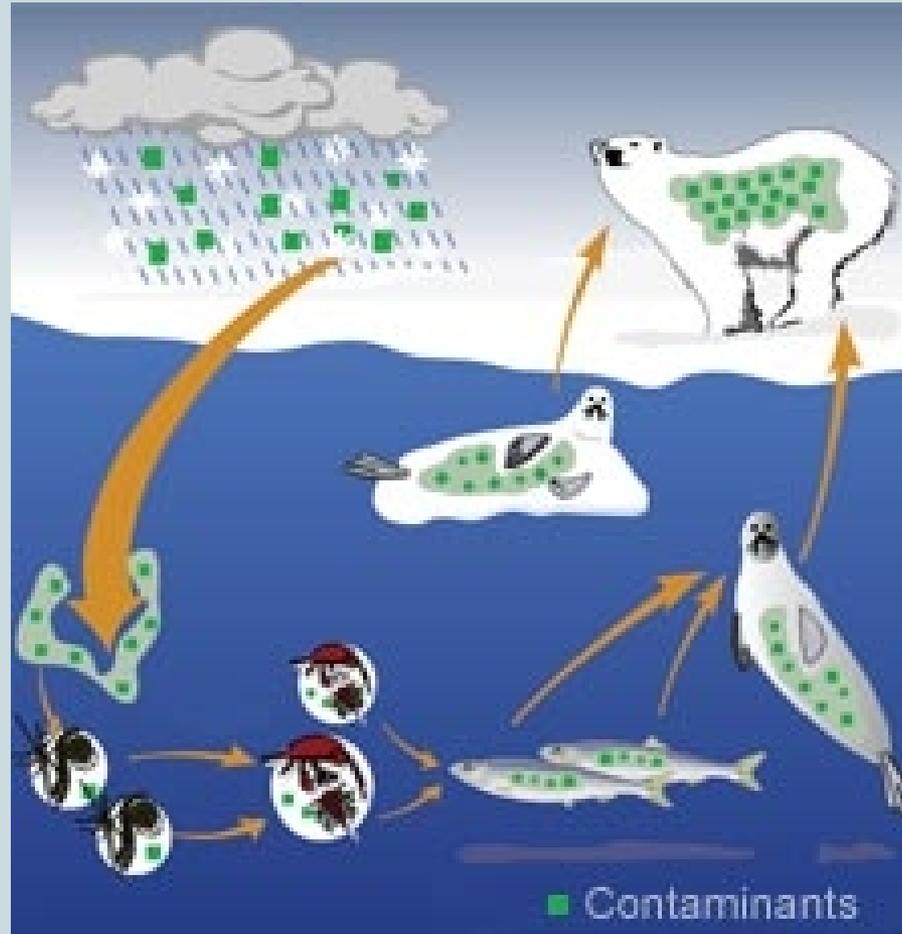


d'après F. Ramade, 2000

- La production des PCBs est réduite à partir de 1970.
- 15 ans après, les concentrations ont continué à croître dans les poissons du lac Léman
- Il faudra attendre 40 ans pour espérer observer une décroissance de la contamination chez ces espèces

Exemple célèbre de bioamplification (Arctique)

