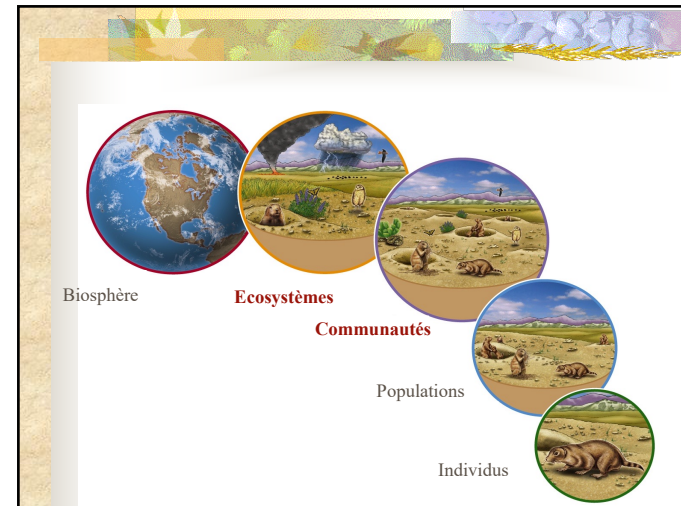


Réseaux trophiques

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

1



2

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

3

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.



4

II. Les interactions dans une communauté

Types d'interaction	Signes	Effets de l'interaction
Compétition	- / -	Les deux espèces souffrent de l'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.

5

II. Les interactions dans une communauté

Types d'interaction	Signes	Effets de l'interaction
Compétition	- / -	Les deux espèces souffrent de l'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.

6

La prédation au sens large

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



7

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

8

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

9

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

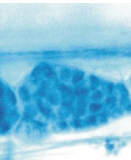


10

La prédation au sens large

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






Fusarium culmorum f. *graminearum* (ear blight)

Sclerotinia cerealis mosaic virus (SBCMV) *Polytrichia*

Mycosphaerella graminicola (STR, leaf blotch)

Oculimacula yallandae (eyespot)

Pathogènes du blé

11

L'ÉCOLOGIE DES COMMUNAUTÉS

a) Adaptations des prédateurs





Tortue alligator

Guépards

12

b) Défenses des Végétaux

Défenses chimiques



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

Défenses mécaniques



Épines
Crochets
Piquants

13

c) Défenses des Animaux

Défenses chimiques



Substance odorante
Acide

Défenses mécaniques



Carapace
Piquants
Dards

14

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)



15

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



Plant → Herbivore → Carnivore → Carnivore → Carnivore

A marine food chain



Phytoplankton → Zooplankton → Carnivore → Carnivore → Carnivore → Carnivore

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

16

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

17

Des producteurs



Les végétaux terrestres



Les végétaux aquatiques



Laminaires



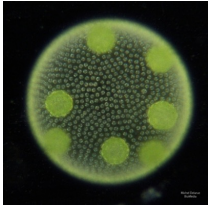
Lentilles d'eau

18


Encore des producteurs

Les algues microscopiques du phytoplancton ou plancton végétal

Algues vertes



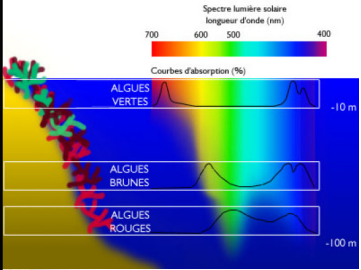
Volvox



Diatomés

19

Petit focus sur les algues



Le graphique illustre le spectre lumineux solaire (longueur d'onde en nm) et les courbes d'absorption (%) pour les algues vertes, brunes et rouges à différentes profondeurs (-10 m et -100 m). Les algues vertes absorbent principalement dans le bleu-vert, les algues brunes dans le bleu-vert et le rouge, et les algues rouges dans le rouge et le bleu.

- Les algues vertes, comme les plantes, doivent leur couleur caractéristique à la présence de la chlorophylle. Elles font parties du phylum Chlorophyta.
- Les algues rouges ont, en plus de la chlorophylle, des pigments accessoires caractéristiques : les phycobiliprotéines. Il s'agit notamment de la phycoérythrine (rouge) et de la phycocyanine (bleu).
- Enfin, les algues brunes doivent leur couleur à la présence d'autres types de pigments, les caroténoïdes. Parmi ceux-ci, la fucoxanthine prédomine.

L'eau de mer se comporte comme un filtre qui absorbe progressivement les radiations lumineuses dans l'ordre décroissant de leurs longueurs d'onde (700 à 400 nm pour le spectre visible). Les radiations rouges disparaissent complètement vers 10 mètres de profondeur. Toutes les radiations sont ainsi absorbées jusqu'au vert et au bleu qui sont seules à subsister en faible quantité vers -75 à -100 mètres.

20

Toujours des producteurs

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



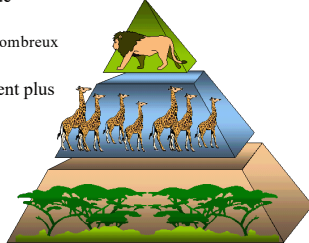

Bactéries hébergées par les vers tubicoles et par des moules : au fond des océans, là où il fait très noir.

