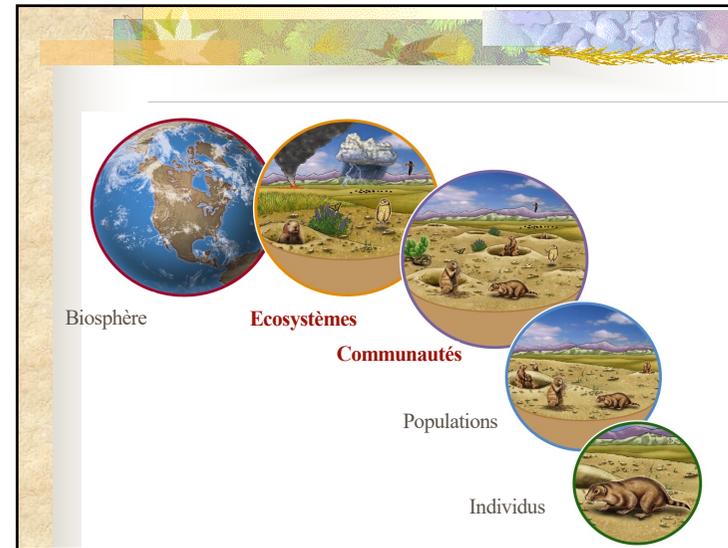


## Réseaux trophiques



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
<b>Prédation</b>	<b>+ / -</b>	<b>Une espèce bénéficie de l'interaction, l'autre en souffre</b>
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



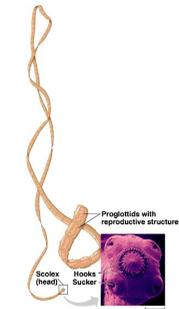
7

## 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

## Qu'est ce que l'agriculture ?

- Présence de deux entités distinctes:
  - Espèce cultivée, domestique ou exploitée
  - Espèce cultivatrice qui va fournir par son travail une transformation du milieu afin d'en accroître la capacité d'accueil.

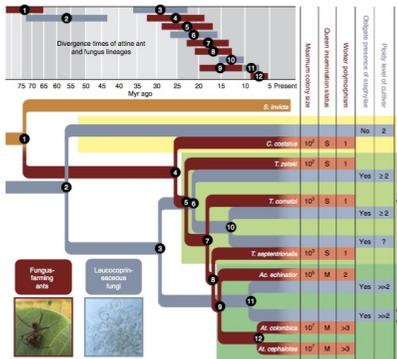


*Lasius niger* et pucerons *Aphis* sp.

10

## Origine de l'agriculture chez les fourmis: 60 millions d'années

Nygaard S., Hu H., Li C., Schiott M., Chen Z., Yang Z., Xie Q., Ma C., Deng Y., Dikow R.B., Rabeling C., Nash D.R., Weislo W.T., Brady S.G., Schultz T.R., Zhang G. and Boomsma J.J. (2016) Reciprocal genomic evolution in the ant-fungus agricultural symbiosis. *Nat Commun*, 7, 12233.



Species	Mutualism	Polyphagous diet	Mutualism/obligate status
<i>Eciton</i>	Yes	Yes	1
<i>C. opacitarsis</i>	Yes	Yes	1
<i>T. zezeli</i>	Yes	Yes	2
<i>T. curvispinosus</i>	Yes	Yes	2
<i>T. sphenocranum</i>	Yes	Yes	7
<i>Ac. echinatior</i>	Yes	Yes	>2
<i>Ac. colombica</i>	Yes	Yes	>>2
<i>Ac. septentrionalis</i>	Yes	Yes	>2

11

## 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



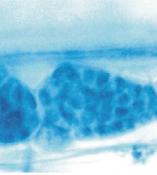
12

## La prédation au sens large

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



*Fusarium culmorum* (ear blight)



Soil borne cereal mosaic virus (SBCMV) (*Polymyxa*)



*Mycosphaeraella graminicola* (STR, leaf blotch)



*Oculimacula yallundae* (eyespot)

