

Biologie de la Conservation

quelques exemples de problématiques
impliquant la modélisation de systèmes ou
processus biologiques

A. Robert, MNHN, UMR 7204

Introduction

UMR 7204. Conservation de Espèces, Restauration et Suivi des Populations

Thème général : fondements écologiques de la gestion de la biodiversité'

mécanismes
et contraintes
écologiques



interaction avec
d'autres disciplines
(économie,
anthropologie...)



objectifs et
méthodes de
gestion

Introduction

Quelques exemples de modèles développés récemment

Plan?

Introduction

Quelques exemples de modèles développés récemment

Plan?

 Système modélisé? (population, communauté d'espèces...)

 Unité de structuration du modèle? (population-centré, individu-centré...)

 Processus modélisés? (démographie, génétique, comportement...)

Introduction

Quelques exemples de modèles développés récemment

Plan

- 1) modèles classe-centrés
- 2) modèles individu-centrés
- 3) modèles patch-centrés
- 4) modèles espèce-centrés
- 5) plein d'autres modèles dont je n'ai pas parlés
- 6) conclusions, problèmes, perspectives

1) modèles classe-centrés

-Modèles de populations (1 espèce)

$$\begin{pmatrix} \text{Vecteur} \\ \text{effectif} \end{pmatrix} (t+1) = \begin{pmatrix} \text{Matrice} \\ \text{de} \\ \text{transition} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Vecteur} \\ \text{effectif} \end{pmatrix} (t)$$

-Contraintes liées aux données, aux organismes étudiés

-Modèles en temps discrets

-Pas de temps annuel

-Cycles de vie femelle

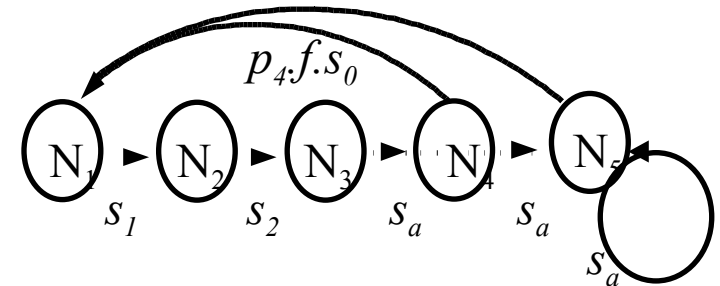


$p_5 \cdot f \cdot s_0$

0001101100100
0110110011001
0000100010000
0001110101101



$S_0 = 0.85$
 $S_1 = \dots$
 $F = \dots$



1) modèles classe-centrés

-Equilibre démographique, analyse asymptotique

Modèle
ergodique

Propriétés
équilibre

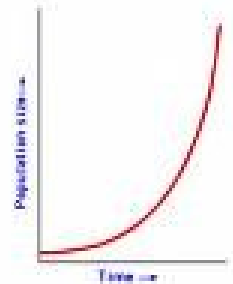
Lambda λ

Temps de
génération

Structure à
L'équilibre

élasticités

...



1) modèles classe-centrés

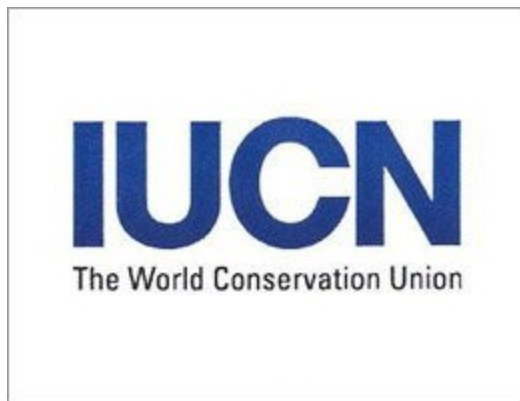
-Déclinaisons stochastiques

-Même structure mais tirages aléatoires

- + fonctions de régulation (densité dep. Positive et/ou négative)

- → « probabilités d'extinction »

- → « PVA » (Population Viability Analysis)



