

université
 PARIS-SACLAY | **FACULTÉ**
DES SCIENCES
D'ORSAY

Le polluant dans l'écosystème

Marc Girondot, Université Paris Saclay
 marc.girondot@universite-paris-saclay.fr

1

L'écologie

- Ecologie : des mots grecs "Oikos", maison / habitat, et "logos", discours / étude
- Ecologie : Science qui étudie les organismes (leur distribution et leur abondance), toutes les interactions qu'ils ont avec leur milieu ainsi que les conséquences de ces interactions.
- Le niveau d'organisation et d'interaction considéré peut être très variable

2

Les différents niveaux d'organisation

The diagram illustrates the hierarchy of biological organization through seven circular images arranged in a descending staircase pattern from top-left to bottom-right. Each image is labeled with its corresponding level of organization:

- Biosphère**: A globe of the Earth.
- Ecosystèmes**: A landscape with a river, trees, and animals.
- Communautés**: A group of different animal species in a savanna.
- Populations**: A group of animals of the same species.
- Individus**: A single animal.

3

Différents niveaux d'organisation

- Cellule
- Organe
- Individu
- Population
- Espèce
- Communauté
- Paysage
- Biosphère
- Ecophysiologie
- Ecologie du comportement
- Dynamique des populations
- Biologie de la conservation
- Ecologie des communautés
- Ecologie du paysage
- Étude de la biodiversité
- Étude des changements globaux

4

Deux approches distinctes...

- **Ecologie fonctionnelle :**
Le fonctionnement de l'organisme ou l'écosystème est le sujet de l'étude. Par fonctionnement on entendra en particulier les flux de matières et d'énergie.
- **Ecologie évolutive :**
Les mécanismes de l'évolution sont utilisés pour comprendre les différences observées entre espèces.

5

...qui reflètent deux définitions du vivant

- Un organisme vivant est une structure qui n'est pas en équilibre thermodynamique avec le milieu
 - Notion fonctionnelle du vivant
- Un organisme vivant se reproduit et évolue
 - Notion évolutive du vivant

6

Eon et Gaïa entourés de quatre enfants, les saisons personnifiées



L'hypothèse Gaïa

- L'hypothèse Gaïa, initialement avancée par l'écologue anglais James Lovelock en 1970, est que la Terre serait « un système physiologique dynamique qui inclut la biosphère et maintient notre planète depuis plus de trois milliards d'années dans un état compatible avec la vie ».



Letchworth, Royaume-Uni 1919 -



7


Écologie scientifique vs. Écologie politique

- L'écologie est une science mais aussi une composante politique.
- Bien que possédant une dénomination commune, ces deux activités sont séparées.
- Des passerelles existent, mais elles se situent au niveau individuel et tous les écologistes scientifiques ne se revendiquent pas écologistes politiques... et l'inverse est aussi vrai.

8

Pourquoi étudier l'écologie?


- Pour comprendre comment les systèmes naturels fonctionnent
- Pour comprendre quel est l'impact des activités humaines sur le fonctionnement des écosystèmes
- Pour permettre de mettre en place des pratiques écologiquement correctes (ex: développement durable)



9

I. Qu'est ce qu'un écosystème?

- **Définition** : Un écosystème est l'ensemble formé par une association d'une communauté d'êtres vivants (ou biocénose) et son environnement géologique, édaphique (sol), hydrologique, climatique, etc. (le biotope).
- Les éléments constituant un écosystème développent un réseau d'échange d'énergie et de matière.
- Le terme fut forgé par Arthur George Tansley en 1935 pour désigner l'unité de base de la nature.



Arthur George Tansley 1871-1955

10

I. Qu'est ce qu'une communauté écologique?

- **Définition** : L'ensemble de populations animales, végétales et les microorganismes qui vivent dans une aire donnée, à un moment donné, et qui interagissent.
- Les plantes, les animaux et les microorganismes d'une communauté sont liés par des relations alimentaires et par d'autres types d'interactions
- La communauté écologique constitue la biocénose c'est à dire la partie vivante (biotique) d'un écosystème.



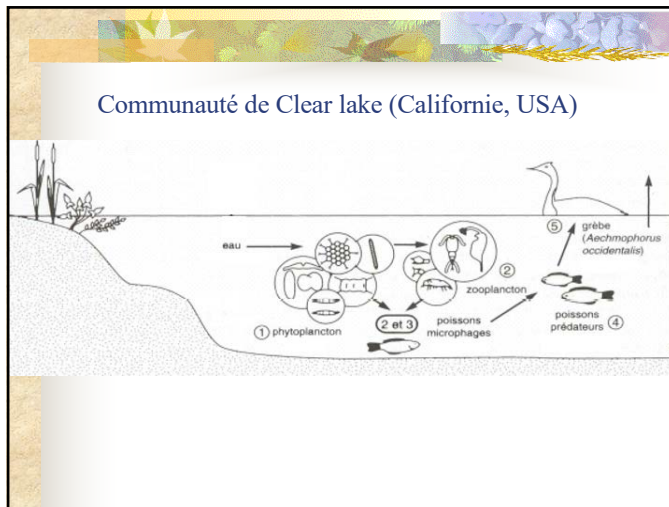
11

Clear lake (Californie, USA)

- Clear Lake est le plus grand lac naturel entièrement situé en Californie, et le dixième de l'État en termes de capacité.



