

Réflexions éparses sur
l'automatique
la théorie des jeux
& le vivant

Pierre Bernhard

INRIA Sophia Antipolis-Méditerranée

Séminaire d'épistémologie,
Valrose, le 12 mai 2011

Réflexions éparses sur
l'automatique
la théorie des jeux
& le vivant

Pierre Bernhard

INRIA Sophia Antipolis-Méditerranée

Et ancien professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis

Séminaire d'épistémologie,
Valrose, le 12 mai 2011

1) Une épistémologie d'automaticien

L'automatique

est l'alliance d'un art, une science, et une discipline mi-art mi-science:

- 1 l'art de construire des modèles (dynamiques) en fonction des questions qu'on veut leur poser, en ignorant les phénomènes jugés secondaires, art qui suppose une bonne connaissance de ...
- 2 la science des propriétés mathématiques des modèles dynamiques, qui fournit des réponses aux questions qu'on lui pose par des mathématiques "impures" mais rigoureuses, seules capables de dépasser le banal,
- 3 la discipline de la validation et remise en cause en tant que de besoin.

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Le paradoxe de l'automatique linéaire :

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Le paradoxe de l'automatique linéaire :

La régulation est bonne si le modèle est bon,

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Le paradoxe de l'automatique linéaire :

La régulation est bonne si le modèle est bon,
le modèle est bon si on ne s'éloigne pas trop de la nominale,

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Le paradoxe de l'automatique linéaire :

La régulation est bonne si le modèle est bon,
le modèle est bon si on ne s'éloigne pas trop de la nominale,
on ne s'éloigne pas trop de la nominale parce que la régulation est bonne.

Des modèles

en fonction des questions qu'on veut leur poser.

Modèles d'action versus modèles de connaissance

Le paradoxe de l'automatique linéaire :

La régulation est bonne si le modèle est bon,
le modèle est bon si on ne s'éloigne pas trop de la nominale,
on ne s'éloigne pas trop de la nominale parce que la régulation est bonne.

Et pourtant, ça a envoyé des hommes sur la lune !

Propriétés mathématiques des modèles

et non des objets qu'ils "modélisent".

Les mathématiques ne sont pas le langage de la nature, mais le langage dans lequel nous décrivons la nature. (Ne pas confondre la carte et le territoire. Korzybski)

Propriétés mathématiques des modèles

et non des objets qu'ils "modélisent".

Les mathématiques ne sont pas le langage de la nature, mais le langage dans lequel nous décrivons la nature. (Ne pas confondre la carte et le territoire. Korzybski)

Trois concepts de physique contestables :

- 1 Lois fondamentales de la nature expressibles en termes mathématiques
- 2 Grandeurs physiques expressibles avec des
- 3 nombres réels

Lois fondamentales de la nature

Monsieur Paréto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives . . . (L. Walras)

Lois fondamentales de la nature

Monsieur Paréto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives . . . (L. Walras)

La déraisonnable efficacité des mathématiques (E. Wigner) Pour moi, on **invente** des êtres mathématiques dont on **découvre** des propriétés.

Lois fondamentales de la nature

Monsieur Paréto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives . . . (L. Walras)

La déraisonnable efficacité des mathématiques (E. Wigner) Pour moi, on **invente** des êtres mathématiques dont on **découvre** des propriétés.

Dowek “démontre” **la mathématisabilité de la nature** à partir de la thèse de Church (et la “preuve” de R. Gandy). La tour et la balle de Dowek mettent-elles en œuvre un *algorithme* ? (Qui contredirait l’hypothèse de Gandy!).

Lois fondamentales de la nature

Monsieur Paréto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives . . . (L. Walras)

La déraisonnable efficacité des mathématiques (E. Wigner) Pour moi, on **invente** des êtres mathématiques dont on **découvre** des propriétés.

Dowek “démontre” **la mathématisabilité de la nature** à partir de la thèse de Church (et la “preuve” de R. Gandy). La tour et la balle de Dowek mettent-elles en œuvre un *algorithme* ? (Qui contredirait l’hypothèse de Gandy!).

Considérer que le “monde physique” est gouverné par des lois mathématiques relève d’un anthropocentrisme moyenâgeux. (J-L. Krivine)

Lois fondamentales de la nature

Monsieur Paréto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives . . . (L. Walras)

La déraisonnable efficacité des mathématiques (E. Wigner) Pour moi, on **invente** des êtres mathématiques dont on **découvre** des propriétés.

Dowek “démontre” **la mathématisabilité de la nature** à partir de la thèse de Church (et la “preuve” de R. Gandy). La tour et la balle de Dowek mettent-elles en œuvre un *algorithme* ? (Qui contredirait l’hypothèse de Gandy).

Considérer que le “monde physique” est gouverné par des lois mathématiques relève d’un anthropocentrisme moyenâgeux. (J-L. Krivine)

Ce qui est incompréhensible, c’est que le monde soit compréhensible (A. Einstein) Quand on a **décrit**, a-t-on **compris** ?

Grandeurs physiques

Modèle de publicité

G = “goodwill”, u = dépense publicitaire, a, b coefficients à adapter

$$\frac{dG}{dt} = -aG + bu$$

Grandeurs physiques

Modèle de publicité

G = “goodwill”, u = dépense publicitaire, a, b coefficients à adapter

$$\frac{dG}{dt} = -aG + bu$$

Pourquoi y aurait-il une différence de nature entre le concept de **masse** de la théorie mathématique du monde physique et le concept de “**goodwill**” de la théorie mathématique de la gestion ?

Grandeurs physiques

Modèle de publicité

G = “goodwill”, u = dépense publicitaire, a, b coefficients à adapter

$$\frac{dG}{dt} = -aG + bu$$

Pourquoi y aurait-il une différence de nature entre le concept de **masse** de la théorie mathématique du monde physique et le concept de “goodwill” de la théorie mathématique de la gestion ?

Deux abstractions efficaces que nous représentons par un **nombre réel**.

Nombres réels

une construction trop riche pour représenter le monde physique.

Preuve : le paradoxe de Banach-Tarsky (possibilité de construire des ensembles non mesurables).

Nombres réels

une construction trop riche pour représenter le monde physique.