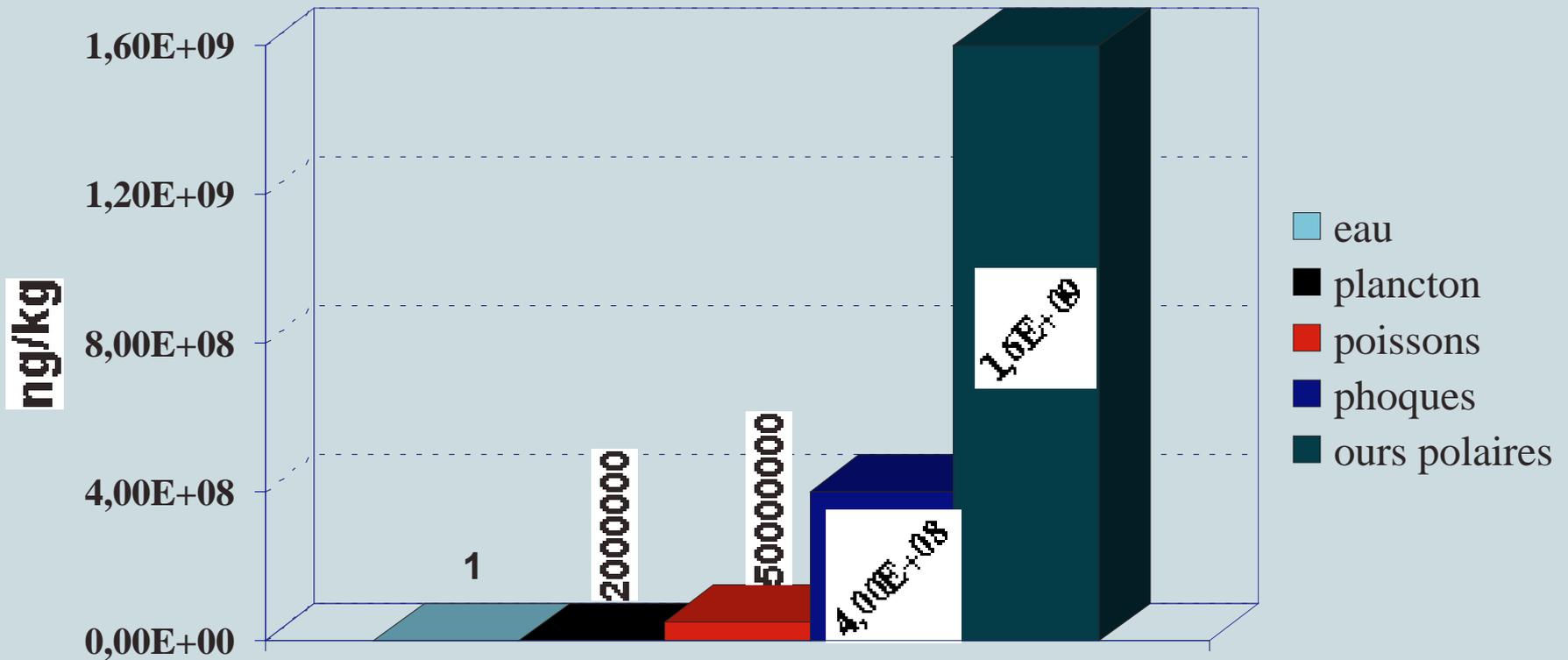
d'après Inuit Tapiriit Kanatami



Le phoque et l'ours polaire bioconcentrent les contaminants lipophiles (PCBs etc...) à partir de leurs aliments

