

INTERACTIONS INTERSPÉCIFIQUES

1

Définitions

Population: ensemble d'individus de la même espèce vivant au même endroit

Métapopulation: ensemble de populations échangeant des individus

Communauté: ensemble de populations d'espèces différentes vivant au même endroit

2

Le principe de l'exclusion compétitive

Figure 36.2A Competition in laboratory populations of *Paramecium*

Paramecium aurelia se nourrit plus efficacement que *paramecium caudatum* et l'élimine.

Geörgy Frantsevich Gause (russe : Георгий Францевич Гаузе né le 27 décembre 1910 et mort le 2 mai 1986), était un biologiste et évolutionniste soviétique et russe

Copyright © The Benjamin Cummings Publishing Co., Inc., from Campbell, Stenhal, Reece: *Biology: Concepts and Connections*.

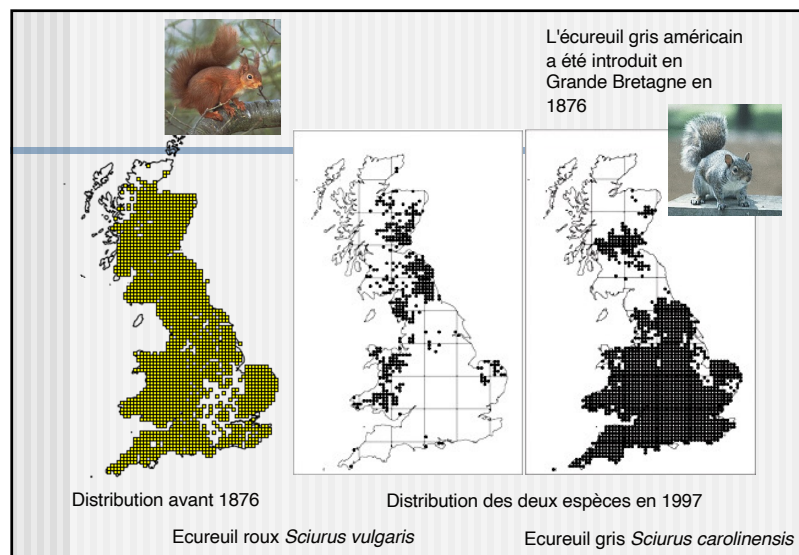
3

Compétition interspécifique - Exemple

Exclusion compétitive

Coexistence

4



5

Plan

- Interactions interspécifiques
- Dynamique de deux populations
 - Modèle de Lotka-Volterra

6

Principales relations interspécifiques

		Effet de l'espèce 2 sur l'espèce 1		
		+	0	-
Effet de l'espèce 1 sur l'espèce 2	+	Mutualisme		
	0	Commensalisme	Neutralisme	
	-	Prédation Herbivorie Parasitisme ...	Amensalisme	Compétition

7

La prédation au sens large (+ / -)

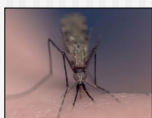
- Prédation : un animal en tue un autre et le mange
- Parasitisme
- Herbivorie
- Parasitoïdes
- Pathogènes



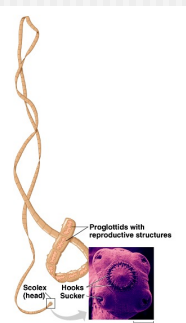
8

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

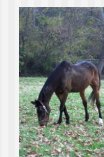
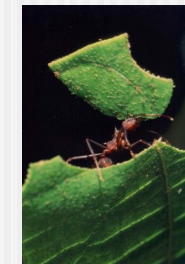


Ver solitaire : endoparasite

9

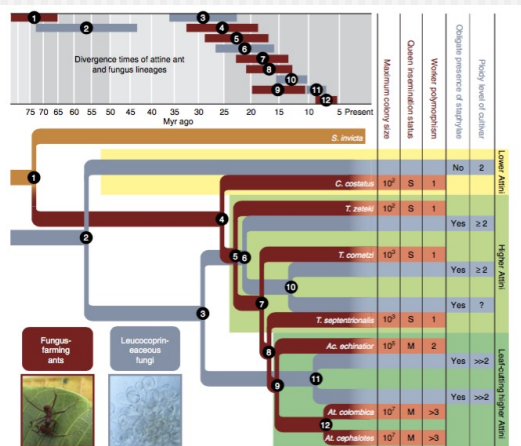
La prédation au sens large

- 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



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.