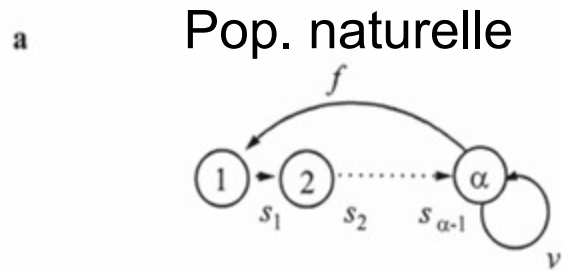
2007 IUCN Red List
Top 10 countries : Extinct and Extinct in the Wild

Rank	Country	EX	EW	Country	EX	EW
			Animals			
1.	United States	231	5	United States	23	7
2.	French Polynesia	69	10	Saint Helena	7	2
3.	Mauritius	41	0	India	7	2
4.	Australia	38	0	French Polynesia	6	0
5.	Kenya	34	4	Brazil	5	1
6.	Uganda	34	4	Cuba	4	1
7.	Tanzania	33	5	China	3	1
8.	Saint Helena	29	0	Yemen	3	0
9.	New Zealand	20	0	Colombia	3	0
10.	Sri Lanka	19	0	New Caledonia	3	0

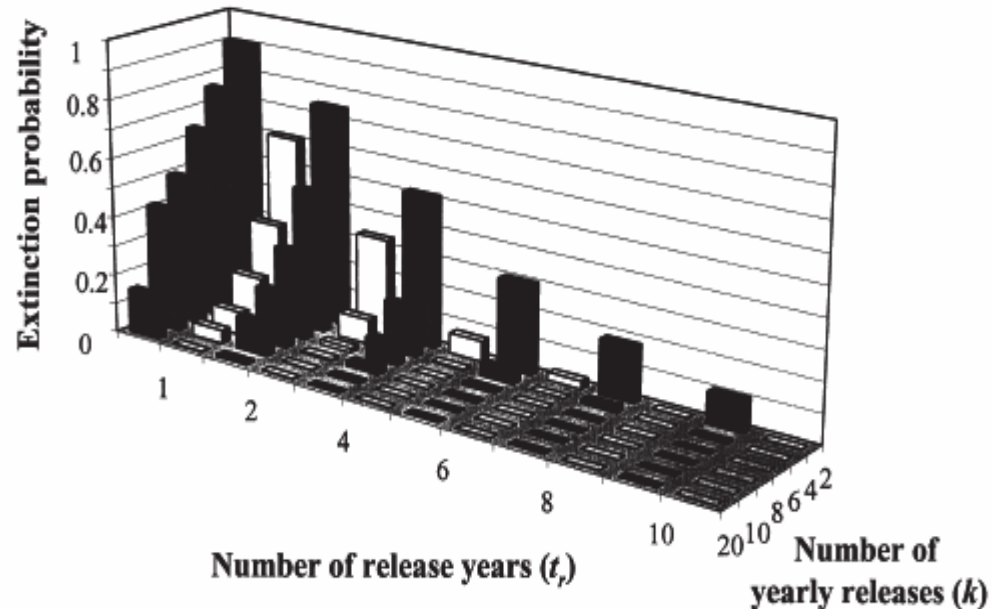
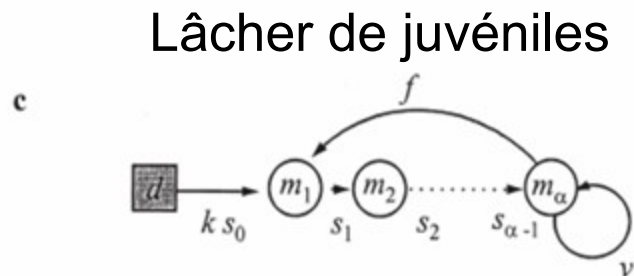
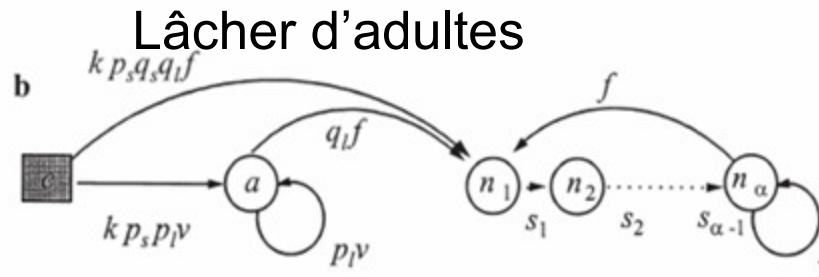
dodosgone.blogspot.com