Moules
Vers tubicoles

21

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



22

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

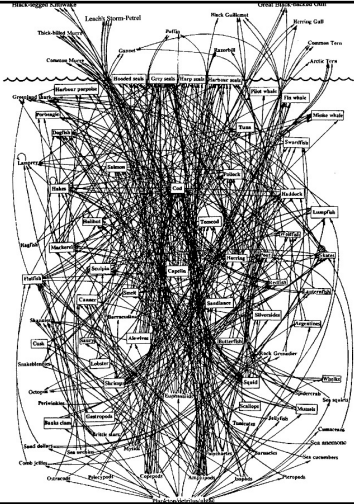


Réseau trophique dans un écosystème forestier français

23

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

24

COMMENT ÉTABLIR LA STRUCTURE DU RÉSEAU TROPHIQUE ?

25

Méthodes

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

1= Direct vision, 2= Fistulation, 3= Fecal analysis, 4= chemical analysis of forage, 5= stomach content, 6= tanning method, 7= DNA analysis & 8= stable isotopes

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.

26


OBSERVATION DE LA PRÉDATION

27

Observation de la prédation

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



28



Observation de la prédation

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

29



Prédation chez le narval

Monodon monoceros

- Une recherche fructueuse de nourriture est essentielle pour que les individus maintiennent un bilan énergétique positif nécessaire à leur survie et à leur reproduction. Pourtant, l'efficacité de la capture des proies est peu documentée chez les prédateurs marins apex, en particulier chez les mammifères plongeant en profondeur. Des tags acoustiques et des enregistreurs de température stomacale ont été déployés en été afin de recueillir des informations simultanées sur l'activité de recherche de nourriture présumée (par la détection des buzz) et la capture réussie de proies (par la baisse de la température stomacale), fournissant ainsi des estimations de l'efficacité de l'alimentation chez les narvals.

Chambault P, Blackwell SB, Heide-Jørgensen MP (2023) Extremely low seasonal prey capture efficiency in a deep-diving whale, the narwhal. *Biology Letters* 19 doi 10.1098/rsbl.2022.0423

30

Prédation chez le narval

Monodon monoceros

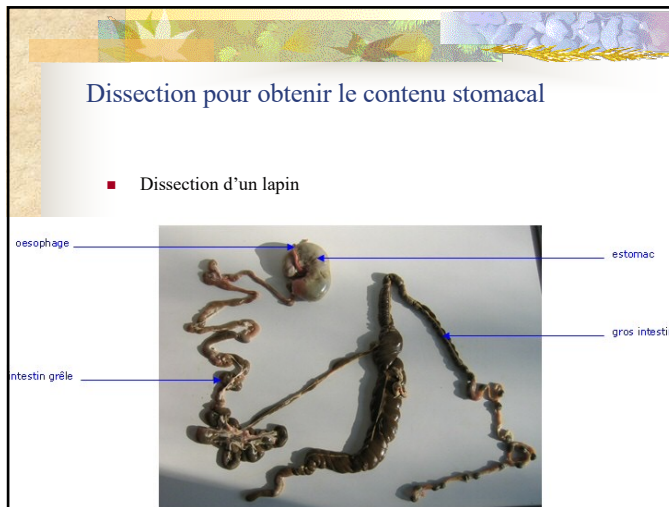
- Comparé au nombre quotidien de buzz (707 ± 368), le taux quotidien d'événements d'alimentation était particulièrement faible en été ($19,8 \pm 8,9$) et seulement 8 à 14 % des plongées de recherche de nourriture étaient réussies (c.-à-d. avec une capture de proie détectable). Ce taux de réussite extrêmement faible a entraîné un taux de consommation alimentaire quotidien très bas (moins de 0,5 % de la masse corporelle), ce qui suggère que les narvals comptent sur les réserves corporelles accumulées en hiver pour soutenir leurs activités tout au long de l'année.
- Les changements prévus ou la disparition de leurs habitats d'hivernage en réponse au changement climatique peuvent donc avoir de graves conséquences sur la condition physique des populations de narvals.