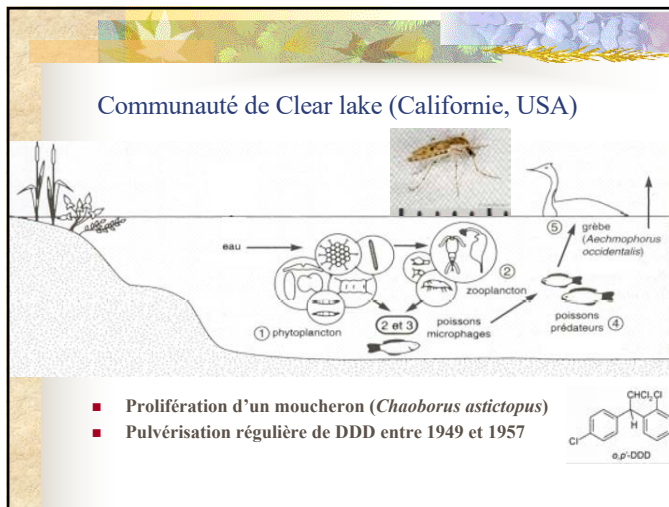
12



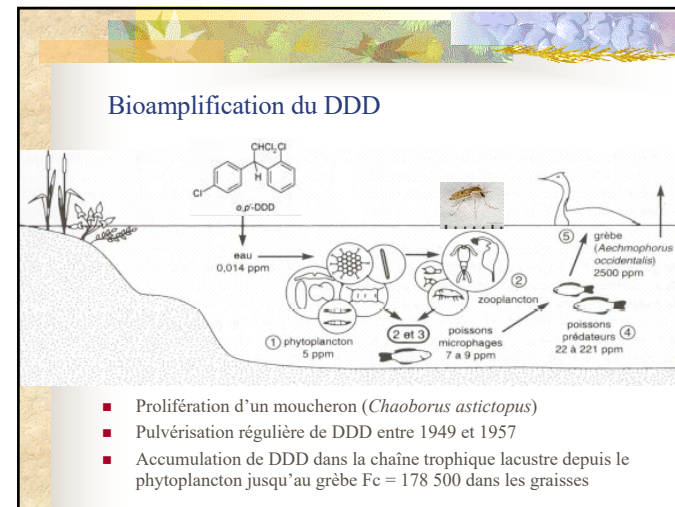
13



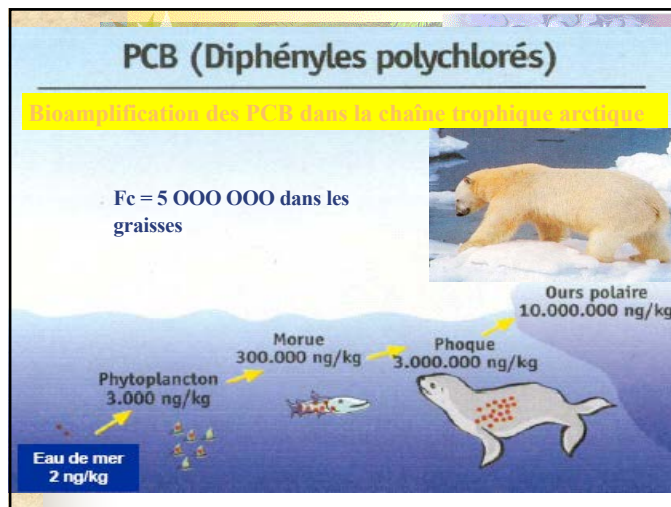
14



15



16



17

Bioaccumulation

- La bioaccumulation désigne la capacité de certains organismes (végétaux, animaux, fongiques, microbiens) à absorber et concentrer dans tout ou une partie de leur organisme (partie vivante ou inerte telle que l'écorce ou le bois de l'arbre, la coquille de la moule, la corne, etc.) certaines substances chimiques, éventuellement rares dans l'environnement (oligoéléments utiles ou indispensables, ou toxiques indésirables).

18

Bioconcentration

- La bioconcentration désigne le phénomène qui, pour une substance donnée (oligoélément, polluant, radioisotope, etc.), va engendrer des concentrations dans les êtres vivants supérieures aux concentrations présentes dans le milieu.
- Il y a bioconcentration quand pour un organisme ou une population associée à un milieu (biocénose), l'absorption et rétention de contaminants prélevés dans le milieu est supérieure à l'élimination naturelle... avec dilution dans le milieu ou adsorption sur le substrat minéral ou organique non-vivant (tourbe, charbon.)

19

Bioamplification ou biomagnification

- La biomagnification (ou bioamplification) décrit le processus par lequel les taux de certaines substances croissent à chaque stade du réseau trophique (chaîne alimentaire).
- Cette notion entre dans le cadre plus global de la bioconcentration, terme recouvrant les phénomènes amenant une matrice biologique (biocénose) à être plus contaminée que son environnement (biotope).

20

Facteur de concentration

- Rapport de concentration d'un polluant dans un organisme à sa concentration dans le biotope:
- $F_c = \frac{[\text{substance}]_{\text{organisme}}}{[\text{substance}]_{\text{medium}}}$

21

Facteur de transfert

- Rapport de concentration d'un polluant dans un organisme à sa concentration dans le niveau trophique inférieur (>1 lors de bioamplification)
- $F_t = \frac{[\text{substance}]_{\text{organisme}}}{[\text{substance}]_{\text{niveau trophique inférieur}}}$
- On peut calculer un facteur de transfert entre des niveaux éloignés, voire avec le biotope. Dans ce cas, le facteur de transfert devient le facteur de concentration.

22

II. Les interactions dans une communauté

Types d'interaction	Signes	Effets de l'interaction
Compétition	- / -	Les deux espèces souffrent de interaction
Prédation	+ / -	Une espèce bénéficie de l'interaction, l'autre en souffre
Mutualisme	+ / +	Les deux espèces bénéficient de l'interaction
Commensalisme	+ / 0	Une espèce bénéficie, l'autre n'est pas affectée
Amensalisme	0 / -	Impact négatif sur une espèce, l'autre n'est pas affectée

Auxquels on peut ajouter le neutralisme.

23

II. Les interactions dans une communauté

Types d'interaction	Signes	Effets de l'interaction
Compétition	- / -	Les deux espèces souffrent de interaction
Prédation	+ / -	Une espèce bénéficie de l'interaction, l'autre en souffre
Mutualisme	+ / +	Les deux espèces bénéficient de l'interaction
Commensalisme	+ / 0	Une espèce bénéficie, l'autre n'est pas affectée
Amensalisme	0 / -	Impact négatif sur une espèce, l'autre n'est pas affectée

Auxquels on peut ajouter le neutralisme.

24

La prédation au sens large

- **Prédation** : un animal en tue un autre et le mange
- Parasitisme
- Herbivorie
- Parasitoïdes
- Pathogènes



25

La prédation au sens large

- Prédation
- **Parasitisme** : Le parasitisme est une relation dans laquelle le parasite tire profit de l'hôte, en vivant soit à l'intérieur de l'hôte (endoparasite), soit à l'extérieur de l'hôte (ectoparasite)
- Herbivorie
- Parasitoïdes
- Pathogènes




Moustiques : ectoparasites

Ver solitaire : endoparasite

26

La prédation au sens large


- Prédation
- Parasitisme
- **Herbivorie** : un animal consomme une plante
 - Peut ressembler à de la prédation : la plante entière est consommée
 - Ou à du parasitisme : une partie de la plante est consommée
- Parasitoïdes
- Pathogènes



27

La prédation au sens large

- Prédation
- Parasitisme
- Herbivorie
- **Parasitoïdes** : Un parasitoïde est un organisme qui se développe sur ou à l'intérieur d'un autre organisme dit « hôte » et qui tue inévitablement ce dernier au cours, ou à la fin, de ce développement alors que de nombreux parasites ne tuent pas leur hôte.
- Pathogènes



28

La prédation au sens large

- Prédation
- Parasitisme
- Herbivorie
- Parasitoïdes :
- **Pathogènes** : organismes microscopiques qui provoquent des maladies

Fusarium culmorum F. graminearum (see blight)

Soil borne cereal mosaic virus (SBCMV) Polymyxa

Mycosphaerella graminicola (SIR, leaf blotch)

Oculimacula yellows (eyespot)

Pathogènes du blé

29

L'ÉCOLOGIE DES COMMUNAUTÉS

a) Adaptations des prédateurs

Tortue alligator

Guépards

30

b) Défenses des Végétaux

Défenses chimiques

Morphine (Pavot)
Nicotine (Tabac)
Mescaline (Cactus Peyotl)

Défenses mécaniques

Épines
Crochets
Piquants

31

c) Défenses des Animaux

Défenses chimiques

Substance odorante
Acide

Défenses mécaniques

Carapace
Piquants
Dards

32

II. Relations à plus de deux partenaires

- **Les producteurs** (les végétaux chlorophylliens)
- **Les consommateurs** (les animaux)
 - les herbivores = **consommateurs primaires**
 - les carnivores primaires qui se nourrissent des herbivores = **consommateurs secondaires**
 - les carnivores secondaires qui se nourrissent des carnivores primaires = **consommateurs tertiaires**
- **Les décomposeurs** (animaux détritivores, bactéries et champignons)

La chaîne alimentaire

33

La chaîne alimentaire

- Chaque maillon de la chaîne alimentaire est appelé un **niveau trophique**
- Les producteurs constituent le premier niveau trophique
- Les herbivores le second, etc...