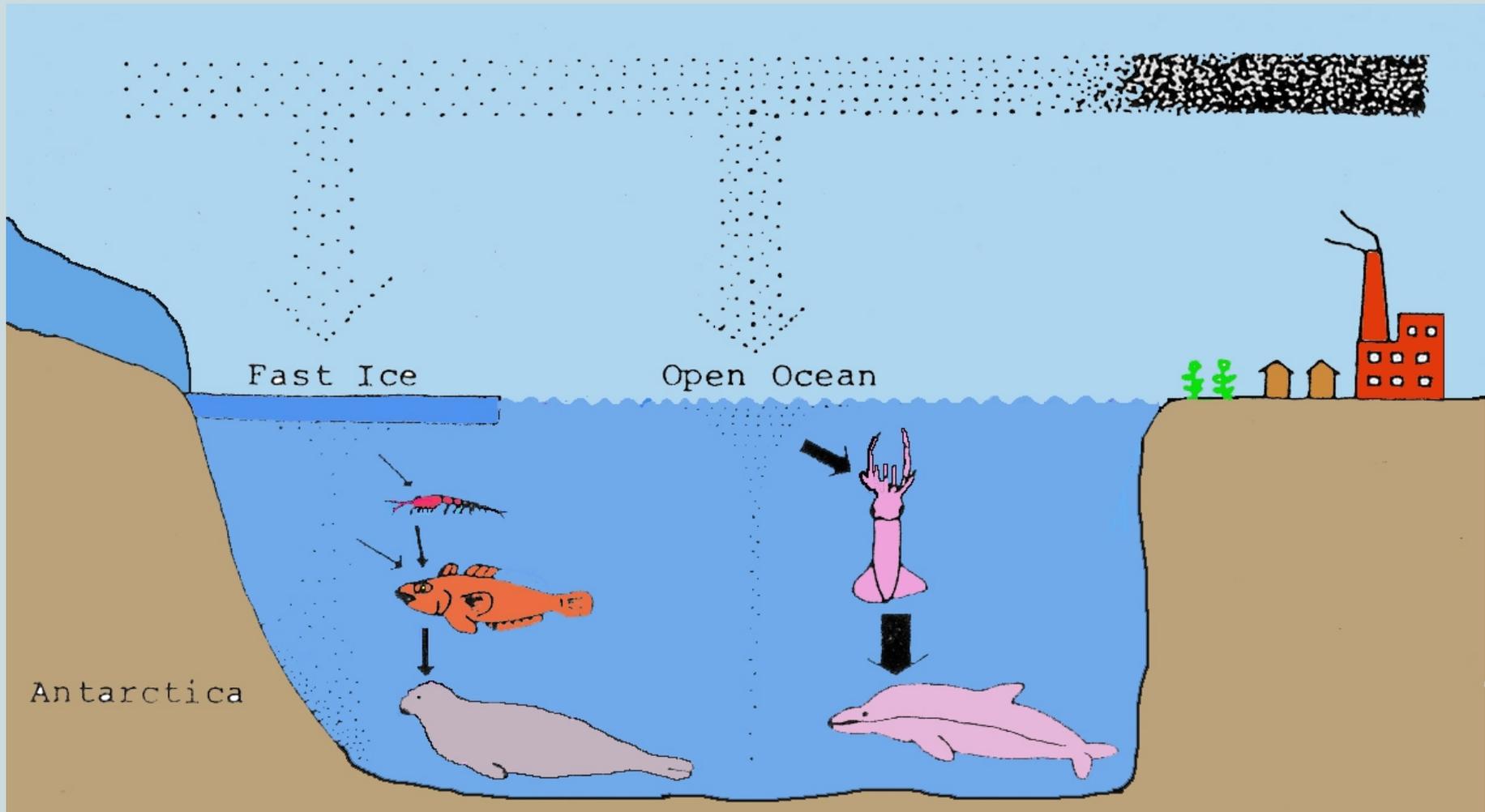
Bioamplification des PCBs dans une chaîne trophique arctique