31

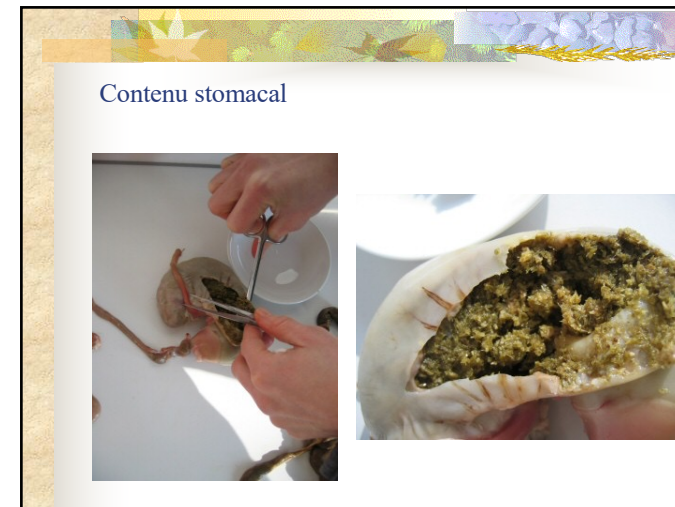


CONTENU STOMACAL

32



33



34



35

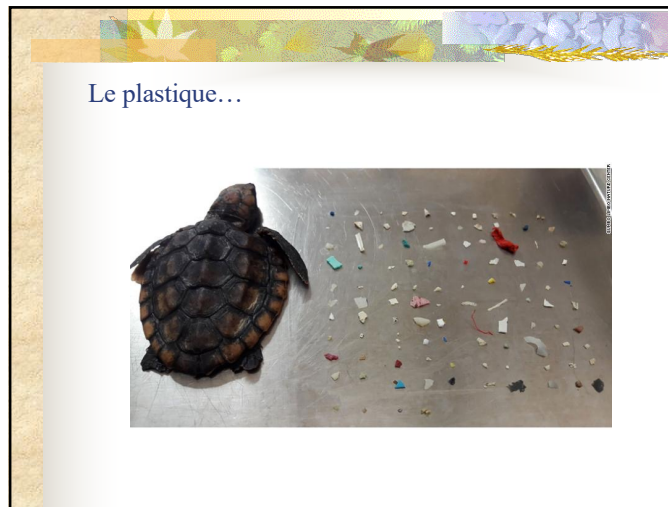
Analyse du contenu stomacal de tortues de Floride

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

Sex	Origin	Carapace length (mm)	Plants				Invertebrates		Fishes	Others
			Unknown	Juncaceae	Cyperaceae	Poaceae	Insects	Crustaceans		
F	L.C.	111.0	+				+		C	
F	L.C.	133.8	+					+		Pl, S, Pa
F	L.C.	138.2	+					+		
F	L.C.	141.4						+	+	
F	L.C.	143.8	+					+		
F	L.C.	148.8	+							S
F	L.C.	160.9	+					+	+	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	+							
F	L.C.	203.3	+							P, C
F	S.	127.3	+				+	+		P, C
F	S.	210.8	+							Pl, Pa
M	L.C.	147.2	+				+	+		C
M	L.C.	162.3	+					+		
M	L.C.	179.1	+					+		
M	L.C.	200.6	+							
M	S.	164.4	+	+			+	+		S
M	S.	170.0	+		+					PI
M	S.	195.0	+				+			

Prévoit-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.


36



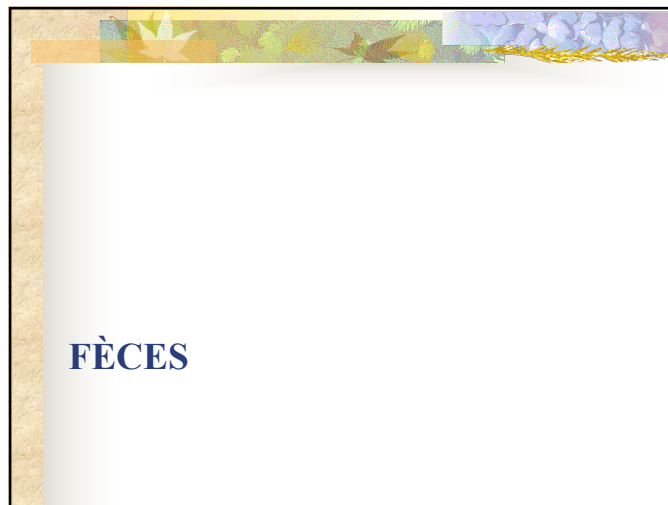
37

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.

A photograph showing a person's hands performing a surgical procedure on a sea turtle's stomach. The turtle is held in a blue cloth, and the person is using a scalpel to make an incision.

38



39

Analyse des fèces

A photograph showing a pile of dark, rounded fecal pellets on a rocky surface. The pellets are dark in color and have a somewhat irregular, rounded shape.

- Les fèces 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.

40

Analyse des fèces

- Biais de digestibilité

41

Toujours bien de 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?


42

PELOTES DE RÉJECTION


43

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.

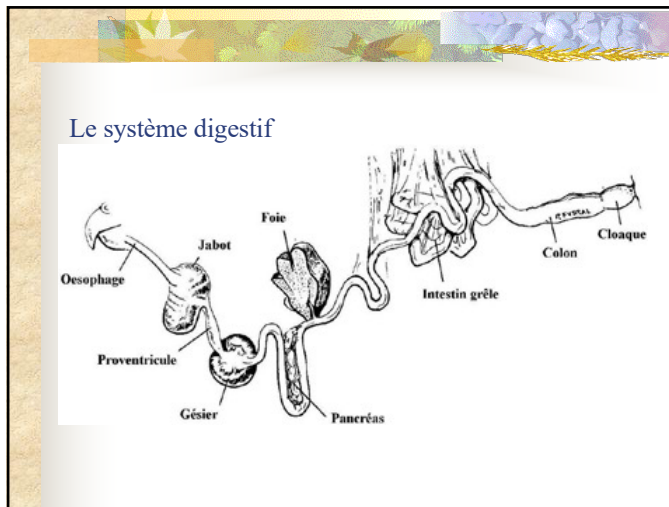


L'effraie des clochers (*Uro alba*) est une chouette aussi couramment appelée chouette effraie.