Pathogènes du blé

13

## a) Adaptations des prédateurs



Tortue alligator



Guépards

14

## b) Défenses des Végétaux

### Défenses chimiques



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

### Défenses mécaniques



Épines  
Crochets  
Piquants

15

## c) Défenses des Animaux

### Défenses chimiques



Substance odorante  
Acide

### Défenses mécaniques



Carapace  
Piquants  
Dards

16

## 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 détritiques, bactéries et champignons)

17

## 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...

18

## 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 <sub>2</sub> S (sulfure d'hydrogène) et du CH <sub>4</sub> (méthane)	Chaîne chimiosynthétique	Bactéries hébergées par les vers tubicoles des cheminées chaudes et par les moules des suintements froids

19

## Des producteurs

20

## Encore des producteurs

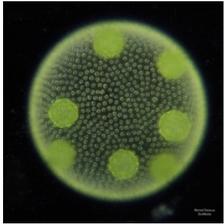
Les algues microscopiques du phytoplancton ou plancton végétal

Algues vertes



Photo M. Coste, Comagere

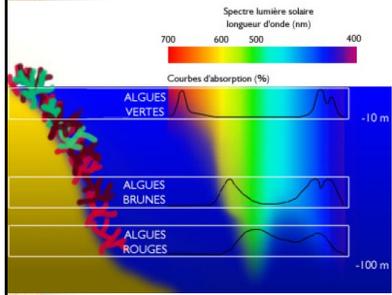
Diatomés



Volvox

21

## Petit focus sur les algues



Spectre lumière solaire longueur d'onde (nm)

Courbes d'absorption (%)

- ALGUES VERTES -10 m
- ALGUES BRUNES
- ALGUES ROUGES -100 m

- 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.

22

## 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.



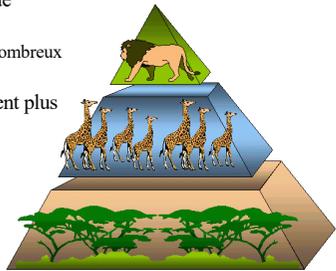
Moules

Vers tubicoles

23

## La chaîne alimentaire

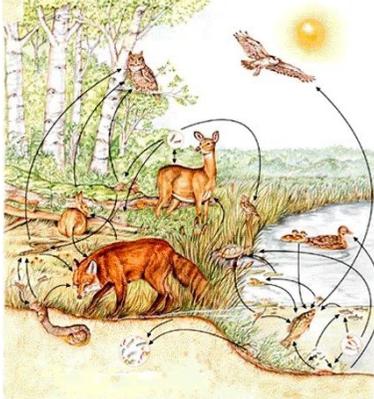
- A chaque niveau trophique, seule 10 % de l'énergie disponible est transférée
- En général, dans une communauté, le nombre et la biomasse des espèces diminuent quand le niveau trophique augmente
  - Ex : Les carnivores sont moins nombreux que les herbivores
- Une communauté comprend rarement plus de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



24

## 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

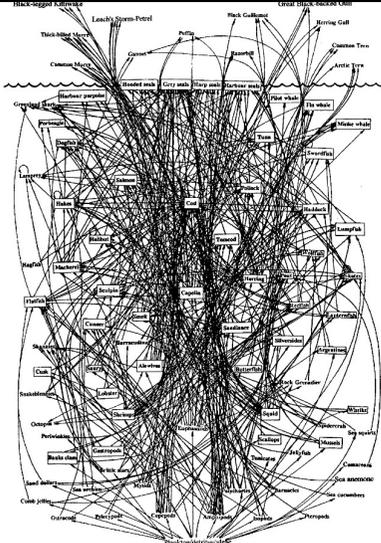


Réseau trophique dans un écosystème forestier français

25

## 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

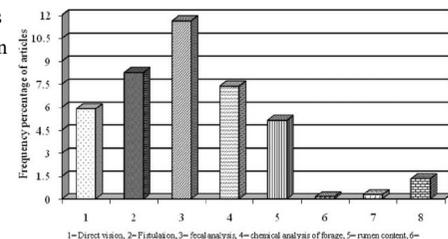
26

## COMMENT ÉTABLIR LA STRUCTURE DU RÉSEAU TROPHIQUE ?

27

## Méthodes

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



Method	Frequency percentage of articles
1- Direct vision	~6.5
2- Fecal analysis	~8.5
3- Local analysis	~11.5
4- Chemical analysis of forage	~8.0
5- Rumor content	~5.5
6- Chemical analysis of faeces	~0.5
7- DNA analysis	~0.5
8- Stable isotopes	~1.5

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.