11

La prédation au sens large


- Prédation
- Parasitisme
- Herbivorie
- **Parasitoïdes** : Organisme qui se développe aux dépens d'un hôte dont il entraîne la mort
- Pathogènes



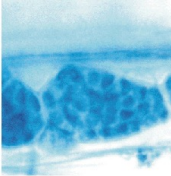
12

La prédation au sens large


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




Fusarium culmorum f. *graminearum*
(ear blight)



Soil borne cereal mosaic virus (SBCMV) / Polymyxa



Ilycosphaerella graminicola
(STR, leaf blotch)




Oculimacula yallundae
(eyespot)


Pathogènes du blé

13


a) Adaptations des prédateurs



Tortue alligator
Macrochelys temminckii




Guépards (105 km/h)



14

b) Défenses des Végétaux


Défenses chimiques



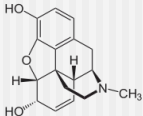
Morphine (Pavot)
Nicotine (Tabac)
Mescaline (Cactus Peyotl)

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

Défenses mécaniques



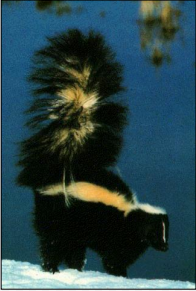
Épines
Crochets
Piquants



15


c) Défenses des Animaux

Défenses chimiques



Substance odorante (thiols)
Acide

Défenses mécaniques

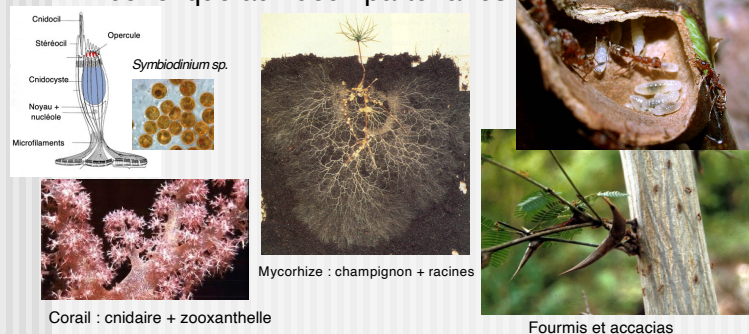


Carapace
Piquants
Dards

16

C) Mutualisme (+ / +)

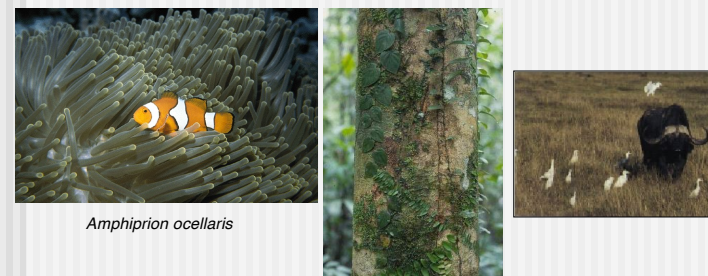
- Mutualisme : Interaction bénéfique aux deux partenaires



17

D) Commensalisme (+ / 0)

- Commensalisme : relation bénéfique pour un partenaire et neutre pour l'autre



18

Pique-bœufs sur les rhinocéros

- Les pique-bœufs ont permis aux rhinocéros de s'échapper suite à la détection des humains s'approchant vers eux dans 40 à 50 % des rencontres.
- L'appel d'alarme par les pique-bœufs a considérablement amélioré le taux et la distance à laquelle les rhinocéros ont détecté l'approche humaine de 23 % à 100 % et de 27 ± 6 m à 61 ± 4 m, respectivement. Chaque pique-bœuf supplémentaire a amélioré la distance de détection de 9 m.
- Les rhinocéros alertés par les cris d'alarme des pique-bœufs ne se sont jamais réorientés dans la direction des humains mais se sont déplacés pour faire face au vent arrière. Ainsi, les cris des pique-bœufs ne communiquent que la proximité de la menace, pas la direction, et les rhinocéros supposent que le chasseur traque sous le vent.