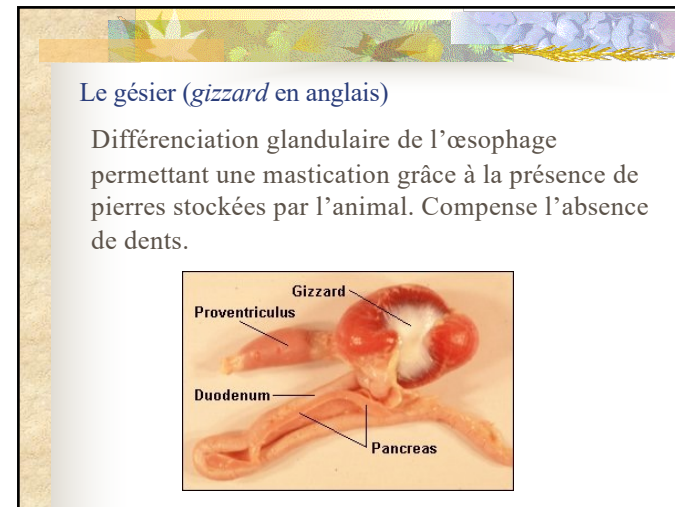


Pelote de réjection

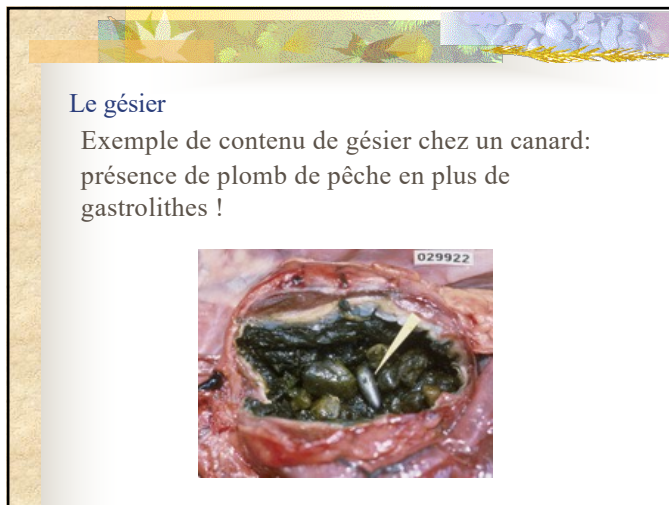
44



45



46



47



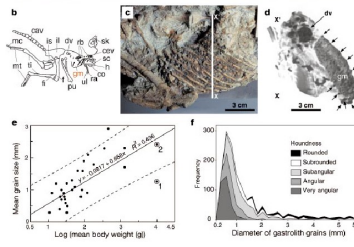


48

Gastrolithes chez un Ornithomimid

Nature 1999

Saurischien, Théropode

a **b** **c** **d** **e** **f**

Mean grain size (mm)

Log (mean body weight (g))

Diameter of gastrolith grains (mm)

Frequency

Hourglass
Subrounded
Subangular
Angular
Very angular

49

Utilisation particulière du gésier chez des amazones du Pérou



50

Pourquoi manger de l'argile ?



Un certain nombre de fruits possèdent une enveloppe charnue comestible mais des graines toxiques. Ainsi la plante s'assure une dispersion efficace car ses fruits sont mangés et les graines dispersées intactes. En effet, si un prédateur digère les graines, il s'intoxique.

Or les graines possèdent des éléments nutritifs très riches et les perroquets les brisent avec leur bec pour les manger. Comment résistent-ils alors aux alcaloïdes présents dans la graine ?

Fruit du guarana

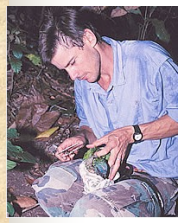
Les alcaloïdes sont des molécules organiques hétérocycliques azotées ayant souvent des actions pharmacologiques très puissantes (morphine ci-contre, strychnine).




51

Pourquoi manger de l'argile ?

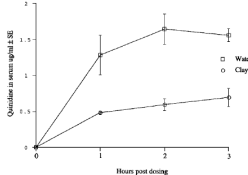
Gilardi, J. D., S. S. Duffley, C. A. Munn, and L. A. Tell. 1999. Biochemical functions of geophagy in parrots: detoxification of dietary toxins and cytoprotective effects. *Journal of Chemical Ecology* 25:897-922.



James Gilardi a proposé que l'argile soit un chélatant pour ces alcaloïdes. Une pilule contenant un alcaloïde faiblement toxique (quinidine) a été donnée à huit perroquets captifs. Huit autres oiseaux ont été nourris de la même pilule avec une petite cuillerée d'argile. Ensuite, des échantillons de sang de tous les perroquets ont été analysés afin de voir comment la quinidine a été absorbée par les perroquets.



La réponse fut très claire, ceux ayant ingurgité aussi de l'argile n'avaient qu'un tiers de quinidine dans le sang en comparaison de ceux n'en ayant pas reçu.



Quantité de quinidine dans le sang (ng/ml ± SE)

Heures post-dosing

Water Clay

FIG. 7. Effect of clay ingestion on the bioavailability of quinidine in orange-winged Amazon parrots (*Amazona amazónica*).

52

Transmission culturelle de l'habitude ?
Chez des aras d'Amazonie



53

Ou convergence ?
Chez des cacatoès d'Australie



54

Géophagie chez des populations humaines



Mais cette pratique peut conduire à des occlusions intestinales ainsi qu'à une chélation du fer d'où une adsorption moindre de celui-ci et à des carences.

55

LES ISOTOPES STABLES

56

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.*

57

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.