Preuve : le paradoxe de Banach-Tarsky (possibilité de construire des ensembles non mesurables).

Probabilités : une construction trop riche pour représenter l'incertain, (diffusion comme modèle de phénomènes physiques ?) dont la difficulté technique est excessive au regard de l'incertain qu'on veut modéliser.

(Espérance conditionnelle = dérivée de Radon-Nikodym ???)

Nombres réels

une construction trop riche pour représenter le monde physique.

Preuve : le paradoxe de Banach-Tarsky (possibilité de construire des ensembles non mesurables).

Probabilités : une construction trop riche pour représenter l'incertain, (diffusion comme modèle de phénomènes physiques ?) dont la difficulté technique est excessive au regard de l'incertain qu'on veut modéliser.
(Espérance conditionnelle = dérivée de Radon-Nikodym ???)

Mais on n'a pas su faire mieux !

Des tentatives de faire **sans** les probabilités

- 1 La théorie de la viabilité (Aubin et al. Voir Aubin : “La mort du devin et l’émergence du demiurge”),
- 2 les modèles fractals,
- 3 mon approche non stochastique du pricing d’option, (mon “modèle à intervalles” n’implique rien sur des “effets moyens”),
- 4 etc ...

2) Théorie des jeux

Une ambiguïté fondamentale

- Une branche de la théorie économique ? “Theory of games **and economic behaviour**”, (J. von Neumann & O. Morgenstern, R. Aumann), qui cherche à **expliquer**, voire **prédire** le comportement des agents économiques,

- une branche de la théorie (mathématique) de l’optimisation ? (S. Sorin) qui définit, analyse et calcule des équilibres.

Une ambiguïté fondamentale

- Une branche de la théorie économique ? “Theory of games **and economic behaviour**”, (J. von Neumann & O. Morgenstern, R. Aumann), qui cherche à **expliquer**, voire **prédire** le comportement des agents économiques,

M. Pareto croit que le but de la science est de se rapprocher de plus en plus de la réalité par des approximations successives. Et moi je crois que le but final de la science est de rapprocher la réalité d'un certain idéal; et c'est pourquoi je formule cet idéal.

L. Walras

- une branche de la théorie (mathématique) de l'optimisation ? (S. Sorin) qui définit, analyse et calcule des équilibres.

L'échec du programme de Von Neumann et Morgenstern

ou : pourquoi les crises ?

Programme : fonder la science économique sur des bases axiomatiques pour développer une théorie aussi solide que la physique. (En partant de la micro-économie.)

L'échec du programme de Von Neumann et Morgenstern

ou : pourquoi les crises ?

Programme : fonder la science économique sur des bases axiomatiques pour développer une théorie aussi solide que la physique. (En partant de la micro-économie.)

Fondements :

- 1 Les axiomes de rationalité
- 2 La théorie (mathématique) des jeux

L'échec du programme de Von Neumann et Morgenstern

ou : pourquoi les crises ?

Programme : fonder la science économique sur des bases axiomatiques pour développer une théorie aussi solide que la physique. (En partant de la micro-économie.)

Fondements :

- 1 Les axiomes de rationalité
- 2 La théorie (mathématique) des jeux

Tentatives :

Rationalité limitée
Raffinements

Rationalité ?

Les pirates Une bande de 25 pirates a trouvé une malle de louis d'or. Ils doivent se les partager. Voici la règle retenue.

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

Rationalité ?

Les pirates Une bande de 25 pirates a trouvé une malle de louis d'or. Ils doivent se les partager. Voici la règle retenue.

Le plus ancien proposera un partage. Puis tous voteront. S'il a au moins 50% des voix pour, ce partage sera retenu. Si non ...

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

Rationalité ?

Les pirates Une bande de 25 pirates a trouvé une malle de louis d'or. Ils doivent se les partager. Voici la règle retenue.

Le plus ancien proposera un partage. Puis tous voteront. S'il a au moins 50% des voix pour, ce partage sera retenu. Si non . . .

Si non, il sera "éliminé", et on recommencera suivant la même règle avec les pirates restants,

et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un partage soit accepté.

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

Rationalité ?

Les pirates Une bande de 25 pirates a trouvé une malle de louis d'or. Ils doivent se les partager. Voici la règle retenue.

Le plus ancien proposera un partage. Puis tous voteront. S'il a au moins 50% des voix pour, ce partage sera retenu. Si non ...

Si non, il sera "éliminé", et on recommencera suivant la même règle avec les pirates restants,

et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un partage soit accepté.

Quel est le partage "rationnel" à proposer si **de notoriété publique, tous les pirates sont parfaitement rationnels ?**

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

Rationalité !

Le plus ancien devrait classer les pirates par ordre d'âge, puis offrir **un louis** à chaque pirate de rang impair, **rien** aux autres, et garder **tout le reste pour lui** !!! Et ceux qui ont reçu un louis devraient **voter pour** !

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

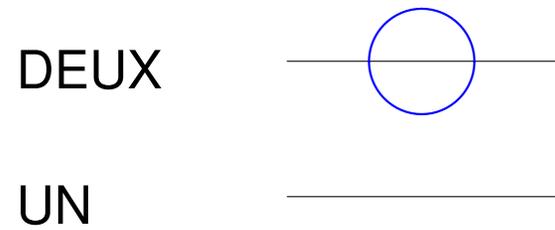
Rationalité !

Le plus ancien devrait classer les pirates par ordre d'âge, puis offrir **un louis** à chaque pirate de rang impair, **rien** aux autres, et garder **tout le reste pour lui** !!! Et ceux qui ont reçu un louis devraient **voter pour** !

Il prend un risque au cas où certains pirates ne seraient pas complètement rationnels, ou douterait que les autres le fussent!