1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et démographie



$$\begin{pmatrix} c \\ a \\ n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_\alpha \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ k(t)p_s p_l v & p_l v & 0 & \cdots & 0 \\ \hline k(t)p_s q_s q_l f & q_l f & 0 & 0 & \cdots & f \\ 0 & 0 & s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & s_{\alpha-1} & v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ a \\ n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_\alpha \end{pmatrix}_t$$



1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »

-Échec à la réintroduction: dispersion > mortalité

Le Gouar et al. 2008 *Ecol. Appl.*



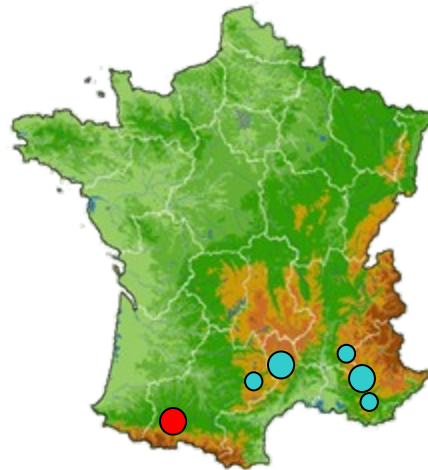
1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »

-Échec à la réintroduction: dispersion > mortalité

Le Gouar et al. 2008 Ecol. Appl.

-Populations réintroduites et naturelles=plusieurs noyaux



1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »

-Échec à la réintroduction: dispersion > mortalité

Le Gouar et al. 2008 *Ecol. Appl.*

-Populations réintroduites et naturelles=plusieurs noyaux

-Théories évolutives dispersion

-Random

-Avoidance

-Conspecific attraction

-Habitat copying

-...

1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »