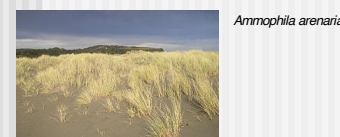


Plotz, R.D., Linklater, W.L., 2020. Oxpeckers help rhinos evade humans. *Current Biology* 30, 1965-1969 e1962.

19

E) Amensalisme (0 / -)

- Amensalisme : relation négative pour un partenaire et neutre pour l'autre
 - Le piétinement de l'oyat par les touristes sur les dunes de Bretagne est un exemple d'amensalisme. Il induit un coût important pour l'oyat qui disparaît car il ne résiste pas au piétinement, alors qu'il n'implique ni coût, ni bénéfice pour l'humain qui piétine. Cette interaction a des implications importantes car elle induit un remplacement d'espèce. En effet, l'oyat est remplacé par le Chiendent pied de poule qui résiste mieux au piétinement, mais qui n'est pas compétitif si l'oyat est présent.

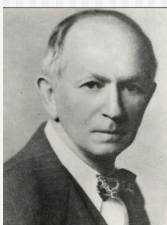


Cynodon dactylon



20

DYNAMIQUE DE DEUX POPULATIONS EN INTERACTION



Alfred James Lotka, né le 2 mars 1880 à Lemberg en Autriche-Hongrie et mort à New York le 5 décembre 1949



Vito Volterra, né le 3 mai 1860 à Ancone dans les Marches et mort le 11 octobre 1940 à Rome

21

Deux espèces en interaction

Comment modéliser deux espèces interagissant ?

Soient deux populations d'espèces différentes 1 et 2

N_1 et N_2 : les effectifs des populations 1 et 2.

K_1 et K_2 : les capacités biotiques du milieu des populations 1 et 2

r_1 et r_2 : les taux intrinsèques d'accroissement maximum pour l'espèce 1 et 2

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - N_1}{K_1} \right) \quad \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(\frac{K_2 - N_2}{K_2} \right)$$

Si la dynamique des populations ne sont pas indépendantes, on doit écrire:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = f_{12}(N_1, N_2) \\ \frac{dN_2}{dt} = f_{21}(N_1, N_2) \end{cases} \quad \text{Les fonctions } f_{12} \text{ et } f_{21} \text{ décrivent la dépendance de 1 à 2 et de 2 à 1.}$$

22

Compétition interspécifique

Soient deux populations d'espèces différentes 1 et 2 qui utilisent des ressources communes dans le même milieu

α_{12} et α_{21} : les coefficients de compétition interspécifique

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - [N_1 + \alpha_{12} N_2]}{K_1} \right) \\ \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(\frac{K_2 - [N_2 + \alpha_{21} N_1]}{K_2} \right) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Équations} \\ \text{de} \\ \text{Lotka-Volterra} \end{array}$$

Taux de croissance affecté négativement par compétition intra (logistique) et inter spécifique (α_{12} et α_{21})

23

Compétition interspécifique

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - [N_1 + \alpha_{12} N_2]}{K_1} \right) \\ \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(\frac{K_2 - [N_2 + \alpha_{21} N_1]}{K_2} \right) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Équations de} \\ \text{Lotka-Volterra} \end{array}$$

Effet pour l'espèce 1

- Si α_{12} et $\alpha_{21} = 0$ Croissance logistique
- Si α_{12} et $\alpha_{21} = 1$ Compétition interspécifique = Compétition intraspécifique
- Si $\alpha_{12} < 1$ Compétition interspécifique < Compétition intraspécifique
- Si $\alpha_{12} > 1$ Compétition interspécifique > Compétition intraspécifique

24

Compétition interspécifique

Conditions requises pour que les équations puissent représenter la situation de compétition interspécifique

- Comme pour les modèles de compétition intraspécifique :
 - Ressources limitantes
 - Identité des individus composant la population
 - Pas de migration
 - Pas de délai dans la réponse
- Constance des paramètres r , K et coefficients de compétition
- Caractère linéaire des relations intra- et interspécifiques
- Pas d'effet stochastique

25

Compétition interspécifique - modélisation

Le système est en équilibre quand la croissance des deux populations est nulle.