Estimation à partir de données de la littérature scientifique



➔ de la concentration en PCBs du plancton à l'ours polaire **X 800**

Dispersion Globale des PCBs: Cas de la contamination de L'antarctique

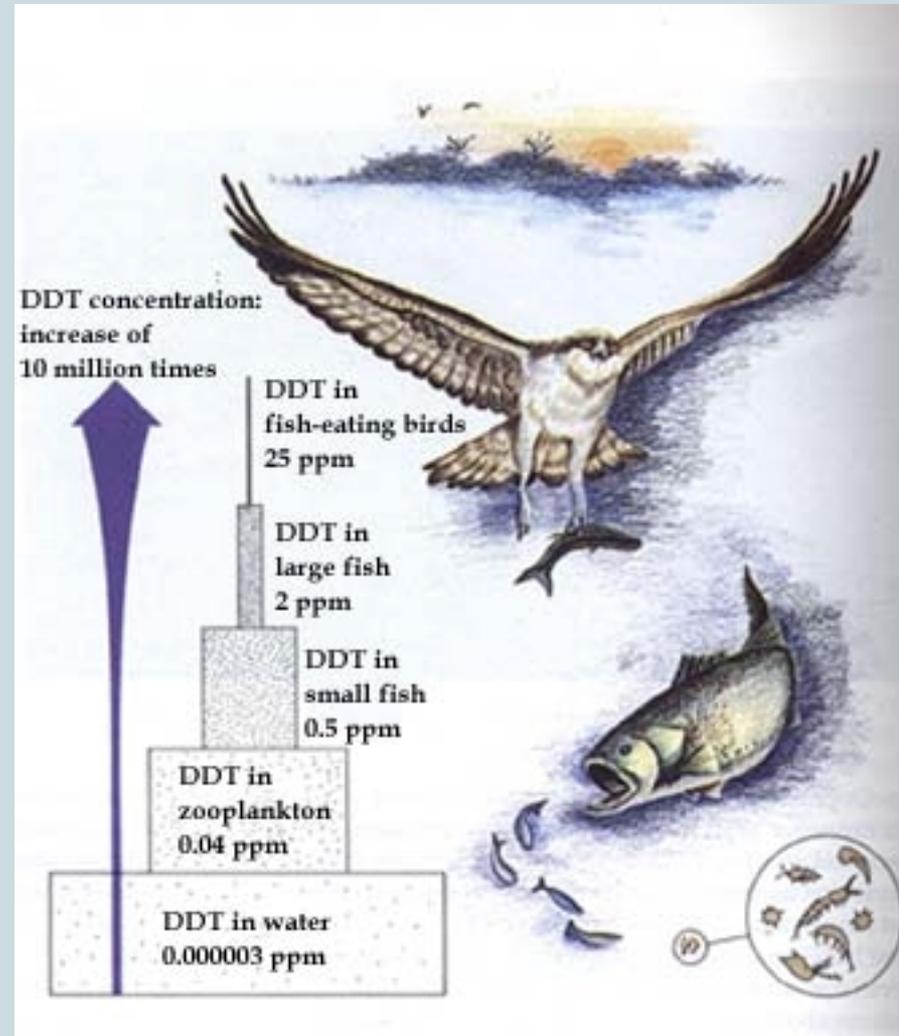


Autre exemple célèbre: le DDT

- Insecticide organochloré le + utilisé et le plus fabriqué au monde
- Utilisé contre les moustiques vecteurs de la malaria
la mouche tsé tsé
les poux, les tics, les puces
- Utilisé durant la Deuxième Guerre mondiale... (Prix Nobel de médecine pour Müller 1948)
- Après la guerre : largement utilisé sur diverses cultures agricoles et pour lutter également contre les vecteurs de maladies (3 millions de tonnes entre 1943-1980)

Bioamplification du DDT à Long Island Sound (USA)

↗ de la concentration
en DDT du plancton
au balbuzard **X 625**



cf. *Rachel Carson*,
Silent spring,
1962.

1 ppm (une partie par million) = 1 mg par litre ou par kilogramme

5 - Caractérisation d'une bioamplification

Démarche scientifique qui permet de mettre en évidence une contamination d'un écosystème, par transfert alimentaire, conduisant à une bioamplification.

Etude de cas : Roche, H., Vollaire, Y., Persic, A., Buet, A., Oliveira-Ribeiro, C., Coulet, E., Banas, D., Ramade, F. 2009. Organochlorines in the [Vaccarès Lagoon trophic Web](#) (Biosphere Reserve of Camargue, France). *Environmental Pollution*,, 157, 2493-2506.

Un cas particulier : **bioamplification des POPs** dans un écosystème aquatique protégé : l'étang de Vaccarès (Camargue)

- Zone humide protégée
- Réserve nationale française depuis 1927
- Réserve Intégrale : *Conservation de la biodiversité & Recherche scientifique*
- Ressources halieutiques contrôlées
- Haute valeur patrimoniale....