A terrestrial food chain A marine food chain
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

34

Les producteurs des chaînes alimentaires

Milieu	Source d'énergie	Type de chaîne alimentaire	Producteurs
Terrestre	Énergie lumineuse	Chaîne photosynthétique	Végétaux
Aquatique	Énergie lumineuse	Chaîne photosynthétique	Cyanobactéries, petites algues du plancton, grandes algues, végétaux aquatiques
Abyssal	Énergie tirée de l'oxydation du H ₂ S (sulfure d'hydrogène) et du CH ₄ (méthane)	Chaîne chimiosynthétique	Bactéries hébergées par les vers tubicoles des cheminées chaudes et par les moules des suintements froids

35

Des producteurs !

- Les végétaux terrestres
- Les grandes algues
- Des laminaires
- Les végétaux aquatiques
- Des lentilles d'eau

36

Encore des producteurs !

Les algues microscopiques du phytoplancton ou plancton végétal

Algues vertes



Diatomés



Volvox

37

Toujours des producteurs !

Les cyanobactéries «algues bleu vert» du plancton végétal *(sont minuscules par rapport aux algues vertes du plancton car ce sont des procarvotes)*



Bactéries hébergées par les vers tubicoles et par des moules : au fond des océans, là où il fait très noir.

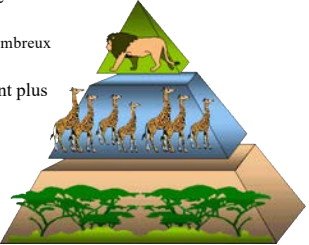


Moules
Vers tubicoles

38

La chaîne alimentaire

- A chaque niveau trophique, seule 10 % de l'énergie disponible est transférée
- En général, dans une communauté, le nombre et la biomasse des espèces diminuent quand le niveau trophique augmente
 - Ex : Les carnivores sont moins nombreux que les herbivores
- Une communauté comprend rarement plus de 4 à 5 niveaux trophiques



39

Le réseau trophique

- La plupart des espèces appartiennent à plusieurs chaînes alimentaires
- L'ensemble de ces chaînes alimentaires forme le réseau trophique
- Certaines espèces peuvent se trouver à plusieurs niveaux trophiques



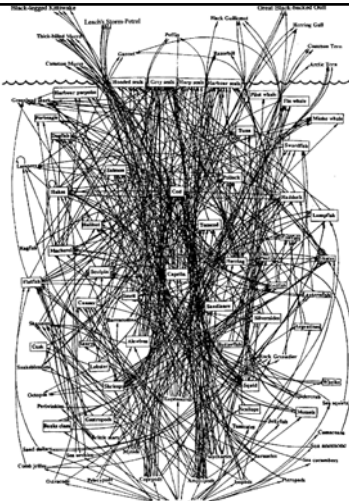
Réseau trophique dans un écosystème forestier français

40

Le réseau trophique

- La plupart des espèces appartiennent à plusieurs chaînes alimentaires
- L'ensemble de ces chaînes alimentaires forme le réseau trophique
- Certaines espèces peuvent se trouver à plusieurs niveaux trophiques
- Représenter l'ensemble d'un réseau trophique est souvent impossible.

Réseau trophique simplifié dans l'Atlantique-Nord



41

COMMENT ÉTABLIR LA STRUCTURE DU RÉSEAU TROPHIQUE ?

42

Méthodes

- Observation directe de la prédation
- Contenu stomacal
- Analyse des fécès
- Pelote de réjection
- e-DNA
- Isotopes stables

Askarizadeh, D., Heshmati, G.A., Pessarakli, M. & Jouri, M.H. (2011) Survey of evaluation techniques for studying rangeland grass species nutritional values. *Journal of Plant Nutrition*, 34, 2172-2182.


43

OBSERVATION DE LA PRÉDATION

44

Observation de la prédation

- Méthode qui peut sembler au premier abord la plus simple:



45

Observation de la prédation

- Mais comment quantifier ce qui est prélevé ?
- Comment être sûr de ne rien rater, de nuit par exemple ?

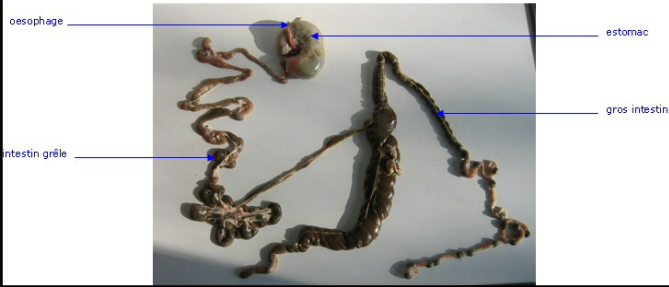
46

CONTENU STOMACAL

47

Dissection pour obtenir le contenu stomacal

- Dissection d'un lapin



oesophage

estomac

gros intestin

intestin grêle

48



49



50

Analyse du contenu stomacal de tortues de Floride

Table 1. Items found in the stomach of Slider turtles captured in Seine-Saint-Denis department (North of Paris). Crosses indicate presence of item. Sex: M=Male, F=Female; Origin: L.C. = "La Courneuve", S = "Stassart"; C=Cyprinidae, P=Percomorphidae; Other: Pl=Plastic, S=Stone, Pa=Paper.

Sex	Origin	Carapace length (mm)	Plants				Invertebrates		Fishes	Others
			Unknown	Amaranthaceae	Cyperaceae	Poaceae	Insects	Crustaceans		
F	L.C.	111.0	+				+		C	
F	L.C.	133.8	+				+		C	
F	L.C.	138.2	+				+		PL, S, Pa	
F	L.C.	141.4	+				+			
F	L.C.	143.8	+			+				
F	L.C.	148.8	+				+		S	
F	L.C.	160.3	+				+		PI	
F	L.C.	162.3	+				+			
F	L.C.	162.4	+						Fishbone	
F	L.C.	172.9	+						C	
F	L.C.	174.0	+				+		PL, S	
F	L.C.	190.4	+						P, C	
F	L.C.	203.3	+						P, C	
F	S	127.3	+				+	+	PL, Pa	
F	S	210.8	+						C	
M	L.C.	147.2	+							
M	L.C.	162.3	+				+			
M	L.C.	178.1	+				+		C	
M	L.C.	200.6	+							
M	S	164.4	+	+	+		+	+	P, C	
M	S	170.0	+		+				PI	
M	S	195.0	+				+			

Prévot-Julliard, A.-C., Gousset, E., Archinard, C., Cadi, A. & Girondot, M. (2007) Pets and invasion risks: is Slider turtle strictly carnivorous? *Amphibia-Reptilia*, **28**, 139-143.

51



52

Vidange stomacale

- Peut être fait chez les tortues marines, par exemple.
 - Cette méthode est maintenant très peu utilisée en ce qu'elle provoque une souffrance chez l'animal.



53

FÉCÈS

54

Analyse des fécès



- Les fécès recueillent ce qui ne peut être digéré par l'animal. L'état de conservation est souvent moins bon que ce qui peut être trouvé dans un contenu stomacal.

55

Analyse des fécès

- Biais de digestibilité

56

Toujours bien de se rappeler...

- Il est difficile de déterminer qu'un estimateur n'est pas précis ou biaisé car cela implique de connaître la vraie valeur;
- Il y a souvent un compromis entre précision et biais. On ne sait pas forcément ce qui devrait être privilégié: estimateur précis ou non biaisé?