58

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

59

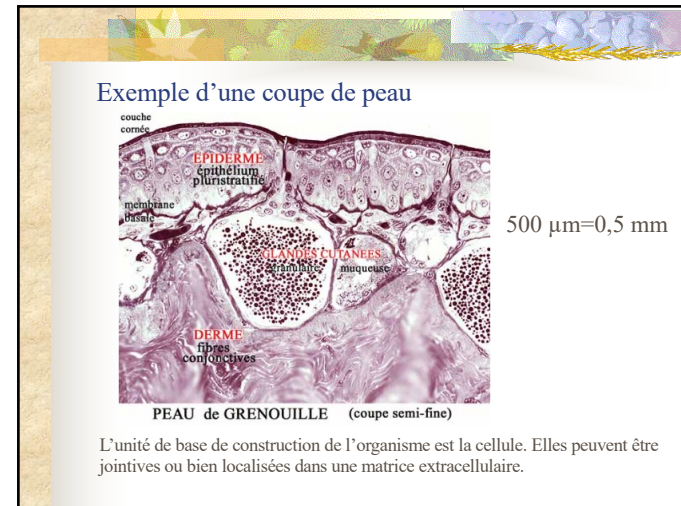
Pourquoi ?

- 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.

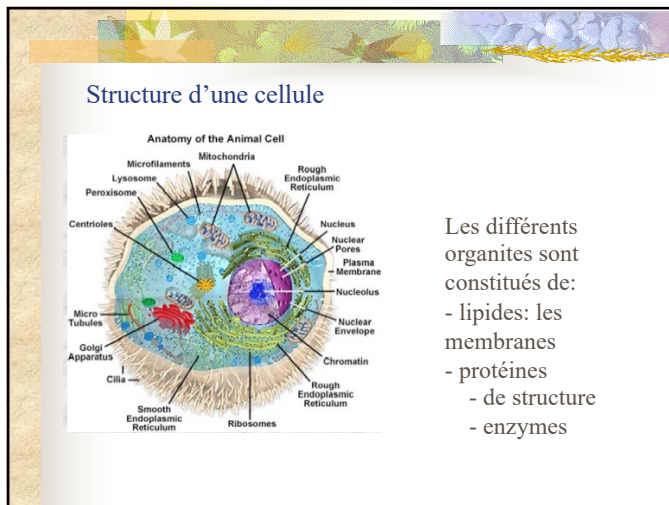
60



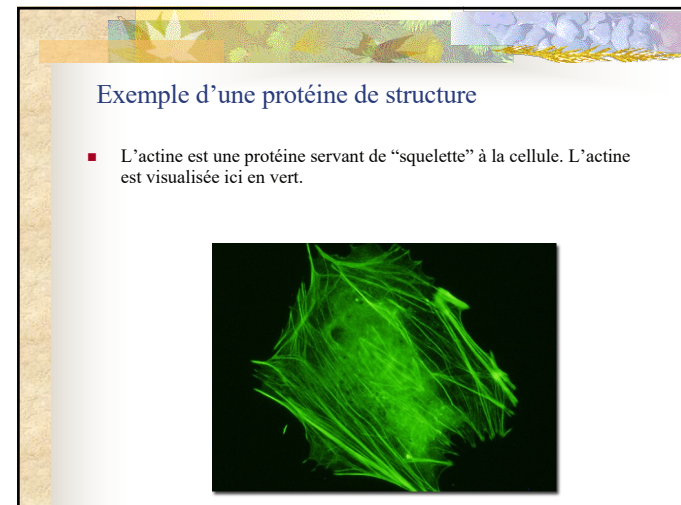
61



62



63



64

Exemple d'une protéine ayant une activité enzymatique

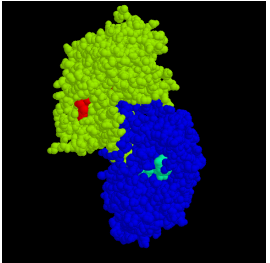
- L'alcool déshydrogénase

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.

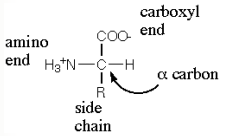


65

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.



66

Les acides aminés



Amino acids with hydrophobic side groups

Valine (Val)	Leucine (Leu)	Isoleucine (Ile)	Methionine (Met)	Phenylalanine (Phe)
--------------	---------------	------------------	------------------	---------------------

Amino acids with hydrophilic side groups

Asparagine (Asn)	Glutamic acid (Glu)	Glutamine (Gln)	Histidine (His)	Lysine (Lys)	Arginine (Arg)
Aspartic acid (Asp)					

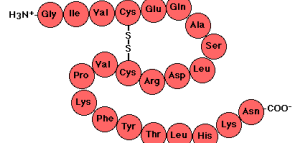
Amino acids that are in between

Glycine (Gly)	Alanine (Ala)	Serine (Ser)	Threonine (Thr)	Tyrosine (Tyr)	Tryptophan (Trp)
Cysteine (Cys)	Proline (Pro)				

67

La structure primaire d'une protéine

C'est simplement la suite des acides aminés.



68

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).

The diagram illustrates the transition from primary to secondary protein structure. On the left, a linear sequence of amino acids is shown. This sequence can fold into local structures: an alpha helix (a tight coil) and a beta sheet (a zig-zag structure). On the right, a ball-and-stick model shows a more complex, folded protein structure.

69

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.

70



71

En résumé

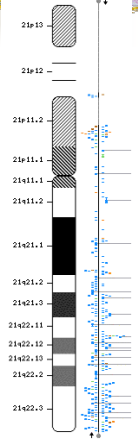
- Une protéine est une suite d'acides aminés qui prend une conformation dans l'espace lui permettant d'avoir une activité chimique.
- Une protéine ayant la même fonction chez deux espèces n'aura pas exactement la même structure primaire mais aura en général la même structure secondaire et tertiaire.