← Nîmes

St. Gilles

ARLES

La Vallée des Baux

Saint-Martin-de-Crau

Aix →

La Grande Camargue

La Petite Camargue

le petit Rhône

Rives-Mortes

Plan du Bourg

La Crau

Etang du Vaccarès

Tour du Valat

Le Sambuc

Le Grand Rhône

Marseille →

Port Camargue

Zone Industrielle de Fos

Les Saintes-Maries-de-la-Mer

Salin de Giraud

Port-Saint-Louis-du-Rhône

Mer Méditerranée



Photos Patrick Lelong, Astrid Buet, Hélène Roche, François Ramade

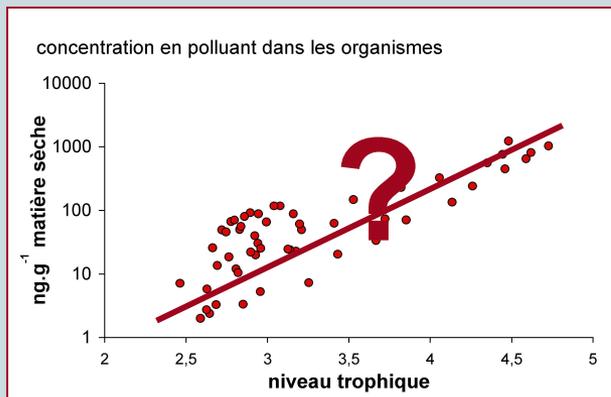
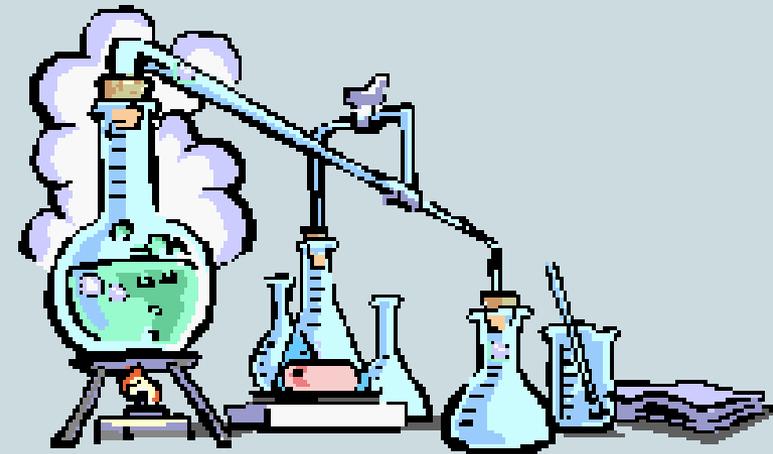


Protocole mis en œuvre



1- **Description** des maillons d'un réseau trophique aquatique (niveau trophique chiffré) (méthode des isotopes stables)

2 - **Mesure** de la concentration en POPs dans les maillons de ce réseau trophique



3 - y-a t'il une **relation** entre la concentration en POPs et le niveau trophique des organismes ?

...bioamplification...

Quelques représentants des réseaux trophiques concernés



Cerastoderma glaucum



Siriella armata



Gammarus salinus



Crangon crangon



Sphaeroma hookeri



Paleomonetes varians



Syngnathus acus



Muge sp.



Gobius sp.



Atherina boyeri



Gasterostrus aculateus



Stizosteidon lucioperca



Lepomis gibbosus

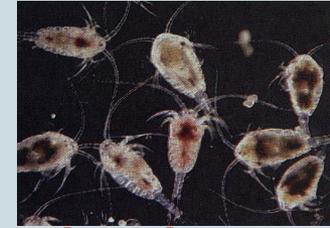


Anguilla anguilla

...bioamplification...