Un exemple emprunté à Hervé Moulin

Des pirates rationnels



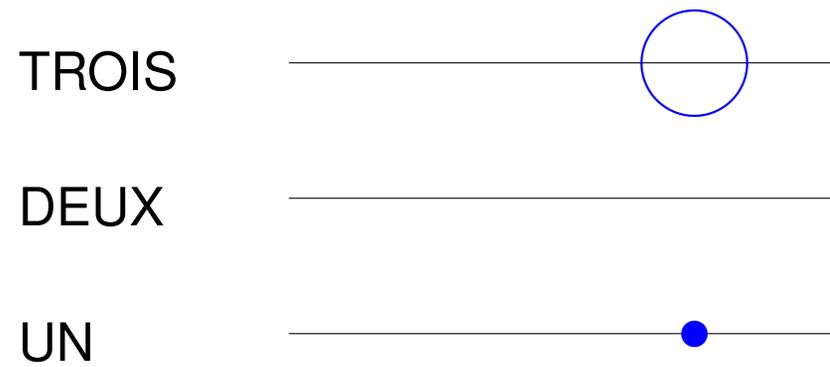
Des pirates rationnels

TROIS _____

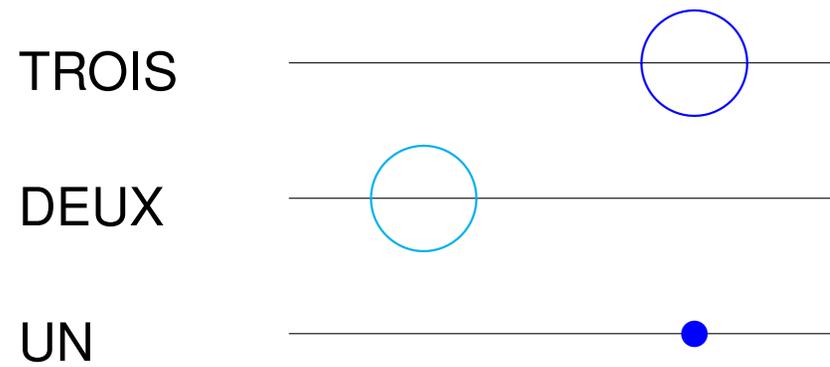
DEUX _____

UN _____

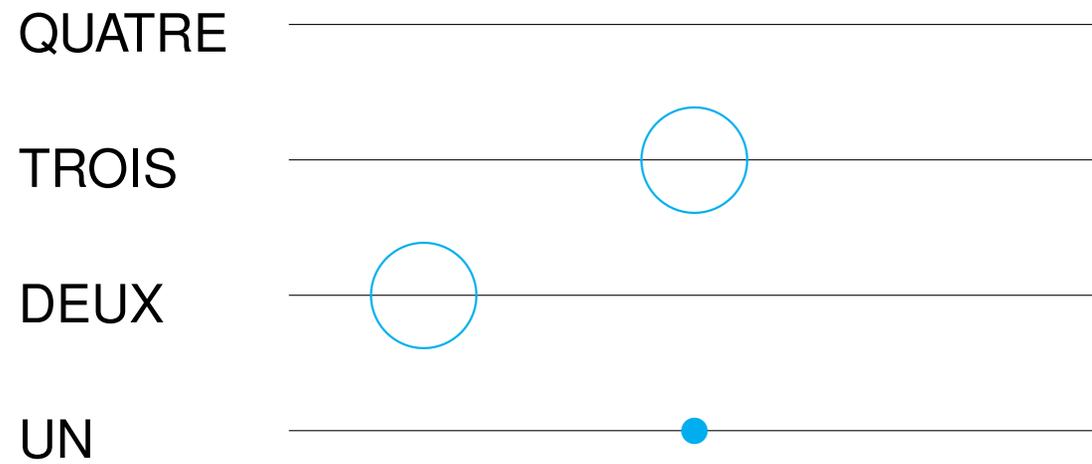
Des pirates rationnels



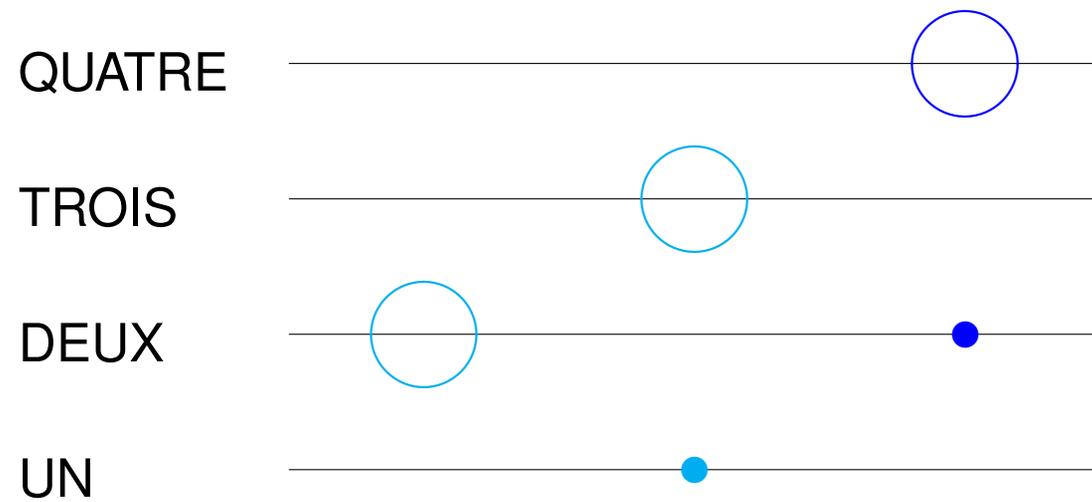
Des pirates rationnels



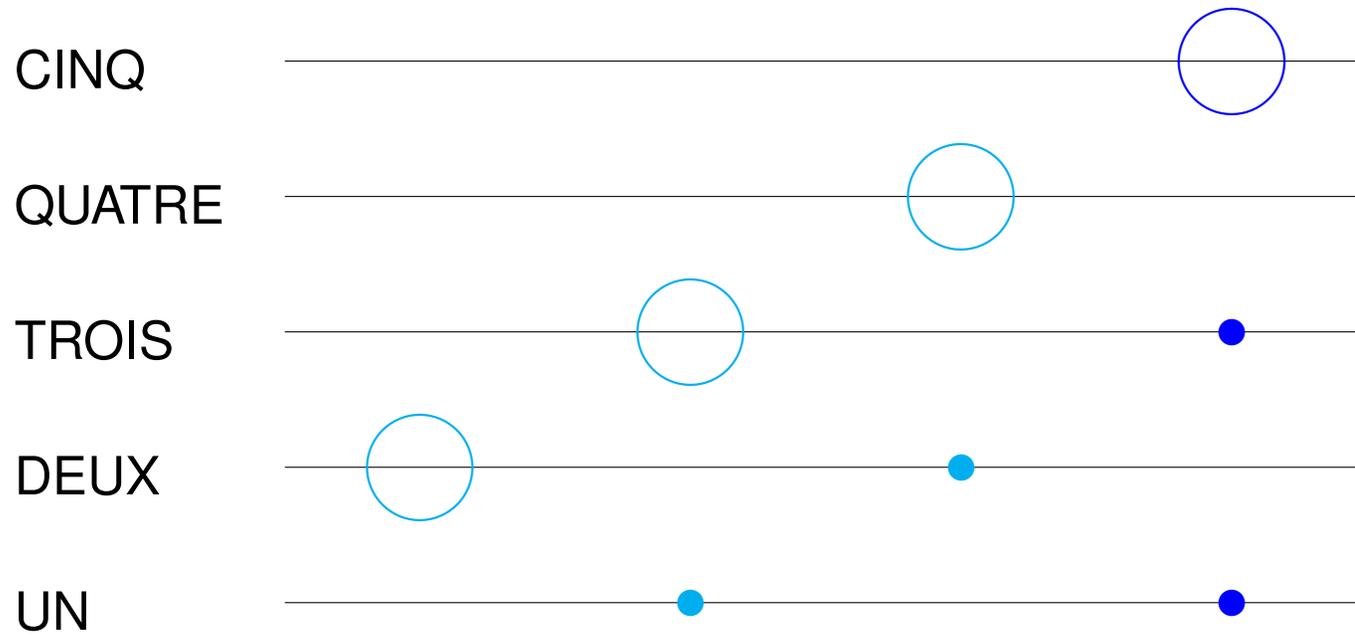
Des pirates rationnels



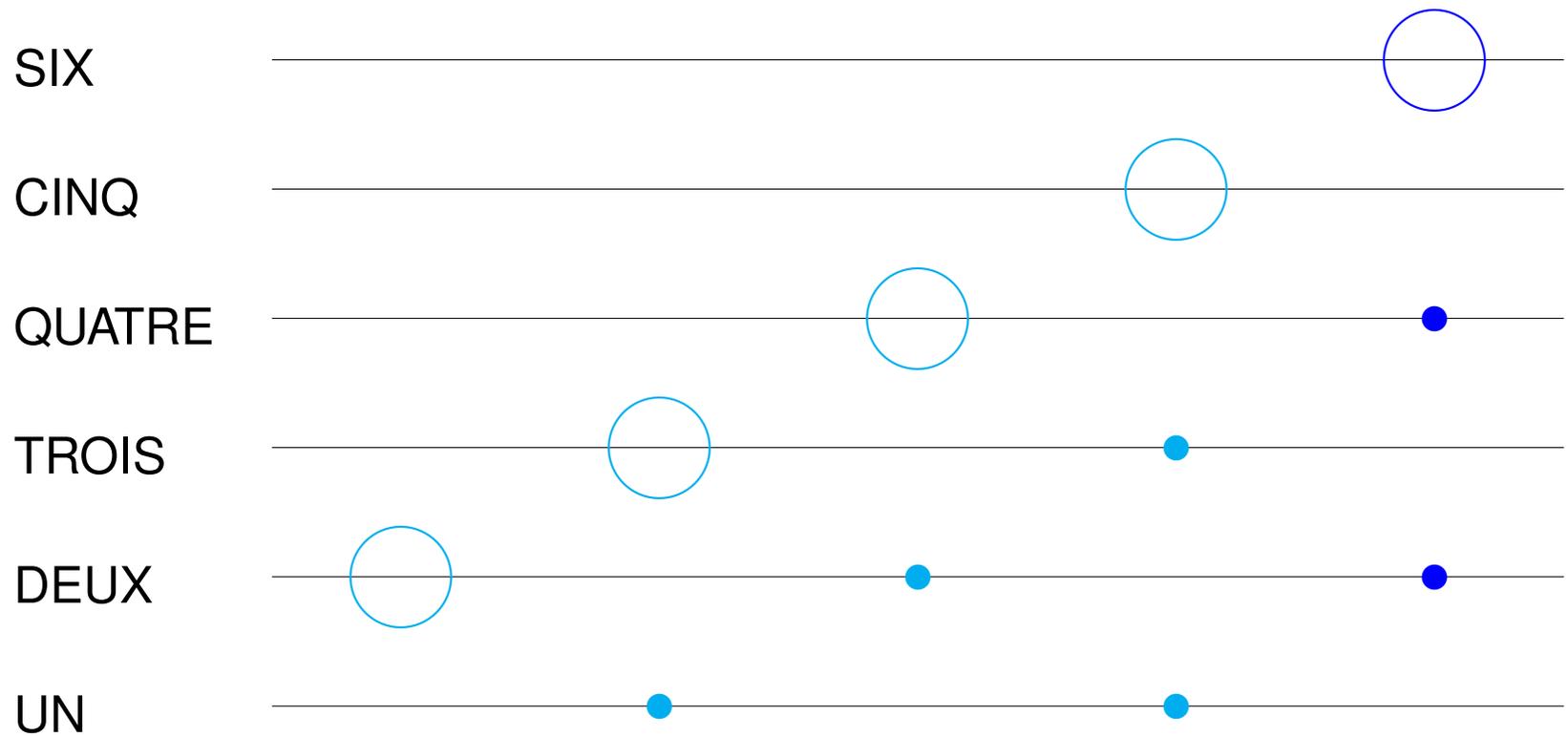
Des pirates rationnels



Des pirates rationnels



Des pirates rationnels



Discours sur l'origine et les fondements de l'inégalité parmi les hommes

Voilà comment les hommes purent insensiblement acquérir quelque idée grossière des engagements mutuels, et de l'avantage de les remplir, mais seulement autant que pouvait l'exiger l'intérêt présent et sensible; car la prévoyance n'était rien pour eux, et loin de s'occuper d'un avenir éloigné, ils ne songeaient pas même au lendemain. S'agissait-il de prendre un cerf, chacun sentait bien qu'il devait pour cela garder fidèlement son poste; mais si un lièvre venait à passer à la portée de l'un d'eux, il ne faut pas douter qu'il ne le poursuivît sans scrupule, et qu'ayant atteint sa proie il ne se souciât fort peu de faire manquer la leur à ses compagnons.