3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

72

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

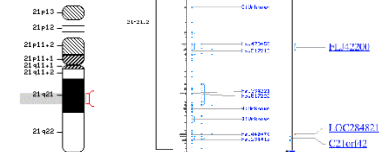
- L'information est localisée dans les gènes, eux-mêmes situés sur les chromosomes.



73

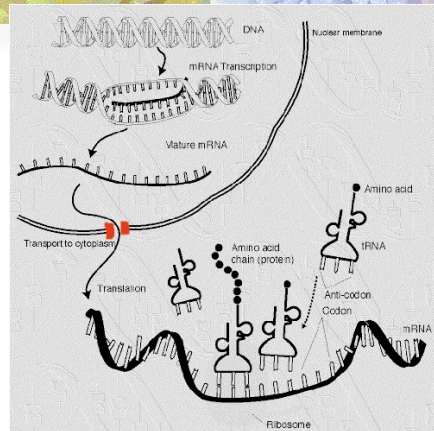
Les gènes

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



74

Fabrication d'une protéine



75

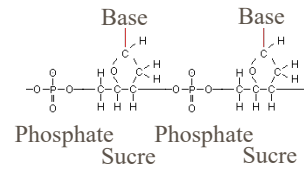
En résumé

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

76

L'ADN

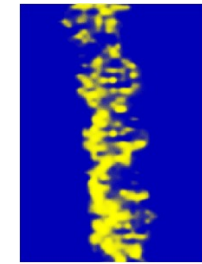
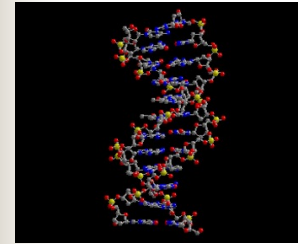
L'information génétique est présente sous la forme d'une chaîne de phosphate et sucre sur lequel sont attachés des bases A, T, G ou C.



77

La double-hélice

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

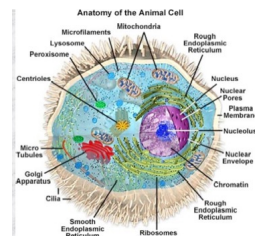


78

Localisation des chromosomes

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

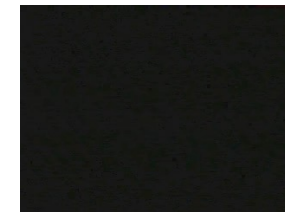
Toutes les cellules d'un organisme possèdent le même contenu en ADN grâce au mécanisme de réplication précédant la division cellulaire.



79

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.



80

La division cellulaire = mitose

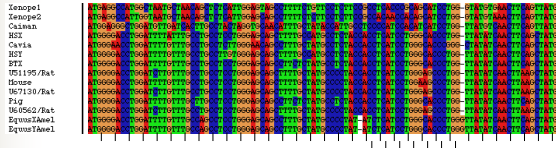


Une cellule -> 2 cellules identiques

81

La contamination de l'environnement par l'ADN


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



82

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 appelé e-DNA. Il est le marqueur des espèces vivant ou ayant vécu dans cet environnement.



83

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

84



85

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 vivants:
 - On pourra utiliser par exemple des amorces d'ADN ribosomique
 - C'est rendu possible car il y a eu un LUCA !

86

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

Archées

Les lipides de la membrane peuvent former des bicouches mais aussi des membranes rigides composées de tétraèthers



Eubactéries

Pari cellulaire possédant de l'acide muramique

Eucaryotes

- Noyau délimité par une membrane nucléaire
- Mitochondries
- Microtubules

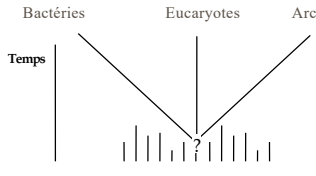
87

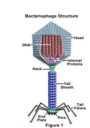
A la recherche de LUCA...

Bactéries

Eucaryotes

Archées





LUCA
(Last Universal Common Ancestor)

88

Les briques du vivant

RNA
Ribonucleotidique

DNA
Deoxyribonucleotidique

Acides aminés avec hydrogène sur le groupe

Valine (Val)

Leucine (Leu)

Sérine (Ser)

Méthionine (Met)

Phénylalanine (Phe)

Acides aminés avec hydrogène sur le groupe

Arginine (Arg)

Glutamate (Glu)

Asparagine (Asn)

Leu (Leu)

Arginine (Arg)

Acides aminés sans H sur le carbone

Ornithine (Orn)

Alanine (Ala)

Sérine (Ser)

Threonine (Thr)

Tryptophane (Trp)

Cystéine (Cys)

Proline (Pro)

89

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			
		U	C	A	G
première base	U	UUU] Phe UUC] Cys UUA] Leu UUG] Leu	UCU] Ser UCC] Leu UCA] Stop UCG] Stop	UAU] Tyr UAC] Tyr UAA] Stop UAG] Stop	UGU] Cys UGC] Cys UGA] Stop UGG] Trp
	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] Met AUG] Met	ACU] Thr ACC] Thr ACA] Thr ACG] Thr	AAU] Asn AAC] Asn AAA] Lys AAG] Lys	AGU] Ser AGC] Ser AGA] Arg AGG] Arg
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	

90

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 vivants :
 - 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.