57

PELOTES DE RÉJECTION

58

Analyse des pelotes de réjection

- Les pelotes de réjection ou boulettes de régurgitation sont des boules rejetées par les oiseaux rapaces comme la chouette effraie ainsi que les corvidés, les laridés et beaucoup d'autres oiseaux (limicoles, etc.). Elles contiennent les éléments durs et non digérés des proies qu'ils avalent en entier, comme les poils, les os, les coquilles d'œuf, ou même les arêtes des poissons ingérées en ce qui concerne les Martins-pêcheurs. Elles sont rejetées par le bec environ 2 heures après ingestion des proies.

Pelote de réjection

L'effraie des clochers (*Tyto alba*) est une chouette, aussi couramment appelée chouette effraie.

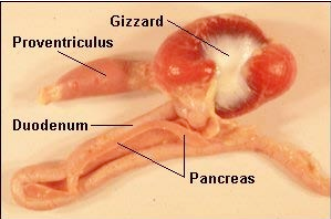
59

Le système digestif

60

Le gésier (gizzard en anglais)

Différenciation glandulaire de l'œsophage permettant une mastication grâce à la présence de pierres stockées par l'animal. Compense l'absence de dents.




The diagram shows a cross-section of a bird's digestive tract. Labels include: Gizzard (the muscular, red, sac-like organ), Proventriculus (the glandular part of the stomach), Duodenum (the first part of the small intestine), and Pancreas (the glandular organ below the duodenum).

61

Le gésier

Exemple de contenu de gésier chez un canard: présence de plomb de pêche en plus de gastrolithes !



The photograph shows the interior of a duck's gizzard, which is a muscular organ used for grinding food. It contains several dark, irregularly shaped objects, which are identified as fishing lead and gastrolithes (stones used for grinding).

62

Analyse d'une pelote de rejection



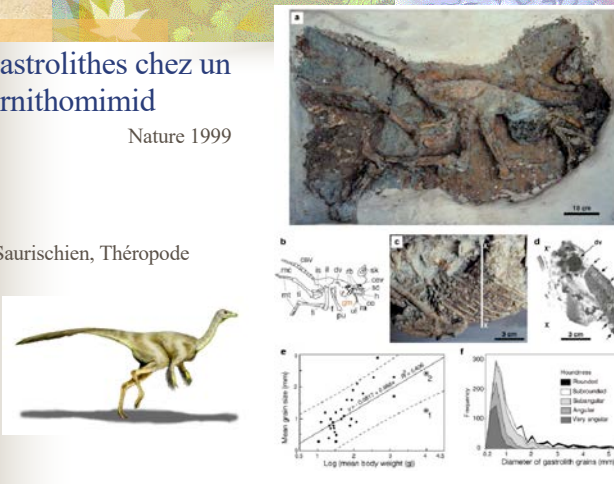
The photograph shows a dark, irregularly shaped fecal pellet. Below it is a scale bar. To the right of the pellet are several small, light-colored objects, which are likely gastrolithes or other ingested particles.

63

Gastrolithes chez un Ornithomimid

Nature 1999

Saurischien, Théropode



The composite image includes: a 3D reconstruction of an Ornithomimid dinosaur; a photograph of the dinosaur's gizzard; a diagram of the gizzard's internal structure; a photograph of a gastrolith; a graph showing the relationship between log(mean body weight) and mean grain size; and a histogram showing the frequency distribution of gastrolith diameters.

64

LES ISOTOPES STABLES

65

Autre méthode: les isotopes stables chez les animaux

- Les atomes dans la matière sont présents sous la forme de plusieurs isotopes différents par la quantité de neutrons:
ex ^{12}C (6 neutrons, 6 protons), ^{13}C et ^{14}C
- Certains de ces isotopes sont instables, ex. ^{14}C , d'autres sont stables, ex. ^{12}C et ^{13}C ou ^{14}N et ^{15}N ou ^{16}O et ^{18}O

• *La richesse relative en ^{12}C et ^{13}C ou ^{14}N et ^{15}N ou ^{16}O et ^{18}O dépend de façon complexe de l'origine du tissu en question.*

66

Ratio isotopique

- On représente classiquement le contenu isotopique d'un atome X d'un échantillon sous la forme d'un ratio isotopique δX :

$$\delta X = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 10^3$$

- R représente le rapport de l'isotope d'intérêt (^{13}C ou ^{15}N) et de sa forme la plus commune (par exemple, $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ ou $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$).
- Des valeurs δ plus élevées (ou moins négatives) indiquent des augmentations de l'isotope d'intérêt (^{13}C ou ^{15}N) d'un échantillon et des valeurs inférieures (ou plus négatives) indiquent des diminutions.

67

Signification du $\delta^{15}\text{N}$

- L'abondance en ^{15}N d'un organisme par rapport au ^{14}N augmente de 3 à 5 ‰ par rapport à sa nourriture.
 - \Rightarrow Reconstitution d'un réseau trophique

68

Pourquoi ?

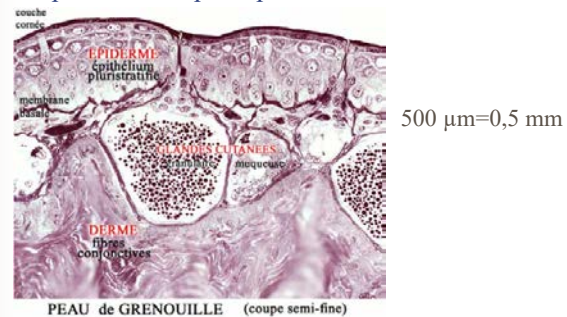
- Les amines légères (contenant du ^{14}N) sont excrétées préférentiellement lors des déaminations et transaminations des acides aminés.
 - L'azote excrété dans l'ammoniaque, l'urée et l'acide urique est donc plus léger que l'azote de l'organisme dont il provient et donc aussi des proies.
- En conséquence, les protéines des prédateurs ont un ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ plus élevé que celles de leurs proies
- Donc, comme l'azote des prédateurs est plus lourd que celui de sa proie, plus un organisme est haut dans une chaîne trophique plus sa valeur $\delta^{15}\text{N}$ est forte.

69

E-DNA

70

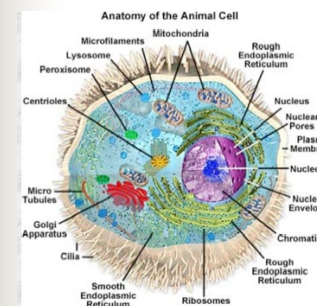
Exemple d'une coupe de peau



L'unité de base de construction de l'organisme est la cellule. Elles peuvent être jointives ou bien localisées dans une matrice extracellulaire.

71

Structure d'une cellule



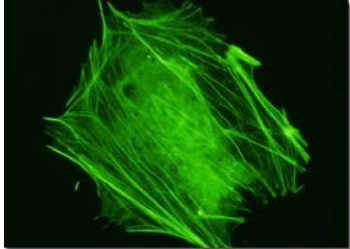
Les différents organites sont constitués de:

- lipides: les membranes
- protéines
- de structure
- enzymes

72

Exemple d'une protéine de structure

- L'actine est une protéine servant de "squelette" à la cellule. L'actine est visualisée ici en vert.



73

Exemple d'une protéine ayant une activité enzymatique

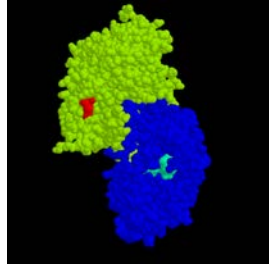
- L'alcool déshydrogénase

Chez l'homme, cette enzyme est contenue dans l'estomac et dans le foie. Elle catalyse l'oxydation de l'éthanol en acétaldéhyde:

$$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO} + \text{NADH} + \text{H}^+$$

Un certain nombre de personnes asiatiques possèdent une déficience de cette enzyme; ils ne dégradent que très lentement l'éthanol...