J-J. Rousseau, 1755

Cerf et lièvre

	c	ℓ
c	10	0
ℓ	1	1

Cerf et lièvre

	c	ℓ
c	10	0
ℓ	1	1

Cerf et lièvre

	c	ℓ
c	10	0
ℓ	1	1

Cerf et lièvre

	c 0,1	ℓ 0,9	
c 0,1	10	0	1
ℓ 0,9	1	1	1
	1	1	

Cerf et lièvre

	c 0,1	ℓ 0,9	
c 0,1	10	0	1
ℓ 0,9	1	1	1
	1	1	

Trois équilibres de Nash pour un jeu 2×2 .

Cerf et lièvre

		c 0,1	ℓ 0,9	
c 0,1	10	10	0	1
ℓ 0,9	1	0	1	1
	1	1		

Trois équilibres de Nash pour un jeu 2×2 .

Pour beaucoup de modèles économiques, on trouve **une infinité** d'équilibres.

Lequel faut-il croire ?

Raffinements de l'équilibre de Nash

Demander une ou des propriétés supplémentaires à l'équilibre de Nash pour être un **bon** modèle de comportement économique ?

Raffinements de l'équilibre de Nash

Demander une ou des propriétés supplémentaires à l'équilibre de Nash pour être un **bon** modèle de comportement économique ?

Il y a autant de raffinements que d'auteurs ...

Raffinements de l'équilibre de Nash

Demander une ou des propriétés supplémentaires à l'équilibre de Nash pour être un **bon** modèle de comportement économique ?

Il y a autant de raffinements que d'auteurs ...

... et aucun ne marche. (Jamais existence et unicité.)

Raffinements de l'équilibre de Nash

Demander une ou des propriétés supplémentaires à l'équilibre de Nash pour être un **bon** modèle de comportement économique ?

Il y a autant de raffinements que d'auteurs ...

... et aucun ne marche. (Jamais existence et unicité.)

“Ce n'est pas bâtir une maison sur le sable, mais un château dans les nuages” Ken Binmore

Raffinements de l'équilibre de Nash

Demander une ou des propriétés supplémentaires à l'équilibre de Nash pour être un **bon** modèle de comportement économique ?

Il y a autant de raffinements que d'auteurs ...

... et aucun ne marche. (Jamais existence et unicité.)

“Ce n'est pas bâtir une maison sur le sable, mais un château dans les nuages” Ken Binmore

Populations de joueurs et des modèles de “jeux évolutionnaires”. (Élimine l'équilibre mixte de cerf et lièvre.)

3) Applications en biologie

Écologie comportementale

La pression sélective de l'évolution doit avoir sélectionné des espèces dont le comportement est optimal du point de vue de l'efficacité reproductive, sous peine d'être éliminées par une population mutante plus efficace.

Exemples (fameux) :

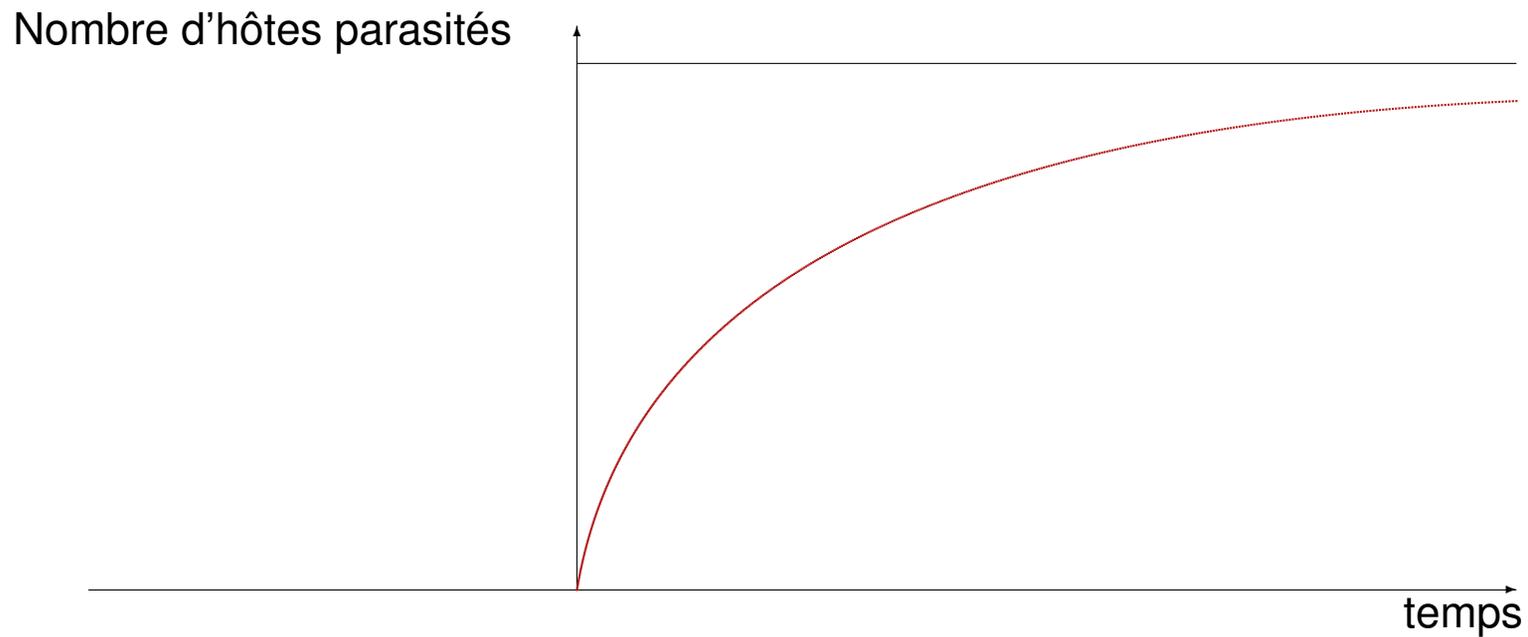
- Optimal sex ratio (W.D. Hamilton, 1967)
- Optimal foraging (E. Charnov, 1974)

Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)

Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)



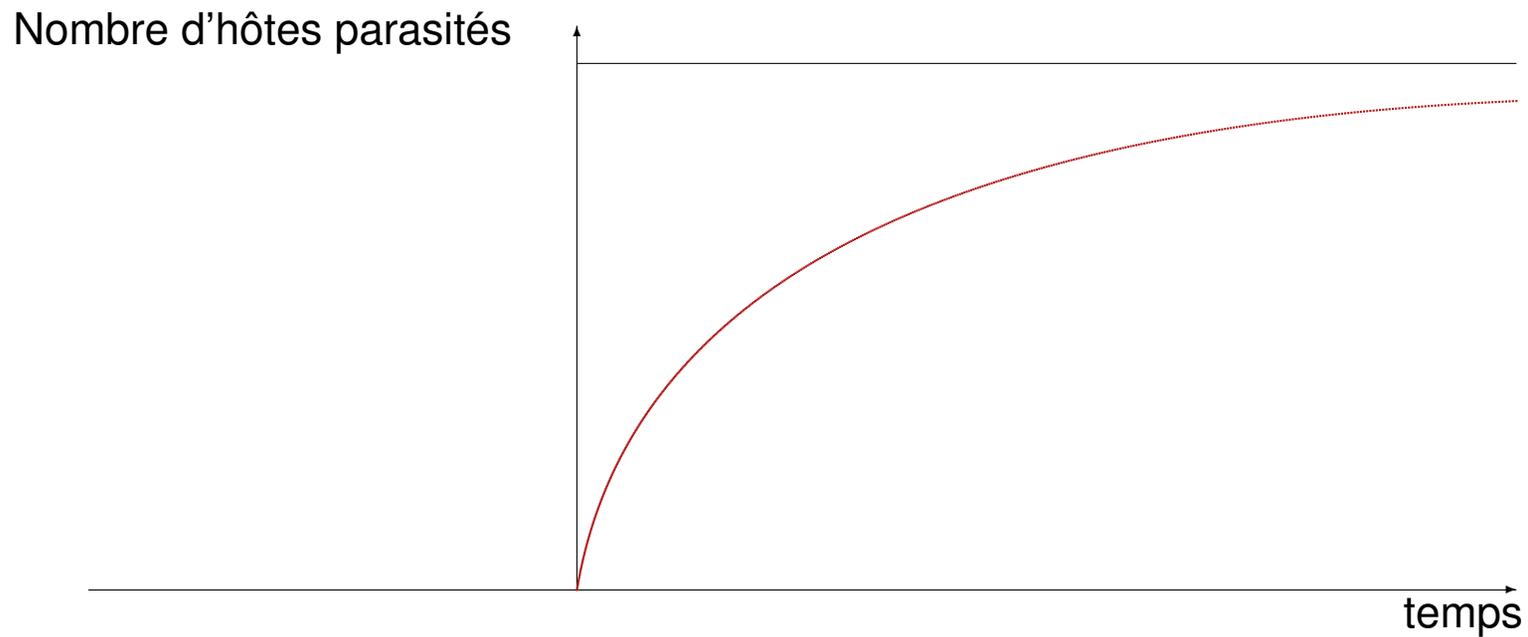
Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)

Quelle proportion d'hôtes (œufs de pyrale) la trichogramme laissera-t-elle non parasités sur une ooplaque ? \Rightarrow un problème d'optimisation ...

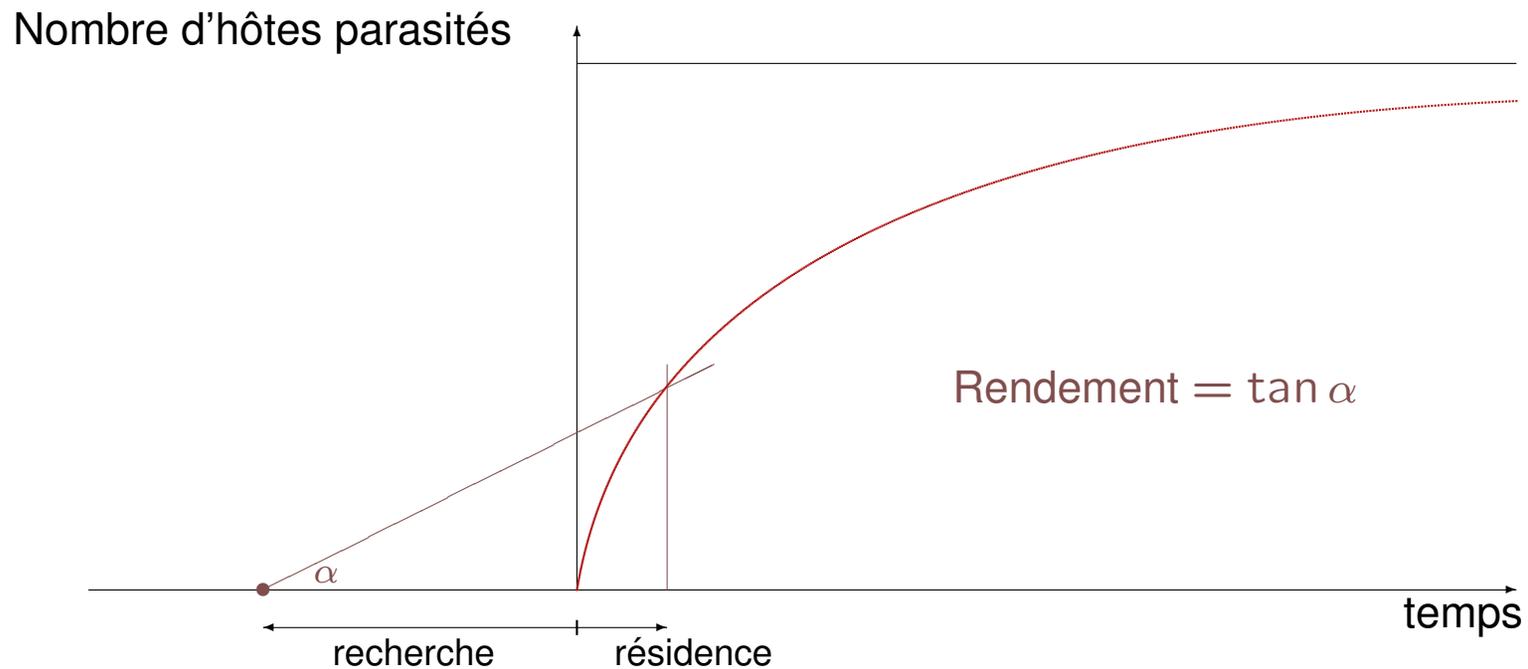
Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)