Leurs guildes trophiques:

Zooplancton - consommateurs primaires
phytoplanctonophages



Copépodes

Invertébrés benthiques - consommateurs primaires
dépositivores



Cardium

Invertébrés pélagiques - consommateurs secondaires
zooplanctonophages



Crevette

Poissons herbivores - consommateurs primaires



Muge

Poissons prédateurs
- consommateurs secondaires



Epinoche

Poissons ichtyophages
superprédateurs
- consommateurs tertiaires

Anguille

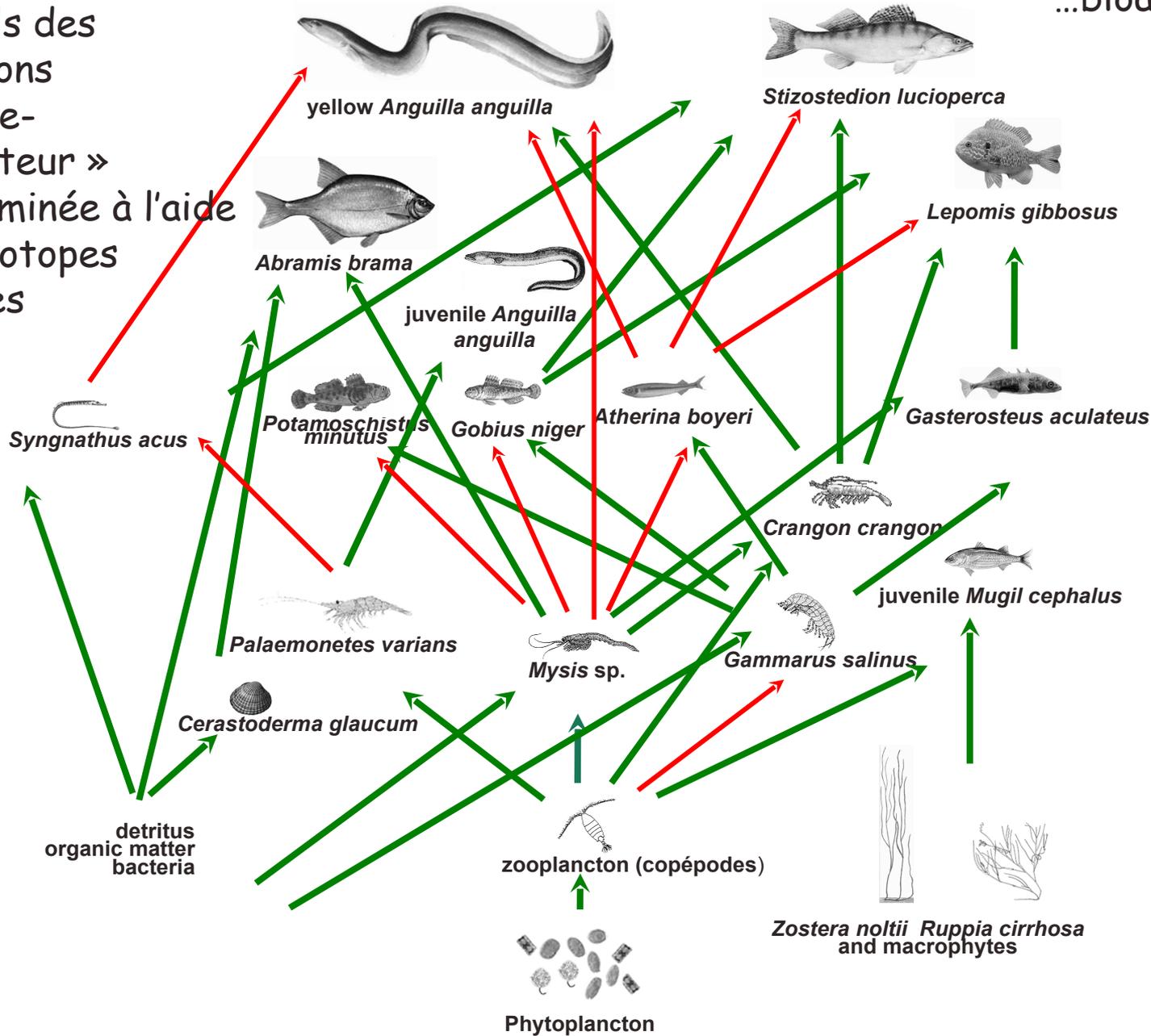


...bioamplification...