28

## OBSERVATION DE LA PRÉDATION

29

### Observation de la prédation

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



30

### Observation de la prédation

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

31

### 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

32

## Prédation chez le narval

*Monodon monoceros*

- Comparé au nombre quotidien de buzz ( $707 \pm 368$ ), 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.

33

## CONTENU STOMACAL

34

## Dissection pour obtenir le contenu stomacal

- Dissection d'un lapin



Diagram illustrating the dissection of a rabbit to obtain stomach contents. The diagram shows the internal organs with labels: oesophage, estomac, gros intestin, and intestin grêle.

35

## Contenu stomacal

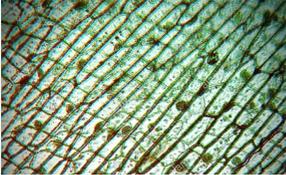


Two photographs showing the dissection of a rabbit's stomach. The left photo shows hands using forceps to open the stomach. The right photo shows the extracted stomach contents, which are dark and granular.

36

## Contenu stomacal

- Identification du contenu stomacal
  - Os
  - Ecailles
  - Plumes
  - Epiderme des plantes



Épiderme d'oignon

On doit d'abord constituer un catalogue de ce qui est présent dans l'environnement.

37

## 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 = "Sausset", Fiches: C = Cyprinidae, P = Percormphidae; Other: Pl = Plastic, 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	+	+	+				C	
F	L.C.	138.2	+				+		Pl, S, Pa	
F	L.C.	141.4					+	+		
F	L.C.	143.8	+					+		
F	L.C.	148.8	+		+		+	+		
F	L.C.	160.3	+				+		S	
F	L.C.	162.3	+				+		Pl	
F	L.C.	162.4	+						Fishbone	
F	L.C.	172.9	+						C	
F	L.C.	174.0	+				+		Pl, S	
F	L.C.	190.4	+						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.	179.1	+				+		C	
M	L.C.	200.6	+				+			
M	S.	164.4	+	+	+		+	+	P, C	
M	S.	170.0	+				+		S	
M	S.	195.0	+				+		Pl	



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.

38

## Le plastique...



39

## 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.



40

# FÈCES

41

## Analyse des fèces



- 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.

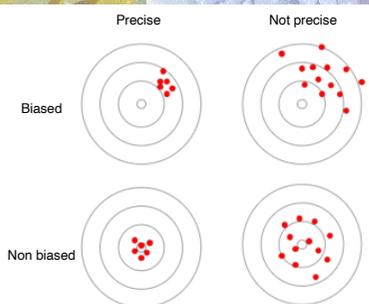
42

## Analyse des fèces

- Biais de digestibilité

43

## 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?

44

## PELOTES DE RÉJECTION

45

### 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.



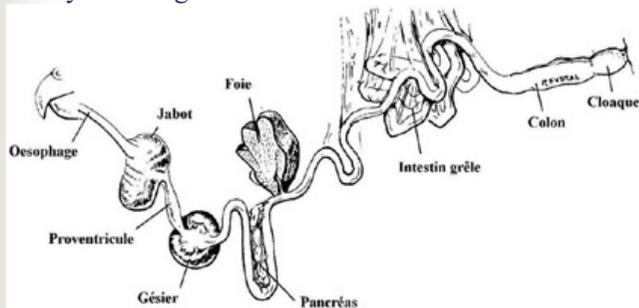
L'effraie des clochers (*Tyto alba*) est une chouette aussi couramment appelée chouette effraie.