La même enzyme peut catalyser l'oxydation du méthanol en formaldéhyde, produit extrêmement toxique.

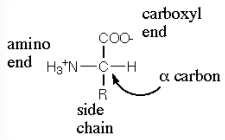


74

Structure d'une protéine

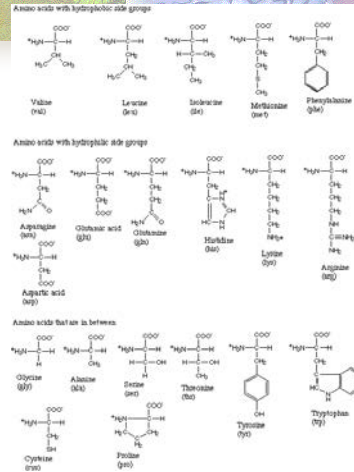
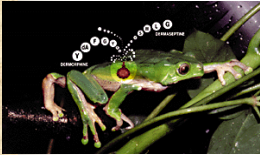
- Les protéines sont constituées d'une chaîne d'acides aminés. La longueur de la chaîne va d'une dizaine d'acides aminés à plus de 1000.
- Il y a seulement 20 acides aminés différents disponibles... ce qui fait une combinatoire énorme

Structure générique des acides aminés
Seul "R" change entre les 20 acides aminés.



75

Les acides aminés

76

La structure primaire d'une protéine

C'est simplement la suite des acides aminés.

77

De la structure primaire découle la structure secondaire

- Une suite d'acides aminés peut s'organiser soit en hélice (dite alpha) soit en feuillet (dit bêta).

78

De la structure secondaire découle la structure tertiaire

- Les hélices et les feuillets s'organisent dans l'espace pour former la structure tertiaire.

Viral coat and capsid proteins

Annexin V

Ce sera la structure fonctionnelle de la plupart des protéines.

79

80

En résumé

- Une protéine est une suite d'acides aminés qui prend une conformation dans l'espace lui permettant d'avoir une activité chimique.
- Une protéine ayant la même fonction chez deux espèces n'aura pas exactement la même structure primaire mais aura en général la même structure secondaire et tertiaire.

81

D'où provient l'information de la structure primaire des protéines ?

- L'information est localisée dans les gènes, eux-mêmes situés sur les chromosomes.

82

Les gènes

- Un gène est un fragment de chromosome codant une protéine
- Les gènes sont séparés par des séquences intergéniques qui composent 99% des chromosomes.

83

Fabrication d'une protéine

84

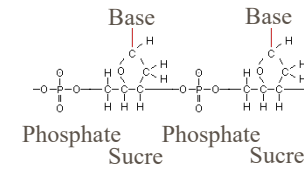
En résumé

- L'information sur la structure primaire des protéines est contenue dans les gènes.
- La molécule qui constitue les chromosomes est l'Acide Désoxyribo-Nucléique (ADN).

85

L'ADN

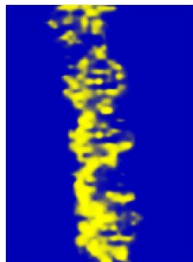
L'information génétique est présente sous la forme d'une chaîne de phosphate et sucre sur lequel sont attachés des bases A, T, G ou C.



86

La double-hélice

La double-hélice correspond à la présence de deux brins par molécule.

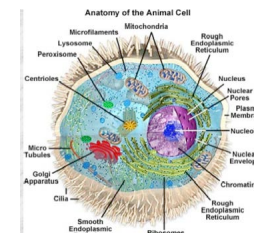


87

Localisation des chromosomes

- Les chromosomes sont localisés dans le noyau des cellules eucaryotes. Toutes les cellules ont un noyau.

Toutes les cellules d'un organisme possèdent le même contenu en ADN grâce au mécanisme de réplication précédant la division cellulaire.



88

La réplication de l'ADN

- La division cellulaire est précédée de la réplication de l'ADN. Chaque molécule d'ADN est dupliquée durant la phase de synthèse.



89

La division cellulaire = mitose

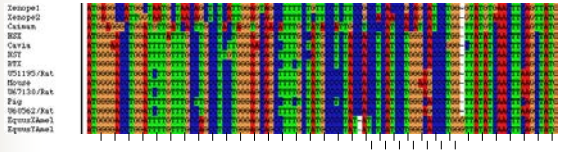


Une cellule -> 2 cellules identiques

90

La contamination de l'environnement par l'ADN


- Chaque cellule d'organisme vivant possède de l'ADN
- Les molécules d'ADN présentes dans les différents organismes sont uniques



91

La contamination de l'environnement par l'ADN

- Les organismes vivants perdent régulièrement des cellules, par exemple par desquamation ou lors des mues.
- Ces cellules meurent et se dégradent lentement.
- L'ADN qui est présent dans ces cellules va être présent dans l'environnement pendant un certain temps, de quelques heures à quelques centaines de milliers d'années.
- La présence de cet ADN dans l'environnement est appelée e-DNA. Il est le marqueur des espèces vivantes ou ayant vécu dans cet environnement.



92

Méthode de détection de l'e-DNA

- L'ADN de l'environnement est détecté par une technique appelé PCR pour Réaction de Polymérisation en Chaîne

93



www.dnalc.org

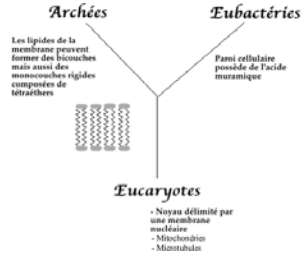
94

Amplification de tout le e-DNA

- Pour cela on utilise des amorces (primers) dites-universelles c'est-à-dire qu'elles vont reconnaître l'ADN de quasiment tous les organismes vivant:
 - On pourra utiliser par exemple des amorces d'ADN ribosomique
 - C'est rendu possible car il y a eu un LUCA !

95

Le monde vivant *Qu'est-ce que le vivant ?*

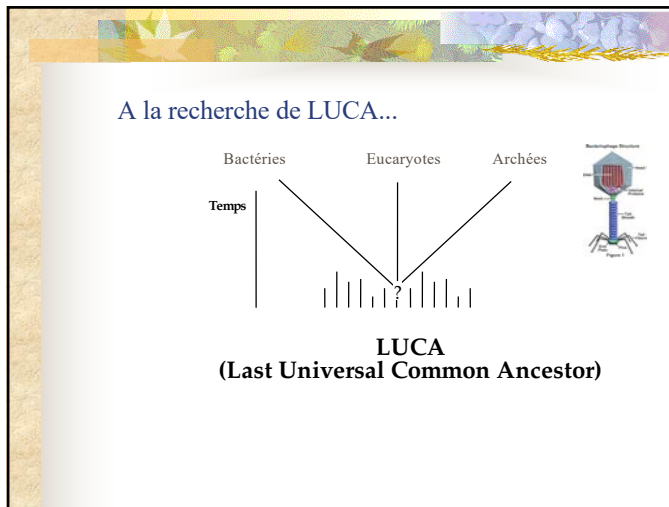


Archées
Les lipides de la membrane peuvent former des bicouches mais aussi des mosaïques rigides composées de tétraéthères