Compartiments trophiques

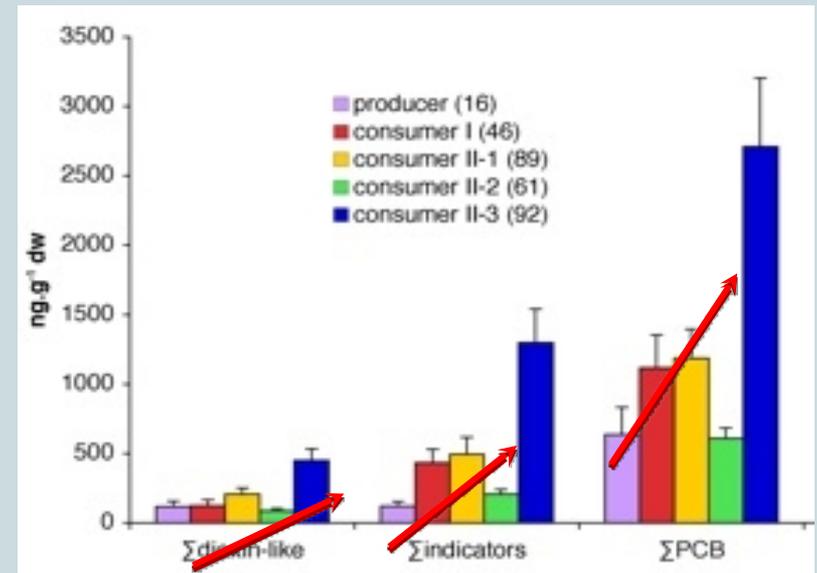
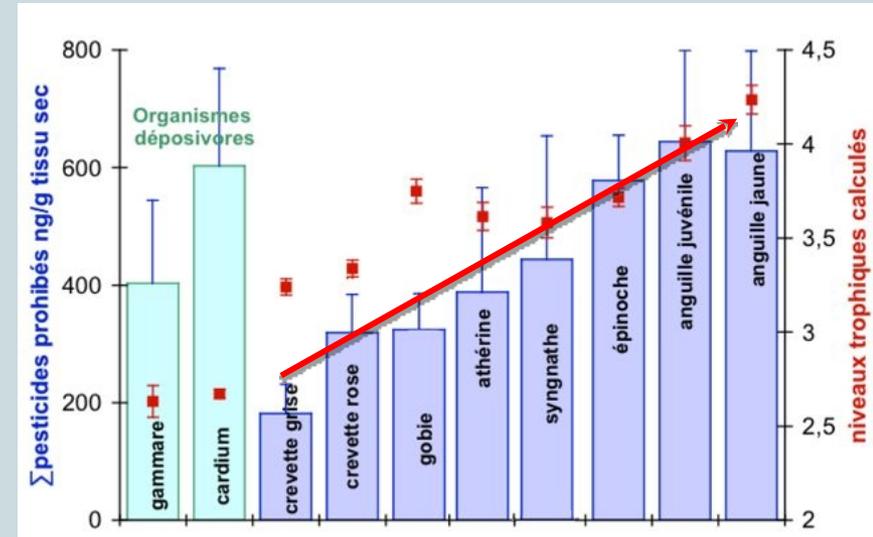
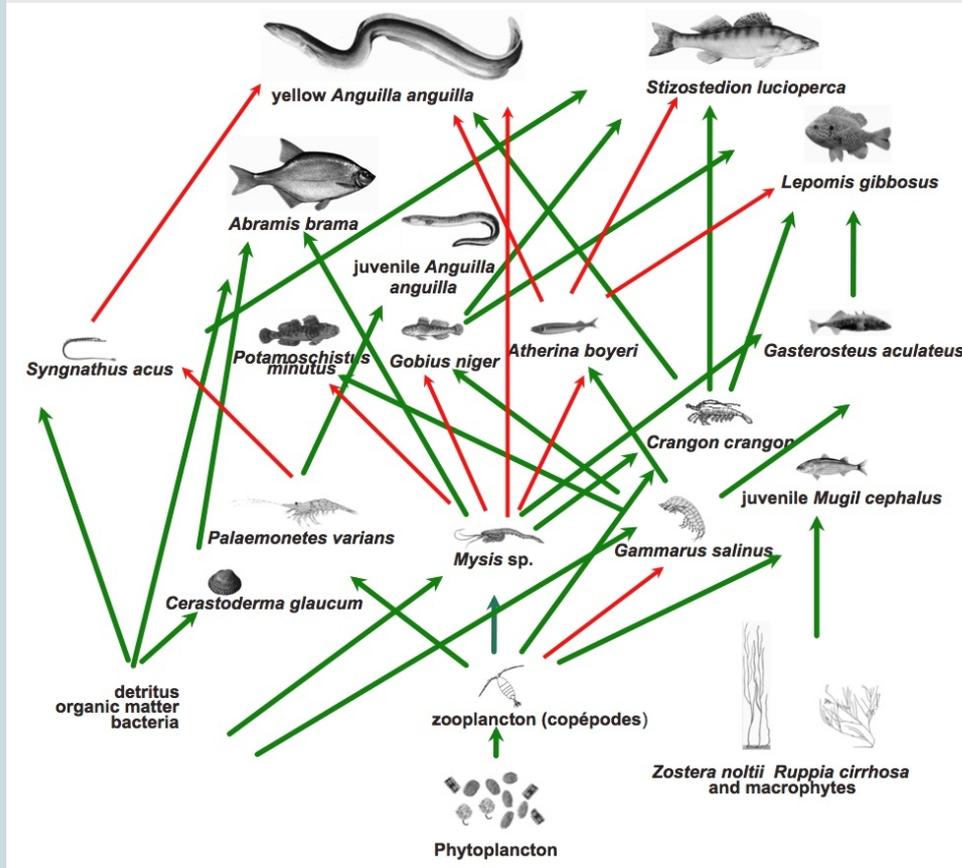
Tertiary consumers
Secondary consumers
Primary consumers
Producers