Pelote de réjection

46

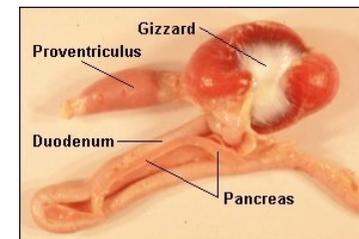
### Le système digestif



47

### 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.



48

### Le gésier

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



49

### Analyse d'une pelote de rejection

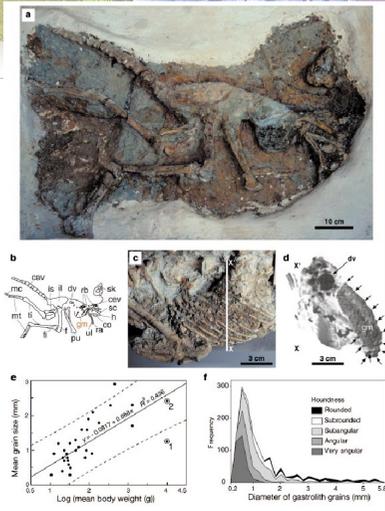


50

### Gastrolithes chez un Ornithomimid

Nature 1999

Saurischien, Théropode

51

### Utilisation particulière du gésier chez des amazones du Pérou



52

## Pourquoi manger de l'argile ?

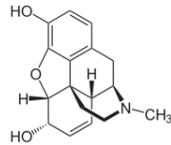


Un certain nombre de fruits possèdent un enveloppe charnue comestible mais des graines toxiques. Ainsi la plante s'assure une dispersion efficace car ses fruits sont mangés et les graines dispersées intactes. En effet, si un prédateur digère les graines, il s'intoxique.

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

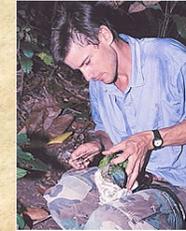
Les alcaloïdes sont des molécules organiques hétérocycliques azotées ayant souvent des actions pharmacologiques très puissantes (morphine ci-contre, strychnine).



53

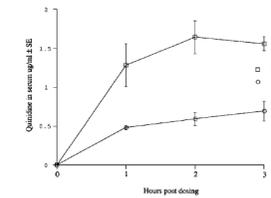
## Pourquoi manger de l'argile ?

Gilardi, J. D., S. S. Duffey, 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.

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

54

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



55

## Ou convergence ? Chez des cacatoès d'Australie



56

## 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.

57

## LES ISOTOPES STABLES

58

### 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  $^{12}\text{C}$  (6 neutrons, 6 protons),  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$
- Certains de ces isotopes sont instables, ex.  $^{14}\text{C}$ , d'autres sont stables, ex.  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  ou  $^{14}\text{N}$  et  $^{15}\text{N}$  ou  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$
- *La richesse relative en  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  ou  $^{14}\text{N}$  et  $^{15}\text{N}$  ou  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  dépend de façon complexe de l'origine du tissu en question.*

59

### Ratio isotopique

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

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

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

60

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

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

61

## Pourquoi ?

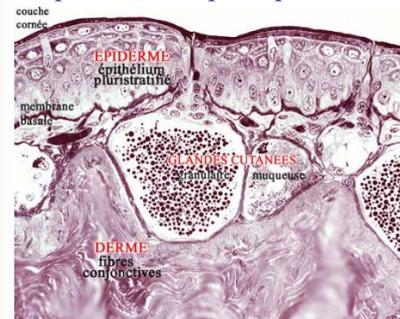
- Les amines légères (contenant du  $^{14}\text{N}$ ) sont excrétées préférentiellement lors des déaminations et transaminations des acides aminés.
  - L'azote excrété dans l'ammoniaque, l'urée et l'acide urique est donc plus léger que l'azote de l'organisme dont il provient et donc aussi des proies.
- 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.