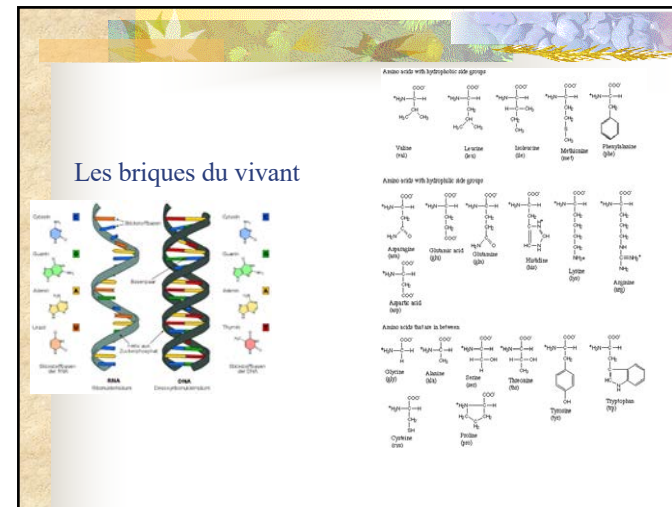
Eubactéries
Paroi cellulaire possédée de l'acide muramique

Eucaryotes
- Noyau délimité par une membrane nucléaire
- Mitochondries
- Microtubules

96



97



98

Y-a-t'il eu un LUCA ?

- La quasi-universalité du code génétique est un bon argument pour prouver l'existence de LUCA (vers -3,8 GA ?)

Le code génétique

		deuxième base				troisième base
		U	C	A	G	
première base	U	UUU Phe UUC Phe UUA Leu UUG Leu	UCU Ser UCC Ser UCA Ser UCG Ser	UAU Tyr UAC Tyr UAA Stop UAG Stop	UGU Cys UGC Cys UGA Stop UGG Trp	AUG Met AUA Ile AUC Ile AUU Ile
	C	CUU Leu CUC Leu CUA Leu CUG Leu	CCU Pro CCC Pro CCA Pro CCG Pro	CAU His CAC His CAA Gln CAG Gln	CGU Arg CGC Arg CGA Arg CGG Arg	
	A	AUU Ile AUC Ile AUA Ile AUG Met	ACU Thr ACC Thr ACA Thr ACG Thr	AAU Asn AAC Asn AAA Lys AAG Lys	AGU Ser AGC Ser AGA Ser AGG Ser	
	G	GUU Val GUC Val GUA Val GUG Val	GCU Ala GCC Ala GCA Ala GCG Ala	GAU Asp GAC Asp GAA Glu GAG Glu	GGU Gly GGC Gly GGA Gly GGG Gly	

99

- ### Amplification de tout le e-DNA
- Pour cela on utilise des amorces (primers) dites-universelles c'est-à-dire qu'elles vont reconnaître l'ADN de quasiment tous les organismes vivant:
 - On pourra utiliser par exemple des amorces d'ADN ribosomique
 - C'est rendu possible car il y a eu un LUCA !
 - En analysant les fragments obtenus après PCR, on aura une information sur l'ensemble des espèces présentes dans le milieu.
 - La quantification des différentes espèces présentes est possible mais une marge d'erreur importante est à prévoir.

100

Amplification d'un e-DNA spécifique

- Pour cela on utilise des amorces (primers) spécifique à une espèce
- Dans ce cas, la réponse sera de type présence/absence
- On peut dénombrer les faux positifs ou négatifs par rapport à une connaissance préalable de la composition du milieu

101

RELATION NIVEAU TROPHIQUE ET CONCENTRATION

102

Pyramide des concentrations dans les réseaux trophiques

IV
III
II
I

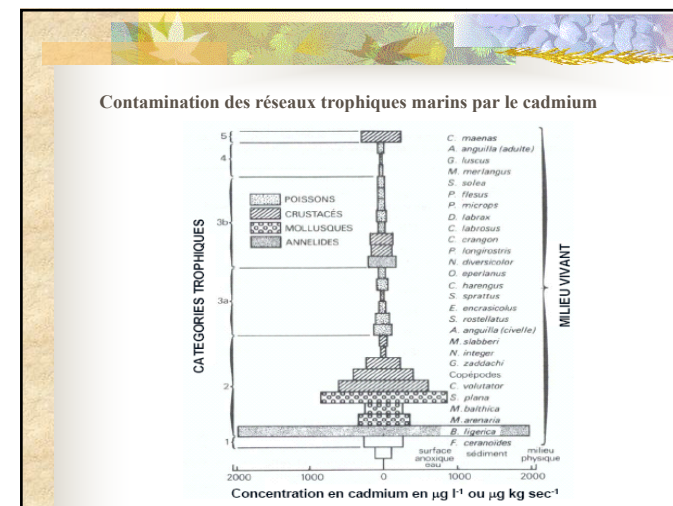
Pyramide des biomasses

Pyramide des concentrations
 $F > 1$
bioamplification

Pyramide des concentrations
 $F = 1$
simple transfert

Pyramide des concentrations
 $F < 1$
diminution

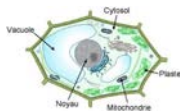
103



104

Séquestration - élimination

- Animaux
 - Séquestration : tissus adipeux, dents, cheveux, ongles, cornes, etc..
 - Élimination : urines, fécès, transpiration, poumons, lait.
- Plantes : notion de « Green liver »
 - Séquestration : vacuoles, lignine
 - Élimination : transpiration



105

ETABLIR LA QUALITÉ D'UN ÉCOSYSTÈME

106

L'approche chimique: Détection des polluants et quantifications

- Utilisation de techniques analytiques : HPLC, GC, MS, ELISA, etc...

Avantages

- Nombre réduit d'échantillons
- Différentes matrices

Inconvénients

- Aucune technique ne peut doser tous les polluants à la fois.
- Problème de seuil de détection.
- Certains produits sont dégradés ou transformés : modification de la disponibilité et de l'effet des molécules.
- Ne prend pas en compte l'interaction entre molécules (effet cocktail).

107

L'approche biologique

- Dès le début du XXe siècle, KOLKWITZ et MARSON (Int. Rev. Hydrobiol. 1909) : proposition d'utiliser les communautés aquatiques comme indicateurs de la qualité des eaux de rivières.
- Aujourd'hui, deux approches complémentaires, basées sur l'étude des organismes vivants :
 - Bioindicateurs et indicateurs biologiques
 - Biomarqueurs

KOLKWITZ, R. and MARSSON, M. 1909, Ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologische Gewässerbeurteilung. Int. Rev. Hydrobiol. 2, 126-152.

108

Bioindicateurs

- Espèces ou groupes d'espèces qui par leur présence et/ou leur abondance, sont significatifs d'une ou de plusieurs propriétés de l'écosystème dont ils font partie
- L'indice biologique diatomées (IBD) est un indice de l'état des écosystèmes lotiques (eaux courantes) basé sur la communauté de diatomées (algues unicellulaires au squelette externe siliceux) présente dans le périphyton des cours d'eau.

Le périphyton est un mélange complexe d'algues, de cyanobactéries, de champignons et microbes hétérotrophes et de détritus. Là où il est présent, il est une des bases des chaînes alimentaires et réseaux trophiques subaquatiques, et conditionne notamment la richesse en invertébrés.