Soit des solutions triviales $r_1=r_2=0$ ou $N_1=N_2=0$ ou une solution non triviale :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(\frac{K_1 - N_1 - \alpha_{12} N_2}{K_1} \right) = 0 \\ \frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(\frac{K_2 - N_2 - \alpha_{21} N_1}{K_2} \right) = 0 \end{array} \right.$$

26

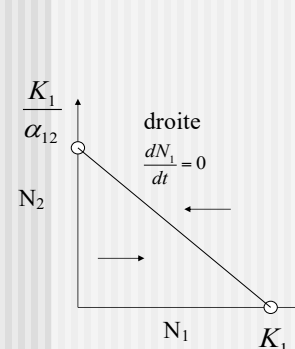
Compétition interspécifique - modélisation

On a donc deux équations de droite de N_1 en fonction N_2 (ou inversement)

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 - N_1 - \alpha_{12} N_2 = 0 \\ K_2 - N_2 - \alpha_{21} N_1 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} N_2 = \frac{K_1}{\alpha_{12}} - \frac{1}{\alpha_{12}} N_1 \\ N_1 = \frac{K_2}{\alpha_{21}} - \frac{1}{\alpha_{21}} N_2 \end{array}$$

27

Compétition interspécifique - modélisation



$$\frac{dN_1}{dt} = 0$$

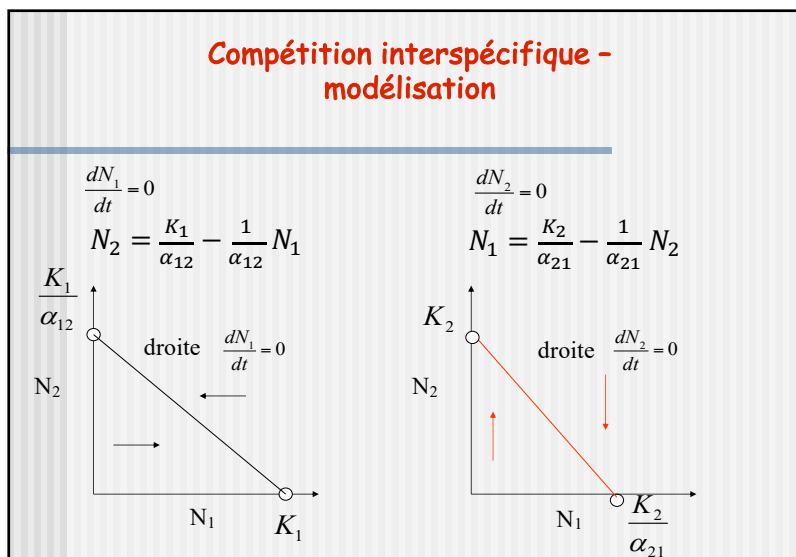
$$K_1 - N_1 - \alpha_{12} N_2 = 0$$

$$N_2 = \frac{K_1}{\alpha_{12}} - \frac{1}{\alpha_{12}} N_1$$

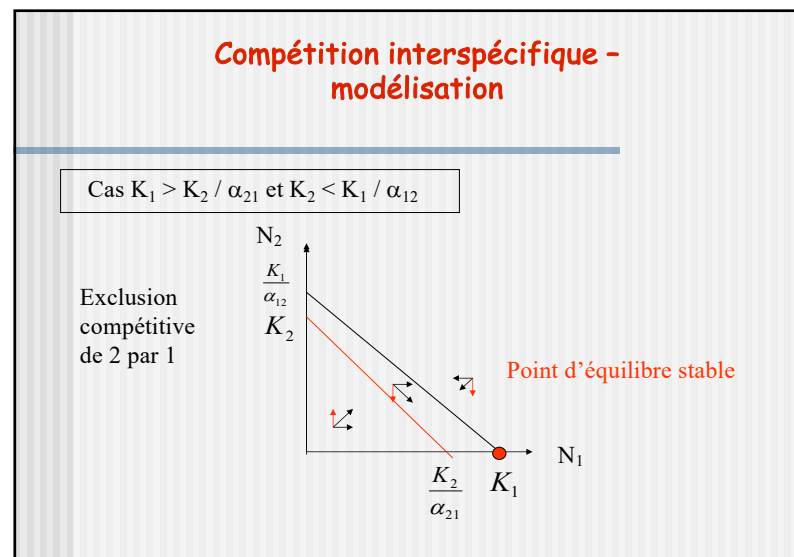
$$\text{si } N_1 = 0 \text{ alors } N_2 = \frac{K_1}{\alpha_{12}}$$