Détails des relations « proie-prédateur » déterminée à l'aide des isotopes stables



Relations alimentaires connues et vérifiées ou révélées par la méthodologie isotopique

Bioamplification des polluants



Les pesticides et les PCB ont été dosés dans tous les compartiments trophiques. La concentration augmente avec le niveau trophique, excepté chez les organismes déposivores.

6 - Quelques questions et quelques chiffres

Après un tel **constat**, plusieurs questions se posent :

- ✓ Comment **remédier** à ces contaminations?
- ✓ Sont-elles "**universelles**" ?

Si oui

- ✓ quels sont les **risques** pour l'écosphère???

L'ensemble de la biosphère est contaminé par les POP, soit par apport direct, soit par transport atmosphérique .

Que se passe t'il dans les écosystèmes non **directement impactés** ?

.....comme dans les zones polaires et **subpolaires** de l'hémisphère sud et dans les lacs de montagne.....

Quelques chiffres sur les pollutions aquatiques globales

- « Plus de 120.000 substances chimiques sont commercialisées dans le monde alors que la plupart n'ont pas fait l'objet d'une évaluation préalable de leur impact potentiel sur l'environnement.
- Environ 80 % des fleuves du monde coulant dans des zones habitées servent surtout à transporter des déchets dans les océans
- Les pluies acides ravagent les habitats d'eaux continentales sur des dizaines de millions de km²
- Près de 2 milliards de personnes ne disposent pas d'eau potable en raison des pollutions microbiologiques et de plus en plus chimiques.....
- Les eaux superficielles et souterraines sont de plus en plus contaminées par des substances chimiques d'origine industrielle et/ou agricoles (on dénombre en France plus de 50 pesticides différents dans certains aquifères...)
- Plus de 60 millions de km² d'océan sont recouverts en permanence d'une fine couche de pétrole. » *François Ramade, 2006*