109

Exemple : l'indice biologique global normalisé (IBGN)

- **Domaines d'application :**
 - Évaluation de la qualité générale d'un cours d'eau
 - Détection de pollutions
 - Classification des cours d'eau
- **Principe :**
Étude de la macrofaune benthique : identification et quantification des espèces en fonction de leur sensibilité aux polluants

110

Bonne qualité de l'eau

<p>insectes :</p> <p>larves de Plécoptère Perlidae, Peltoperlidae, Capniidae</p> <p>larves d'Ephéméroptères Oligoneuridae, Heptageniidae, Ephemeridae</p> <p>larves de Trichoptère Hydropsychidae, Philopotamidae, Rhyacophilidae</p> <p>Mégaloptères Corydalidae</p> <p>Coléoptères Psephenidae, Elmidae</p>	<p>Autres :</p> <p>Gastéropodes Viviparidae</p> 	
--	--	--

111

Mauvaise qualité de l'eau

<p>Insectes :</p> <p>larves de Chironomidae et de Simuliidae</p>		<p>Autres : Physidae, Planorbidae (gastéropodes)</p> <p>Hirudidae</p> <p>Tubifex (Oligochètes)</p>	  
---	---	---	---

112

Taxons	GI	St															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Chloroperlidae, Perlidae,																	
Perlidae, Taeniopterygidae	9	20	20	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7
Capniidae, Brachycentridae,																	
Odontoceridae, Philopotamidae	8	20	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
Leuctridae, Glossosomatidae,																	
Beraeidae, Goeridae, Leptophlebiidae	7	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
Nemouridae, Lepidostomatidae,																	
Sericostomatidae, Ephemeroidea	6	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
Hydroptilidae, Heptageniidae,																	
Potamitarcidae, Potamanthidae	5	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
Lepoceridae, Polycentropodidae,																	
Psychomyiidae, Rhyacophilidae	4	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Limnephilidae*, Hydropsychidae*,																	
Ephemereidae*, Aphelocheiridae*	3	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Baetidae*, Caenidae*, Elmidae*,																	
Gammaridae*, Mollusques	2	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Chironomidae*, Asellidae*,																	
Achétes, Oligochètes*	1	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1

113

Indice biologique global normalisé

Avantages

- Outil intégratif
- Permet de déterminer la santé d'un milieu à l'échelle d'un 'écosystème'

Inconvénients

- Difficulté d'application à tous les milieux
- Ne renseigne pas sur la nature des polluants
- Influencé par des facteurs extrinsèques

114

Indicateurs biologiques

Espèces ou groupes d'espèces dont les propriétés biologiques (mode de vie, physiologie) sont utilisées pour déterminer les niveaux de contamination d'un biotope

115

Caractéristiques d'un indicateur biologique idéal

- 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
- L'espèce devrait être capable d'accumuler le polluant sans être tuée ni même que sa reproduction en soit perturbée par les niveaux maximum de polluants observés dans l'environnement
- L'espèce devrait être sédentaire afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec la localisation géographique considérée
- L'espèce devrait être abondante dans la région étudiée et si possible devrait avoir une distribution géographique étendue pour favoriser les comparaisons entre zones distinctes

116

Caractéristiques d'un indicateur biologique idéal (suite)

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

117

Facteurs influençant la fiabilité des indicateurs biologiques

Facteurs intrinsèques (propres aux caractéristiques de l'espèce bioindicatrice et des individus qui la composent) et facteurs extrinsèques (environnementaux)

1. Les facteurs intrinsèques

- les taux d'accumulation et d'excrétion
- l'état éco-physiologique des individus
- l'interférence entre polluants dans leurs effets toxicologiques sur l'espèce considérée

118

Importance du rapport entre taux d'accumulation (Ta) et taux d'excrétion (Te)

→ Si $Ta \gg Te$: $[\text{polluant}]_{\text{organisme}} \gg [\text{polluant}]_{\text{biotope}}$
indication des taux maxima atteints par le polluant dans le biotope

→ Si $Ta = Te$: $[\text{polluant}]_{\text{organisme}} = [\text{polluant}]_{\text{biotope}}$
indication des taux réellement présents dans le biotope, avec fluctuations similaires à celles observées dans l'environnement

- Rapport variable selon l'espèce bioindicatrice et les caractéristiques de la substance polluante

Organochlorés (Lindane ou DDT) très persistants : $Ta \gg Te$
Organophosphorés (Fénitrothion) peu persistants : $Ta = Te$

119

Variation de la teneur en Fénitrothion dans divers organes de poissons en fonction de la teneur de cet insecticide organophosphoré dans l'eau

Le fénitrothion ou EID est un insecticide organophosphoré, notamment utilisé sur le pourtour de la Méditerranée ou dans les Antilles (contre les vecteurs du chikungunya), et de manière générale contre les moustiques adultes (c'est un pesticide dit adulticide ou imagicide, c'est-à-dire tuant les moustiques adultes, par exemple en complément du téméphos utilisé contre les larves).

120

1.2 Les conditions physiologiques des individus de l'espèce indicatrice

Variations de Ta en fonction des conditions écophysiological des organismes considérés

- Variation de la prise alimentaire
- Variation du statut reproducteur (maturation ou repos sexuel)
- Variation saisonnière du métabolisme et de la composition biochimique de différents organes
- Augmentation avec l'âge et la taille des individus d'une espèce donnée

↓

Nécessité d'effectuer des prélèvements d'individus dans un même site à différents moments d'un cycle annuel

121

1.3. Interactions physiotoxicologiques des polluants

a- En règle générale, peu de modifications des taux de bioaccumulation suite à la coexistence de plusieurs contaminants dans un biotope donné

b- Parfois, biais causé suite à des effets de potentialisation ou d'antagonisme entre toxiques

- potentialisation : poissons (Cu,Cd)
- antagonisme : contamination des poissons aux organochlorés

c- Mécanismes influençant l'absorption et le relargage des micropolluants en interaction

- réduction ou augmentation de l'absorption suite à la formation de complexes entre polluants
- modifications physiologiques induites par un des xénobiotiques présents
- variation de la perméabilité des membranes, modifiant la pénétration des polluants
- inhibition ou stimulation du système enzymatique de détoxification (MFO)

Nécessité d'évaluer les interactions éventuelles entre polluants lors de la mise en place d'une étude

122

2. Les facteurs extrinsèques

- La température
- Les précipitations (en particulier chez les végétaux car modifie la transpiration)
- Le pH des eaux et des sols
- La salinité

123

Utilisation des indicateurs biologiques

En milieu aquatique: Les macrophytes aquatiques

- Forte aptitude des algues, bryophytes, phanérogames amphibies ou hydrophytiques à concentrer dans leurs tissus des éléments minéraux et organiques

Corrélation entre la concentration en zinc dans l'eau d'une rivière et son accumulation à l'extrémité de pousses de 3 espèces de mousses aquatiques du genre *Fontinalis*, *Amblystegium* et *Rynchostegium*

124

Les mollusques lamellibranches

a- Excellents indicateurs de contamination des eaux continentales et marines, grâce à leur aptitude à la bioaccumulation

b- Caractéristiques favorables à leur emploi comme bioindicateurs

- caractère sédentaire (organismes sessiles)
- cycle vital long (plusieurs mois à plusieurs années)
- échantillonnage qualitatif et quantitatif aisé (taxonomie connue)
- métabolisme connu

c- En milieu continental, bivalves de grande tailles à régime microphage filtreur (*Unio*, *Anodonta*, *Dreissena*)

d- En milieu marin

- Moules (*Mytilus edulis* et *M. galloprovincialis*) et huîtres (*Crassostrea virginica* et *C. gigas*)
- Mise en place d'un vaste programme de monitoring de la pollution littorale du Pacifique et de l'Atlantique (IFREMER...)