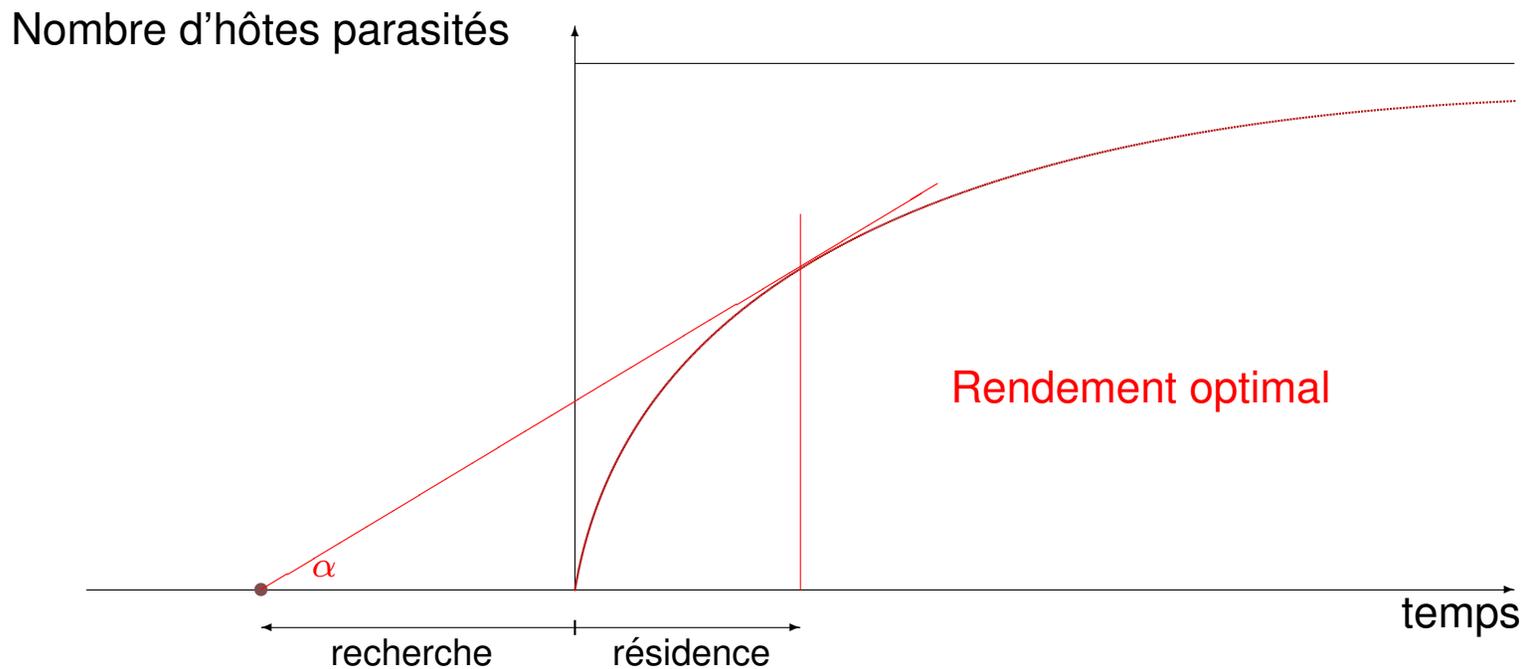
Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)



Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)



Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)

Quelle proportion d'hôtes (œufs de pyrale) la trichogramme laissera-t-elle non parasités sur une ooplaque ? \Rightarrow un problème d'optimisation ...

au cours d'une vie finie ? \Rightarrow d'optimisation dynamique ... et un succès prédictif

Optimal foraging

Exemple le couple Pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) vs les trichogrammes (*Trichogramma brassicæ*)

Quelle proportion d'hôtes (œufs de pyrale) la trichogramme laissera-t-elle non parasités sur une ooplaque ? \Rightarrow un problème d'optimisation ...

au cours d'une vie finie ? \Rightarrow d'optimisation dynamique ... et un succès **prédictif**

en dépit de la présence, actuelle ou éventuelle, de congénères ? \Rightarrow un **problème de jeux dynamiques (difficile !)**

Biologie évolutive

Dans une même population co-existent des individus agressifs (“faucons”) et des individus pacifiques (“colombes”).

Question : Comment expliquer cela ?

Biologie évolutive

Dans une même population co-existent des individus agressifs (“faucons”) et des individus pacifiques (“colombes”).

Question : Comment expliquer cela ?

Réponse : ce qui est optimisé par l'évolution n'est pas l'**optimum collectif**, mais l'**optimum individuel** de chaque individu au sein de la population.

Biologie évolutive

Dans une même population co-existent des individus agressifs (“faucons”) et des individus pacifiques (“colombes”).

Question : Comment expliquer cela ?

Réponse : ce qui est optimisé par l'évolution n'est pas l'**optimum collectif**, mais l'**optimum individuel** de chaque individu au sein de la population.

C'est un problème de théorie des jeux : comprendre l'effet **collectif** de comportements **individuellement** optimaux : **équilibre de Wardrop** (transport), ou **E.S.S.** (biologie).