$$\text{si } N_2 = 0 \text{ alors } N_1 = \frac{K_1}{\alpha_{12}}$$

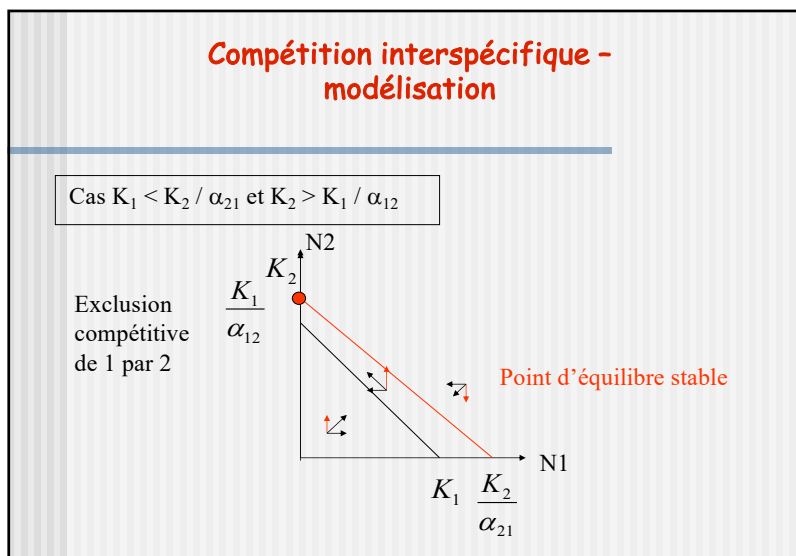
28



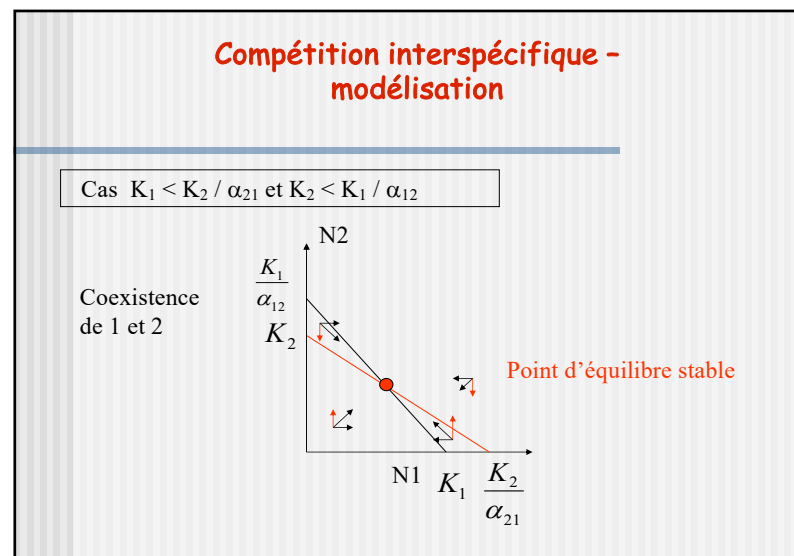
29



30



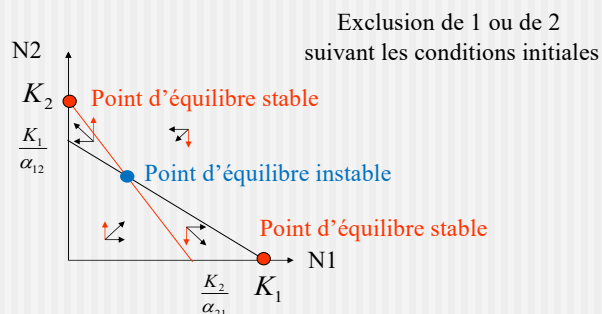
31



32

Compétition interspécifique - modélisation

Cas $K_1 > K_2 / \alpha_{21}$ et $K_2 > K_1 / \alpha_{12}$



33

Compétition interspécifique - modélisation

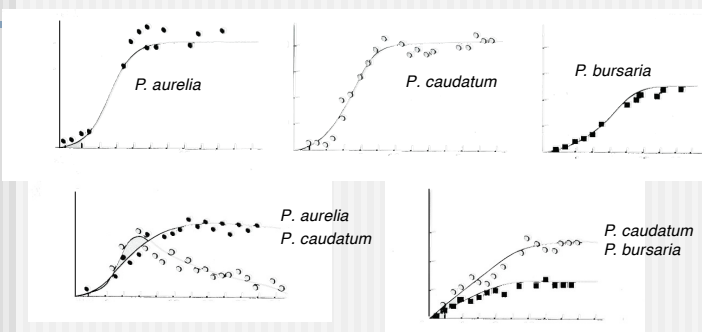
Résultats du modèle de Lotka-Volterra

- (1) **Exclusion compétitive** de l'une ou l'autre des espèces
Dépendant ou non des conditions initiales
- (2) **Coexistence** des deux espèces

Notez que le taux d'accroissement des populations (r) n'intervient pas, il ne gère que la vitesse d'atteinte de l'équilibre, pas son niveau.

34

Compétition interspécifique et niches écologiques



Coexistence si et seulement si
différentiation des niches réalisées

35

Principe d'exclusion compétitive Principe de Gause

"Si deux espèces coexistent dans un environnement stable, c'est qu'elles ont différencié leurs niches écologiques réalisées, pour ne pas partager la même"

36

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale del lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Soient deux populations d'espèces différentes X une proie et Y un prédateur. On note $X(t)$ et $Y(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t .

Si il n'y a pas d'interaction $\frac{dX}{dt} = \alpha X$ Avec $\alpha = T_{BX} - T_{DX}$

$\frac{dY}{dt} = -\gamma Y$ Avec $\gamma = T_{DY} - T_{BY}$