125

Les Poissons

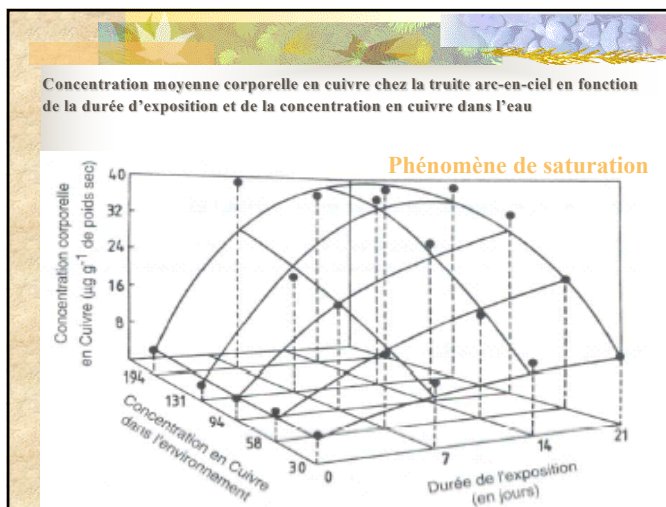
Bioaccumulation importante chez les espèces prédatrices ou super-prédatrices (10^5 à 10^6 fois la concentration de l'eau en certains contaminants minéraux ou organiques)

Utilisation à vaste échelle comme indicateurs en milieu continental et marin (monitoring des PCB et des organochlorés aux USA, des métaux lourds en Scandinavie)

En eau douce : études très nombreuses sur la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) et le vairon (*Pimephales promel*)

- Importance de la guilde alimentaire des poissons et du mode de vie
- Importance de la concentration du polluant dans l'eau et les sédiments
- Importance du temps d'exposition dans le phénomène de bioaccumulation


126



127

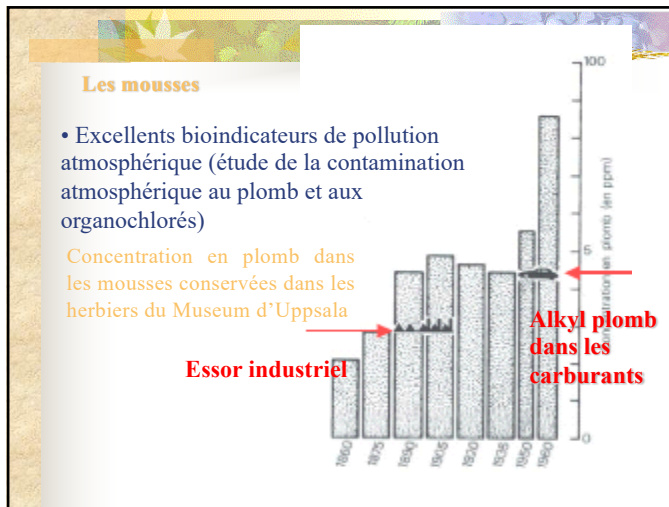
En milieu terrestre

Les lichens

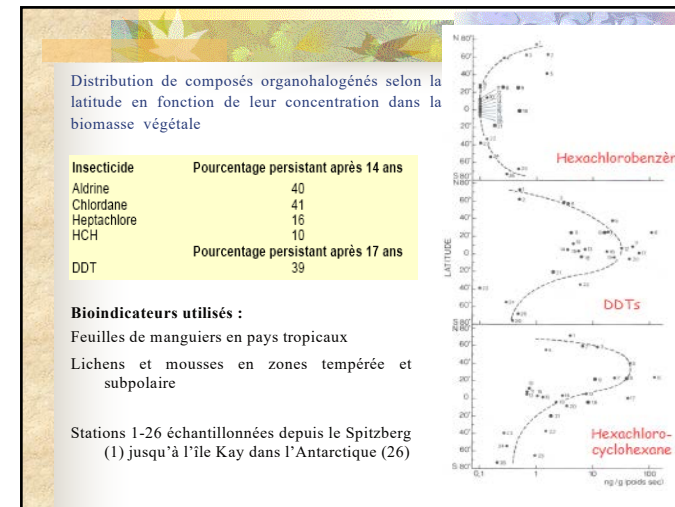


- Forte aptitude des lichens à bioaccumuler des contaminants présents dans l'atmosphère, essentielle source de nutriments
- Corrélation entre teneur en soufre des lichens et distance des sources d'émissions industrielles
- Absorption de soufre >> couverture des besoins nutritifs (absence de régulation de l'absorption)
- Bon indicateur de contamination en métaux radioactifs ou toxiques (Pb)
 - augmentation des teneurs en Pb dans les lichens poussant aux abords des autoroutes

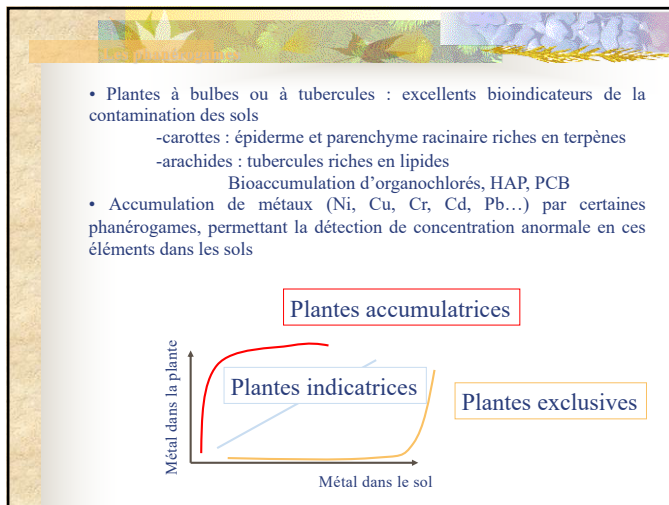
128



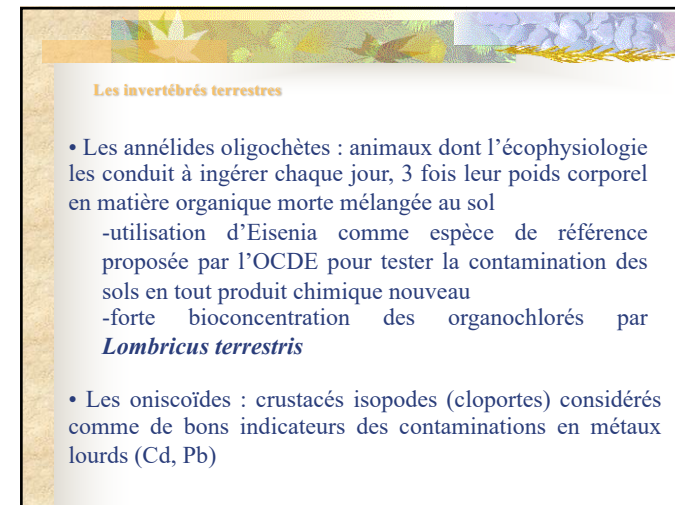
129




130



131



132



Les vertébrés terrestres

Les oiseaux

Aptitude à accumuler des substances toxiques dans le plumage

- Détermination de la contamination des flamands roses et des aigrettes de Camargue par le Cd et le Zn
- Utilisation des plumes d'oiseaux en Suède pour évaluer la contamination de l'espace rural

Les mammifères

- Utilisation des bois des cervidés pour le monitoring de la pollution par les métaux lourds dans les écosystèmes forestiers
- Concentration en Cd, Cr, Pb nettement supérieure dans les bois de chevreuils prélevés dans les forêts de Silésie (Pologne) polluées par les centrales thermiques et la sidérurgie que dans ceux prélevés dans les parcs naturels non pollués

133