62

## E-DNA

63

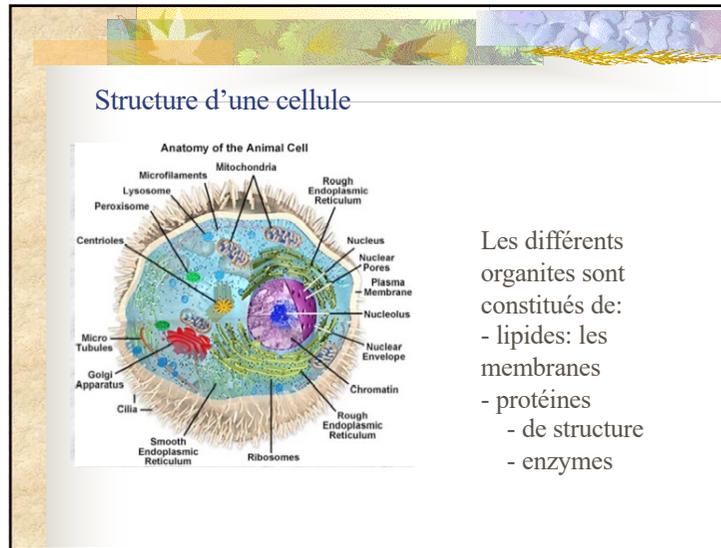
## Exemple d'une coupe de peau



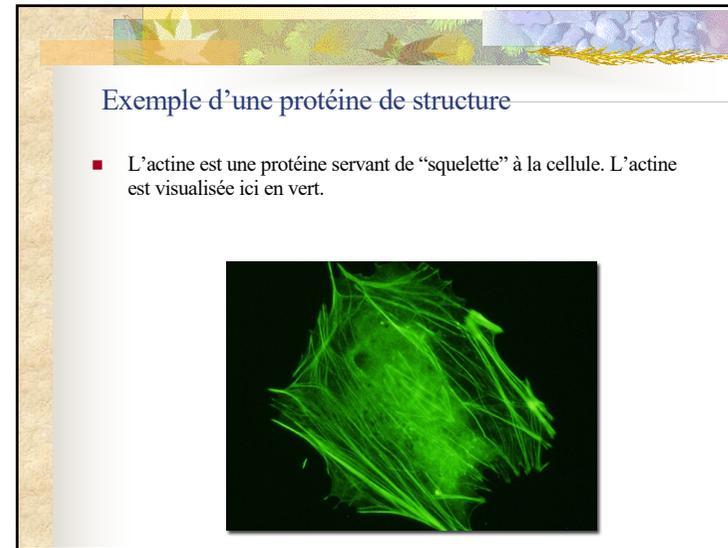
PEAU de GRENOUILLE (coupe semi-fine)