91

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

92

Exemple



- *Rhodnius* est un genre d'insectes hétéroptères (punaises) appartenant à la sous-famille des Triatominae, important vecteur de la maladie de Chagas.
- La trypanosomiase américaine (brésilienne) ou maladie de Chagas est une forme de trypanosomiase (comme la maladie du sommeil), une maladie parasitaire qui sévit dans les régions tropicales d'Amérique du Sud et centrale.
- Selon l'OMS près de 13 000 personnes meurent de la maladie de Chagas et 300 000 nouveaux cas se déclarent chaque année.
- Dans la phase chronique symptomatique, des complications tardives se produisent dans les années, voire les décennies qui suivent l'infection initiale. Ces atteintes, de gravité variable, concernent le cœur, le système digestif et le système nerveux.

93


Rhodnius est hématoophage

- Les protéines des glandes salivaires sécrétées et injectées par les insectes hématoophages lors de la piqûre de leur hôte comprennent un cocktail de molécules pour faire face à la composition du sang de l'hôte et aux défenses immunitaires de ce dernier .
- Étonnamment, *Rhodnius* possède des gènes d' α -amylase, qui sont transcrits dans les glandes salivaires et le tube digestif, en dépit du fait que le sang des vertébrés (l'hôte principal des insectes hématoophages) est dépourvu de polysaccharides et ne contient que des maltooligosaccharides à chaîne courte.
- La question qui se pose alors est: *Rhodnius* est-il réellement strictement hématoophage ?

94

Protocole expérimental et résultats

- Collecte d'insectes sur des palmiers au Brésil
- Extraction de l'ADN du tube digestif
- Amplification de l'ADN avec des amorces pour le gène de l'ARN nucléaire 18S spécifique aux plantes.



Résultats

- Résultats positifs pour 24 échantillons de *R. robustus* sur un total de 285 (8,4 %). Ces résultats correspondent à des plantes qui poussent au Brésil. Quatre-vingt-sept pour cent (21/24) des amplicons¹ 18S correspondent à la séquence du palmier *Attalea speciosa* (Arecaceae).

1- Les amplicons sont des fragments d'ADN amplifiés par PCR.

Da Lage JL, Fontenelle A, Filee J, Merle M, Beranger JM, Almeida CE, Folly Ramos E, Harry M (2023) Evidence that hematophagous triatomine bugs may eat plants in the wild. Insect Biochemistry and Molecular Biology 165:104059

95

Quantifier l'information contenue dans un réseau biologique (trophique ou plus)

Types d'interaction	Signes	Effets de l'interaction
Compétition	- / -	Les deux espèces souffrent de l'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

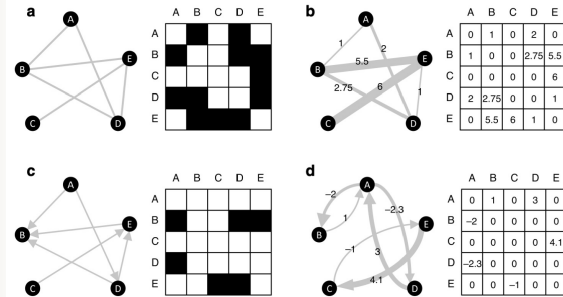
96

Décrire un réseau biologique

- Les réseaux écologiques peuvent être représentés comme un ensemble de nœuds S , caractérisant les espèces, reliés par un ensemble de liens L , caractérisant les interactions possibles entre chaque paire ordonnée d'espèces.
- Les liens peuvent être décrits soit par une variable binaire (0 ou 1, absence ou présence d'interaction) (réseau non pondéré), soit par un nombre réel caractérisant le poids (ou la force) de l'interaction (réseau pondéré).
- En outre, les interactions peuvent être non dirigées (ou symétriques), ce qui signifie que l'espèce i affecte l'espèce j dans une certaine mesure et vice versa, ou dirigées (ou asymétriques), ce qui signifie que l'espèce i peut affecter l'espèce j différemment de la façon dont l'espèce j affecte l'espèce i .

97

Exemples de réseaux biologiques



a Non pondéré non dirigé ; b non dirigé pondéré ; c dirigé non pondéré ; d dirigé pondéré.
In Landi P, Minoravello HO, Brännström A, Hui C, Dieckmann U (2018) Complexity and stability of ecological networks: a review of the theory. *Population Ecology* 60:319-345

98

Combien de liens L pour un ensemble d'espèces S ?

- Soit S un ensemble d'espèces; chaque espèce a $S - 1$ liens; il y a donc au total $S \times (S - 1)$ liens, soit $S^2 - S$.
- Parfois on considère aussi les liens de l'espèce avec elle-même ce qui donne S^2 liens.
- Si on considère seulement des relations trophiques en considérant que dans un couple une espèce est soit proie soit prédateur, il y a $\frac{S \times (S - 1)}{2}$ liens.

99

Mesurer la complexité d'un réseau

- La richesse en espèces S , ou le nombre total d'espèces en interaction dans le réseau, également connue sous le nom de taille du réseau, a été utilisée comme le descripteur le plus simple de la complexité du réseau.
- Dans les études sur les réseaux trophiques, l'utilisation d'espèces trophiques (un groupe fonctionnel d'espèces partageant le même ensemble de prédateurs et de proies) remplace souvent les espèces taxonomiques.
 - C'est équivalent à un groupe fonctionnel en écologie des communautés.

100

D'une chaîne à un réseau trophique

- Si l'on se contente de juxtaposer des chaînes trophiques, on obtient un réseau de «spécialistes». Chaque espèce est spécialisée dans la consommation d'une autre espèce.
- Lorsque les espèces sont généralistes (ce qui est le plus souvent le cas), le réseau est interconnecté.