Notez que $\frac{dY}{dt}$ est négatif car les prédateurs n'ont rien à manger !

X est l'effectif des proies
 Y est l'effectif des prédateurs

$\alpha > 0$ est le taux de croissance intrinsèque des proies, constant et indépendant des prédateurs
 $\gamma > 0$ est le taux de décroissance intrinsèque des prédateurs, constant et indépendant des proies

37

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale del lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Soient deux populations d'espèces différentes X une proie et Y un prédateur. On note $X(t)$ et $Y(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t .

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X (T_{BX} - T_{DX} - Y T_{DX,Y}) = X (\alpha - \beta Y) \\ \frac{dY}{dt} = Y (T_{DY} - T_{BY} + X T_{BY,X}) = Y (\delta X - \gamma) \end{cases}$$

X est l'effectif des proies
 Y est l'effectif des prédateurs

$\alpha > 0$ est le taux de croissance intrinsèque des proies, constant et indépendant des prédateurs
 $\beta > 0$ est le taux de mortalité des proies dû aux prédateurs rencontrés
 $\delta > 0$ est le taux de reproduction des prédateurs en fonction des proies rencontrées et mangées
 $\gamma > 0$ est le taux de décroissance intrinsèque des prédateurs, constant et indépendant des proies

38

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale del lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Soient deux populations d'espèces différentes X une proie et Y un prédateur dans le même milieu. On note $X(t)$ et $Y(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t .