Faucons et colombes : le modèle

Quand deux individus sont confrontés pour saisir une même proie, résultat suivant le comportement pacifique (“colombe”) ou agressif (“faucon”) de chaque :

1 \ 2	<i>c</i>	<i>f</i>
<i>c</i>	0,5	0
<i>f</i>	0	$-\theta$

$\theta > 0$ pour $\theta\alpha\nu\alpha\tau\omicron\varsigma$, le risque de mort qui diminue la “fitness” (efficacité reproductive).

Faucons et colombes : l'analyse

Quand deux individus sont confrontés pour saisir une même proie, résultat suivant le comportement pacifique (“colombe”) ou agressif (“faucon”) de chaque.

1 \ 2	<i>c</i>	<i>f</i>
<i>c</i>	0,5	0
<i>f</i>	0	$-\theta$

$\theta > 0$ pour $\theta\alpha\nu\alpha\tau\omicron\varsigma$, le risque de mort qui diminue la “fitness” (efficacité reproductive).

Faucons et colombes : l'analyse

Quand deux individus sont confrontés pour saisir une même proie, résultat suivant le comportement pacifique (“colombe”) ou agressif (“faucon”) de chaque.

1 \ 2	<i>c</i>	<i>f</i>
<i>c</i>	0,5	0
<i>f</i>	0	$-\theta$

$\theta > 0$ pour $\theta\alpha\nu\alpha\tau\omicron\varsigma$, le risque de mort qui diminue la “fitness” (efficacité reproductive).

Faucons et colombes : l'analyse

Si la population est constituée de (beaucoup plus de) “colombes”, les “faucons” auront un avantage reproductif, leur proportion dans la population croîtra. Au contraire, s'il y a beaucoup de “faucons”, les “colombes” auront un avantage reproductif, leur proportion croîtra.

Faucons et colombes : l'analyse

Si la population est constituée de (beaucoup plus de) “colombes”, les “faucons” auront un avantage reproductif, leur proportion dans la population croîtra. Au contraire, s’il y a beaucoup de “faucons”, les “colombes” auront un avantage reproductif, leur proportion croîtra.

Dans une population *polymorphe* (mélangée), avec une proportion p de “colombes” et $1-p$ de “faucons”, chaque individu rencontre des “colombes” ou des “faucons” dans les mêmes proportions de ses rencontres, ou avec ces probabilités à chaque rencontre. Il est confronté à une *stratégie mixte* de la population.

Faucons et colombes : l'équilibre

D'après l'analyse précédente, si la proportion p de “colombes” est grande, elle aura tendance à décroître, si p est petite, elle aura tendance à croître.

L'équilibre sera atteint quand les “faucons” et les “colombes” auront la même “fitness”, soit pour une proportion p de “colombes” telle que

$$0,5p = p - \theta(1 - p),$$

soit $p = \theta / (0,5 + \theta)$. C'est la **stratégie évolutionnairement stable**.

Jeux de population

L'interprétation des probabilités en fractions de la population totale donne un sens concret à la notion de stratégie mixte.

C'est aussi la probabilité qu'un individu "tiré au hasard" (sous entendu : avec une probabilité uniforme) soit du type considéré.

Jeux de population

L'interprétation des probabilités en fractions de la population totale donne un sens concret à la notion de stratégie mixte.

C'est aussi la probabilité qu'un individu "tiré au hasard" (sous entendu : avec une probabilité uniforme . . . dans une population discrète infinie ?) soit du type considéré.

Jeux évolutifs

Objectif : imaginer un processus d'évolution des populations, et vérifier que ce processus conduit à un E.S.S.

Si la "fitness" mesure l'excès des naissances sur les morts par individu :
 $\dot{n}_i/n_i = F_i(q)$, $q_i = n_i/(\sum_j n_j)$, conduit à la **dynamique de réplication**,

$$\dot{q}_i = q_i[F_i(q) - \sum_j q_j F_j(q)],$$

Jeux évolutionnaires

Objectif : imaginer un processus d'évolution des populations, et vérifier que ce processus conduit à un E.S.S.

Si la “fitness” mesure l'excès des naissances sur les morts par individu : $\dot{n}_i/n_i = F_i(q)$, $q_i = n_i/(\sum_j n_j)$, conduit à la **dynamique de réplication**,

$$\dot{q}_i = q_i [F_i(q) - \sum_j q_j F_j(q)],$$

qui partage avec d'autres dynamiques la propriété que

- 1 Tous les points limites sont des équilibres de Wardrop,

Jeux évolutionnaires

Objectif : imaginer un processus d'évolution des populations, et vérifier que ce processus conduit à un E.S.S.

Si la “fitness” mesure l'excès des naissances sur les morts par individu : $\dot{n}_i/n_i = F_i(q)$, $q_i = n_i/(\sum_j n_j)$, conduit à la **dynamique de réplication**,

$$\dot{q}_i = q_i[F_i(q) - \sum_j q_j F_j(q)],$$

qui partage avec d'autres dynamiques la propriété que

- 1 Tous les points limites sont des équilibres de Wardrop,
- 2 Les E.S.S. sont localement asymptotiquement stables (et on sait des choses sur leur bassin d'attraction \Rightarrow un E.S.S. “complètement mixte” est unique.)

So what ?

Quel est le statut de cette “biologie mathématique” ?

So what ?

Quel est le statut de cette “biologie mathématique” ?

Écologie comportementale :

- 1 Guide pour l'observation,

So what ?

Quel est le statut de cette “biologie mathématique” ?

Écologie comportementale :

- 1 Guide pour l'observation,
- 2 Test de pertinence des phénomènes retenus dans le modèle,

So what ?

Quel est le statut de cette “biologie mathématique” ?

Écologie comportementale :

- 1 Guide pour l'observation,
- 2 Test de pertinence des phénomènes retenus dans le modèle,
- 3 Détecteur de différences cachées.

So what ?

Quel est le statut de cette “biologie mathématique” ?

Écologie comportementale :

- 1 Guide pour l’observation,
- 2 Test de pertinence des phénomènes retenus dans le modèle,
- 3 Détecteur de différences cachées.

Biologie évolutive :

On comprend peut-être mieux comment les choses ont pu se passer ...
Des paradoxes comme le “principe du handicap” demandent une explication rationnelle, sauf à alimenter le créationnisme !

Je vous remercie

de votre attention.

Je vous remercie

OUF !

de votre attention.