Chaîne trophique Réseau de spécialistes Réseau de généralistes

101

La connectance dans un réseau trophique

- La connectance permet de mesurer le degré d'interdépendance des espèces.

Chaîne trophique Réseau de spécialistes Réseau de généralistes

$$C = \frac{\text{nombre de connections réalisées}}{\text{nombre de connections possibles } (= N(N - 1)/2)}$$

102

La connectance

- La connectance permet de mesurer le degré d'interdépendance des espèces. Il rend compte de la probabilité qu'une paire d'espèces interagisse dans le réseau.
- Exemple de 9 espèces soit $9 \times 8 = 72$ liens possibles et donc 36 liens proie-prédateurs.

Réseau de spécialistes Réseau de généralistes

$$C = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$$

$$C = \frac{18}{36} = \frac{1}{2}$$

103

Modularité

Producteurs primaires Consommateurs finaux

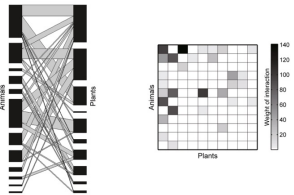
Réseau de spécialistes Réseau de généralistes

- La modularité indique dans quelle mesure un réseau est compartimenté en modules délimités où les espèces interagissent fortement avec les espèces du même module, mais pas avec celles d'autres modules.

104

Réseau bipartite

- Un réseau est bipartite quand il est formé par deux groupes disjoints de respectivement m et n espèces, avec $S = m + n$, avec des interactions uniquement entre deux espèces de groupes différents.
 - Réseaux de mutualistes plantes et pollinisateurs ou des réseaux antagonistes d'interactions hôte-parasite



Un réseau mutualiste est pondéré et non dirigé : la largeur du lien à gauche et la nuance de gris à droite sont proportionnelles au poids de l'interaction qui représente le nombre de visites des pollinisateurs.

105

Autres mesures

- Connectivité: Nombre total de liens, L
- Pour comprendre le niveau moyen de spécialisation du réseau, c'est-à-dire pour savoir si le réseau est dominé par des spécialistes (espèces ayant peu d'interactions) ou des généralistes (espèces ayant de nombreuses interactions), les écologistes des réseaux alimentaires ont introduit la densité des liens qui est le nombre moyen de liens par espèce, L/S
- ... plus beaucoup d'autres par exemple obtenues en pondérant chaque lien par le flux de biomasse qu'il représente.
 - Il est assez facile de définir la force des liens sur des modèles théoriques mais c'est beaucoup plus difficile sur un écosystème réel.

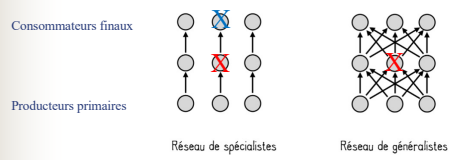
106

Stabilité: Odum 1953 ; Mac Arthur 1955 ; Elton 1958

- Avant les années 1970, les écologistes pensaient que des communautés plus diversifiées renforçaient la stabilité des écosystèmes.
 - Par exemple, les invasions se produisent le plus souvent sur des terres cultivées où les communautés écologiques sont très simplifiées ; les invasions d'insectes phytophages se produisent facilement dans les forêts boréales mais sont inconnues dans les diverses forêts tropicales ; et la fréquence des invasions est plus élevée dans les communautés insulaires simples que dans les communautés plus complexes non-insulaires.
- MacArthur a conclu que "la stabilité augmente avec le nombre de liens" et que la stabilité est plus facile à atteindre dans des assemblages d'espèces plus diversifiés, liant ainsi la stabilité de la communauté à la fois à l'augmentation des liens trophiques (par exemple, la connectivité C) et à l'augmentation du nombre d'espèces (S).

107

Modularité, connectance et résilience



- Quand une espèce disparaît (X) dans un réseau de spécialistes, la chaîne en aval (X) disparaît:
 - 1/3 des cas, perte d'une espèce; 1/3 des cas, perte de 2 espèces et 1/3 des cas; perte de 3 espèces donc en moyenne perte de 2 espèces.
- Quand une espèce disparaît (X) dans un réseau de généralistes, rien ne se passe en plus de la perte d'une espèce.
 - Perte d'une seule espèce.

108

Travaux théoriques

- Dans des modèles simplifiés d'écosystèmes, May (1972, 1973) a constaté que la complexité au contraire tend à déstabiliser la dynamique des communautés.
- Il a démontré mathématiquement que la stabilité des réseaux diminue avec la diversité (mesurée par le nombre d'espèces S) et la complexité (mesurée par la connexité C).
- Il a constaté en particulier que les systèmes plus diversifiés, comparés aux systèmes moins diversifiés, tendent à passer brusquement d'un comportement stable à un comportement instable lorsque le nombre d'espèces S ou la connexité C augmentent au-delà d'une valeur critique.

109

Synthèse

- Les travaux actuels s'attachent à décrire les communautés écologiques plus précisément et à utiliser ces descriptions pour réaliser des modèles plus réalistes.
 - L'une des règles les plus généralement acceptées en matière de connectivité des réseaux alimentaires est que ces derniers présentent une connectivité moyenne faible d'environ 0,11.
- Dans ces conditions, la stabilité des communautés complexes est parfois retrouvée... mais parfois non !

110