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X (\alpha - \beta Y) \\ \frac{dY}{dt} = Y (\delta X - \gamma) \end{cases}$$

X est l'effectif des proies
 Y est l'effectif des prédateurs

$\alpha > 0$ est le taux de croissance intrinsèque des proies, constant et indépendant des prédateurs
 $\beta > 0$ est le taux de mortalité des proies dû aux prédateurs rencontrés
 $\delta > 0$ est le taux de reproduction des prédateurs en fonction des proies rencontrées et mangées
 $\gamma > 0$ est le taux de décroissance intrinsèque des prédateurs, constant et indépendant des proies

39

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale del lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Soient deux populations d'espèces différentes X une proie et Y un prédateur dans le même milieu. On note $X(t)$ et $Y(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t .

A l'équilibre non trivial

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X (\alpha - \beta Y) = 0 \\ \frac{dY}{dt} = Y (\delta X - \gamma) = 0 \end{cases}$$

X est l'effectif des proies
 Y est l'effectif des prédateurs

$\alpha > 0$ est le taux de croissance intrinsèque des proies, constant et indépendant des prédateurs
 $\beta > 0$ est le taux de mortalité des proies dû aux prédateurs rencontrés
 $\delta > 0$ est le taux de reproduction des prédateurs en fonction des proies rencontrées et mangées
 $\gamma > 0$ est le taux de décroissance intrinsèque des prédateurs, constant et indépendant des proies

40

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale dei lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Soient deux populations d'espèces différentes X une proie et Y un prédateur dans le même milieu. On note $X(t)$ et $Y(t)$ le nombre de proies et de prédateurs au temps t .

$$\begin{cases} Y = 0 \\ X = 0 \end{cases}$$

ou

$$\begin{cases} \alpha - \beta Y = 0 \\ \delta X - \gamma = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha = \beta Y \\ \delta X = \gamma \end{cases} \quad \begin{cases} Y = \frac{\alpha}{\beta} \\ X = \frac{\gamma}{\delta} \end{cases}$$

X est l'effectif des proies

Y est l'effectif des prédateurs

$\alpha > 0$ est le taux de croissance intrinsèque des proies, constant et indépendant des prédateurs

$\beta > 0$ est le taux de mortalité des proies dû aux prédateurs rencontrés

$\delta > 0$ est le taux de reproduction des prédateurs en fonction des proies rencontrées et mangées

$\gamma > 0$ est le taux de décroissance intrinsèque des prédateurs, constant et indépendant des proies

41

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale dei lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

La stabilité des points fixes peut être déterminée par une linéarisation du système aux dérivées partielles. La matrice jacobienne du système est:

$$J(X(t), Y(t)) = \begin{bmatrix} \alpha - \beta Y(t) & -\beta X(t) \\ \delta Y(t) & \delta X(t) - \gamma \end{bmatrix}$$

Une matrice jacobienne est la matrice des dérivées partielles. Elle donne le sens de variation de la fonction selon les deux dimensions.

42

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale dei lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Les valeurs propres d'une matrice sont des caractéristiques de la matrice. Pour une matrice à n dimensions, il y a au maximum n valeurs propres.

Les valeurs propres sont les racines du polynôme caractéristique de la matrice. Le polynôme caractéristique P est un polynôme qui résume entièrement les caractéristiques de la matrice M .

$P_M(x) = \det(M - x \cdot I_n)$ avec I_n étant la matrice identité de taille n et \det est le déterminant de la matrice M .

Si λ est une valeur propre d'une matrice M , il existe un vecteur propre non nul \vec{x} tel que $\vec{x} \cdot M = \lambda \cdot \vec{x}$.

Pour qu'un point soit une solution d'équilibre stable, il faut que la partie réelle des valeurs propres de la matrice jacobienne soient strictement négatives.