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

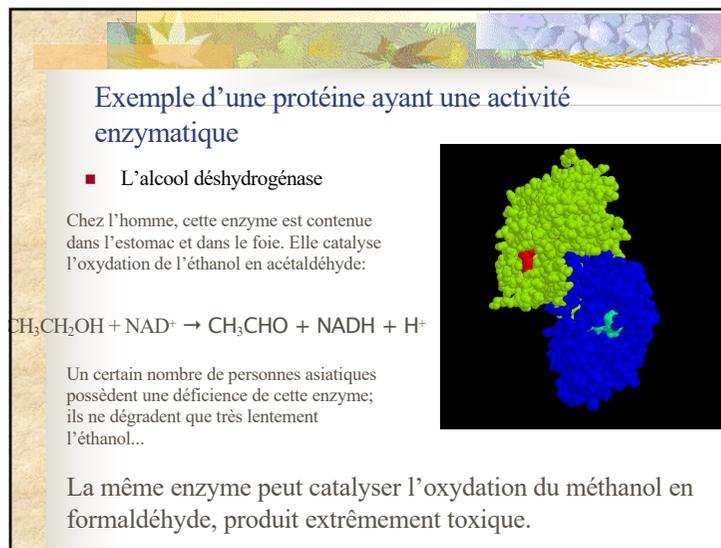
64



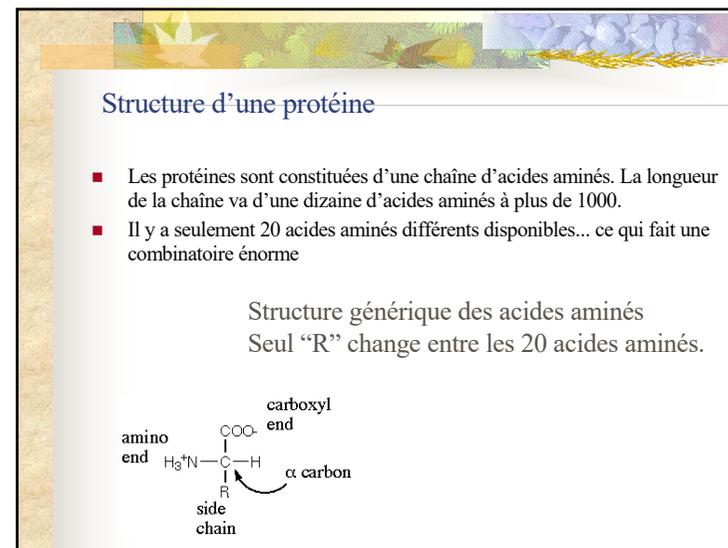
65



66

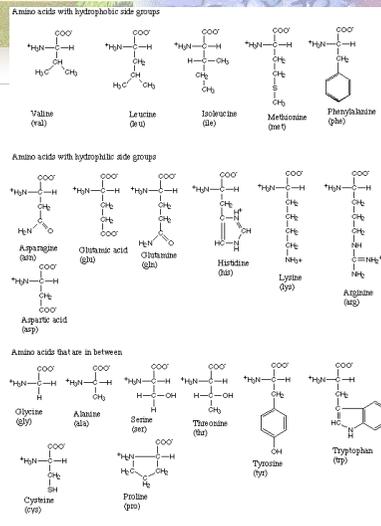


67



68

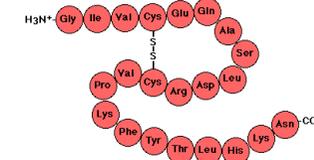
## Les acides aminés



69

## La structure primaire d'une protéine

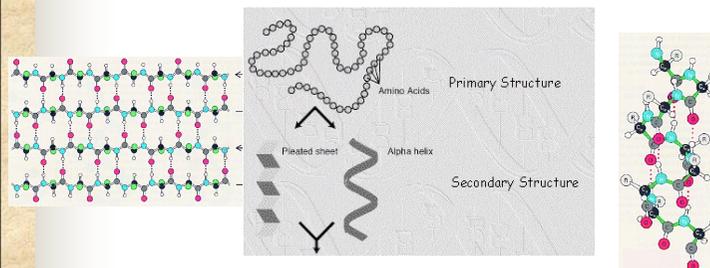
C'est simplement la suite des acides aminés.



70

## 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).



71

## 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

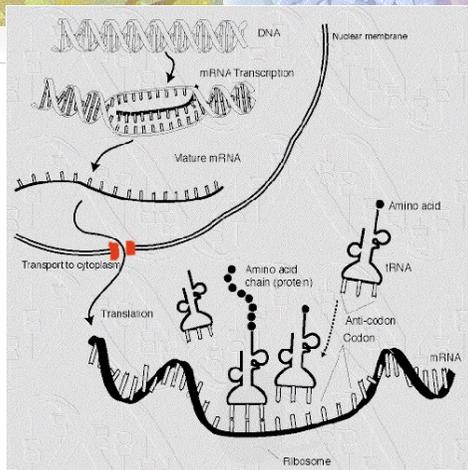


Ce sera la structure fonctionnelle de la plupart des protéines.

72



## Fabrication d'une protéine



77

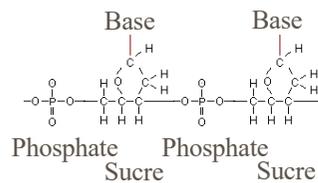
## En résumé

- 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).

78

## L'ADN

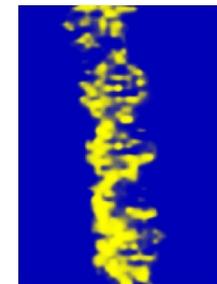
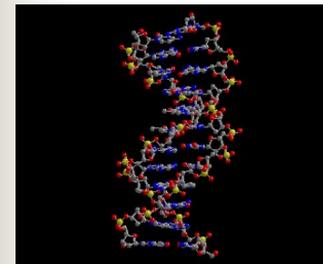
L'information génétique est présente sous la forme d'une chaîne de phosphate et sucre sur lequel sont attachés des bases A, T, G ou C.