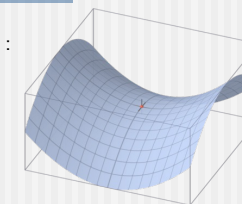
43

Modèle proie-prédateur

Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale dei lincei ser. 62: 31-113.
Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Au premier point fixe $(0,0)$, cette matrice prend la valeur :

$$J(0,0) = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$



Ces valeurs propres sont toujours de signes opposés.

Ce n'est donc pas un point fixe stable, ce qui montre en particulier que, suivant ce modèle, l'extinction des deux espèces en jeu est impossible à obtenir d'un point de vue déterministe.

Par contre, il est possible que cette solution puisse être obtenue en raison de l'influence de facteurs stochastiques.

44

Modèle proie-prédateur

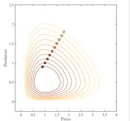
Volterra, V. 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. - Memoria della regia accademia nazionale dei lincei ser. 62: 31-113.
 Lotka, A.J. (1925) Elements of physiological biology. Baltimore, MD, USA.

Au second point fixe $(\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta})$, cette matrice jacobienne prend la valeur :

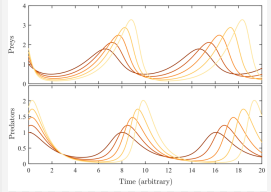
$$J \begin{pmatrix} \gamma & \alpha \\ \delta & \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\beta\gamma}{\delta} \\ \frac{\alpha\delta}{\beta} & 0 \end{pmatrix}$$

Qui a pour valeurs propres $\lambda_1 = i\sqrt{\alpha\gamma}$ et $\lambda_2 = -i\sqrt{\alpha\gamma}$

Ce point fixe est donc un foyer et plus particulièrement un centre, ce qui signifie que les populations de proies et prédateurs oscillent autour de leurs valeurs en ce point fixe.



Orbites solutions des équations de Lotka-Volterra obtenues dans les mêmes conditions. Les conditions initiales sont signalées par des cercles.



Solutions des équations de Lotka-Volterra pour une valeur de $\alpha = 2/3, \beta = 4/3, \gamma = 1, \delta = 1$, pour une gamme de conditions initiales (échelle de couleurs, du rouge au jaune clair) de 0.9 à 1.8

45

Autres modèles proies-prédateurs

- La formulation du modèle de Lotka-Volterra n'est pas la seule possible.
- Par exemple dans le modèle précédent, il n'y a pas de limite dans la croissance des proies, ce qui est peu réaliste.
- On peut rajouter une capacité de charge K pour les proies.

$$X = \alpha X \left(1 - \frac{X}{K} \right)$$

46

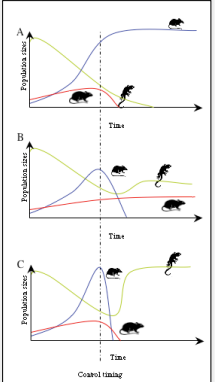
Modèle prédateur-proie à croissance logistique

- D'où le modèle:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X \left(\alpha \left(1 - \frac{X}{K} \right) - \beta Y \right) \\ \frac{dY}{dt} = Y (\delta X - \gamma) \end{cases}$$

47

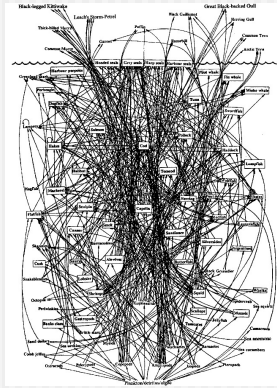
Et à plus de deux espèces ?



$$\begin{cases} \frac{dF}{dt} = r_f F \left(1 - \frac{F}{K_f} \right) - \mu_f \frac{\phi F}{\phi F + P} - EF \\ \frac{dP}{dt} = r_p P \left(1 - \frac{P}{K_p} \right) - \mu_p \frac{P}{\phi F + P} - EP - \omega P \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\mu_f \lambda_f \phi F^2 + \mu_p \lambda_p P^2}{\phi F + P} - E - \nu E - \delta E \end{cases}$$

48

Et à plus de deux espèces ?



Réseau trophique simplifié dans l'Atlantique-Nord