79

## La double-hélice

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



80



## 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.



85

## 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

86

## 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 !

88



[www.dnalc.org](http://www.dnalc.org)

87



## 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.

93

## 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

94

## 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.

95

## *Rhodnius* est hémaphophage

- Les protéines des glandes salivaires sécrétées et injectées par les insectes hémaphophages 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* possèdent des gènes d' $\alpha$ -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 hémaphophages) 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 hémaphophage ?

96

## 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 amplicons<sup>1</sup> 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

97

## 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

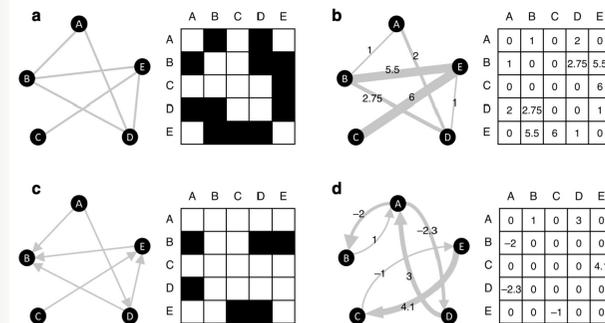
98

## 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*.

99

## Exemples de réseaux biologiques



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

100

## 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.

101

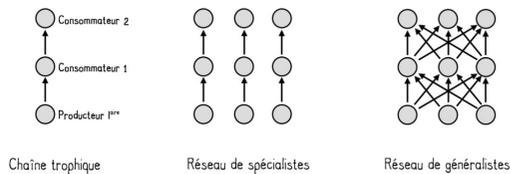
## Mesurer la complexité d'un réseau

- 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.

102

## D'une chaîne à un réseau trophique

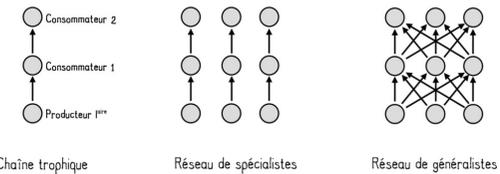
- Si l'on se contente de juxtaposer des chaînes trophiques, on obtient un réseau de «spécialistes». Chaque espèce est spécialisée dans la consommation d'une autre espèce.
- Lorsque les espèces sont généralistes (ce qui est le plus souvent le cas), le réseau est interconnecté.



103

## La connectance dans un réseau trophique

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

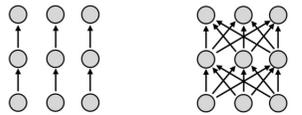


$$C = \frac{\text{nombre de connections réalisées}}{\text{nombre de connections possibles } (= N(N - 1)/2)}$$

104

## 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

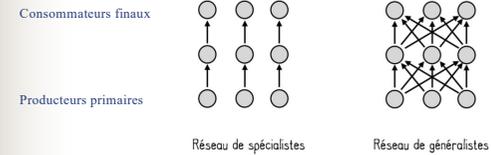
$$C = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$$

Réseau de généralistes

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

105

## Modularité



Consommateurs finaux

Producteurs primaires

Réseau de spécialistes

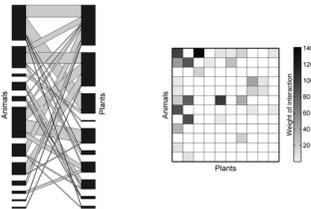
Réseau de généralistes

- 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.

106

## 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.

107

## 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.

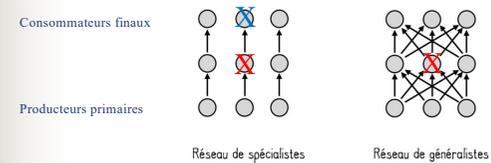
108

## 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).

109

## 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.

110

## 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 connectivité 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 connectivité C augmentent au-delà d'une valeur critique.

111

## 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 !

112