-Échec à la réintroduction: dispersion > mortalité

Le Gouar et al. 2008 *Ecol. Appl.*

-Populations réintroduites et naturelles=plusieurs noyaux

-Théories évolutives dispersion

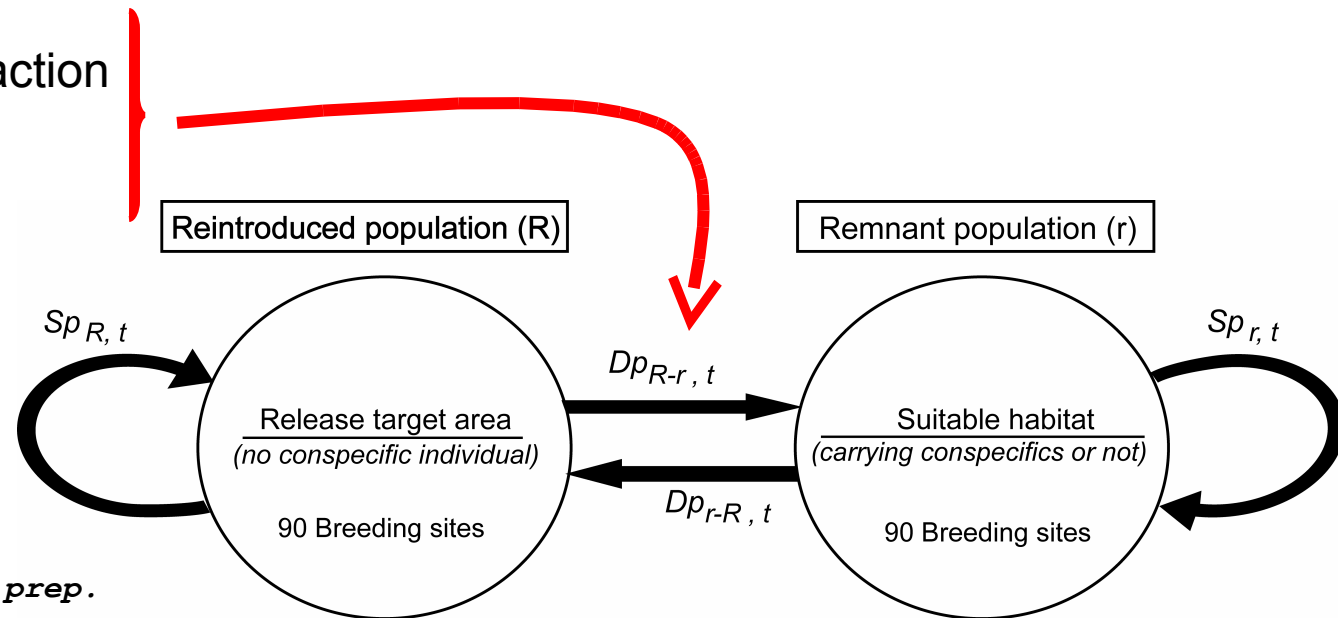
-Random

-Avoidance

-Conspecific attraction

-Habitat copying

-...



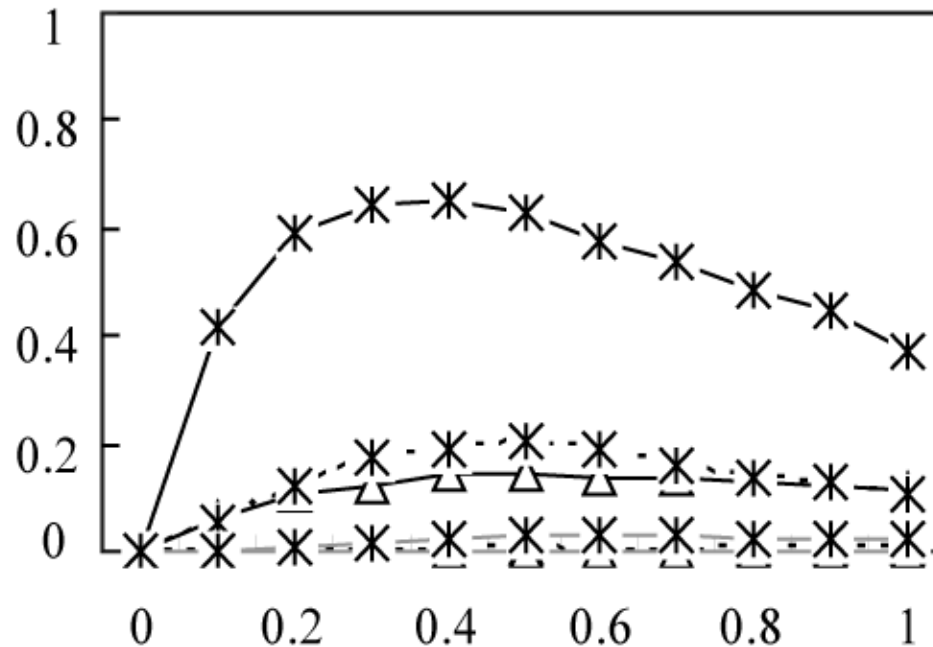
Mihoub et al. *En prep.*

1) modèles classe-centrés

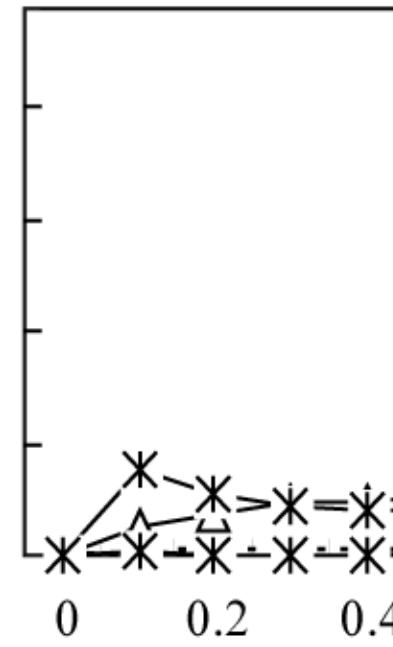
-Réintroduction et « effet aspirateur »

Probabilités de réintroduction de la population locale
 à la réintroduction de la population locale
 % échec à la réintroduction locale

Conspecific attraction

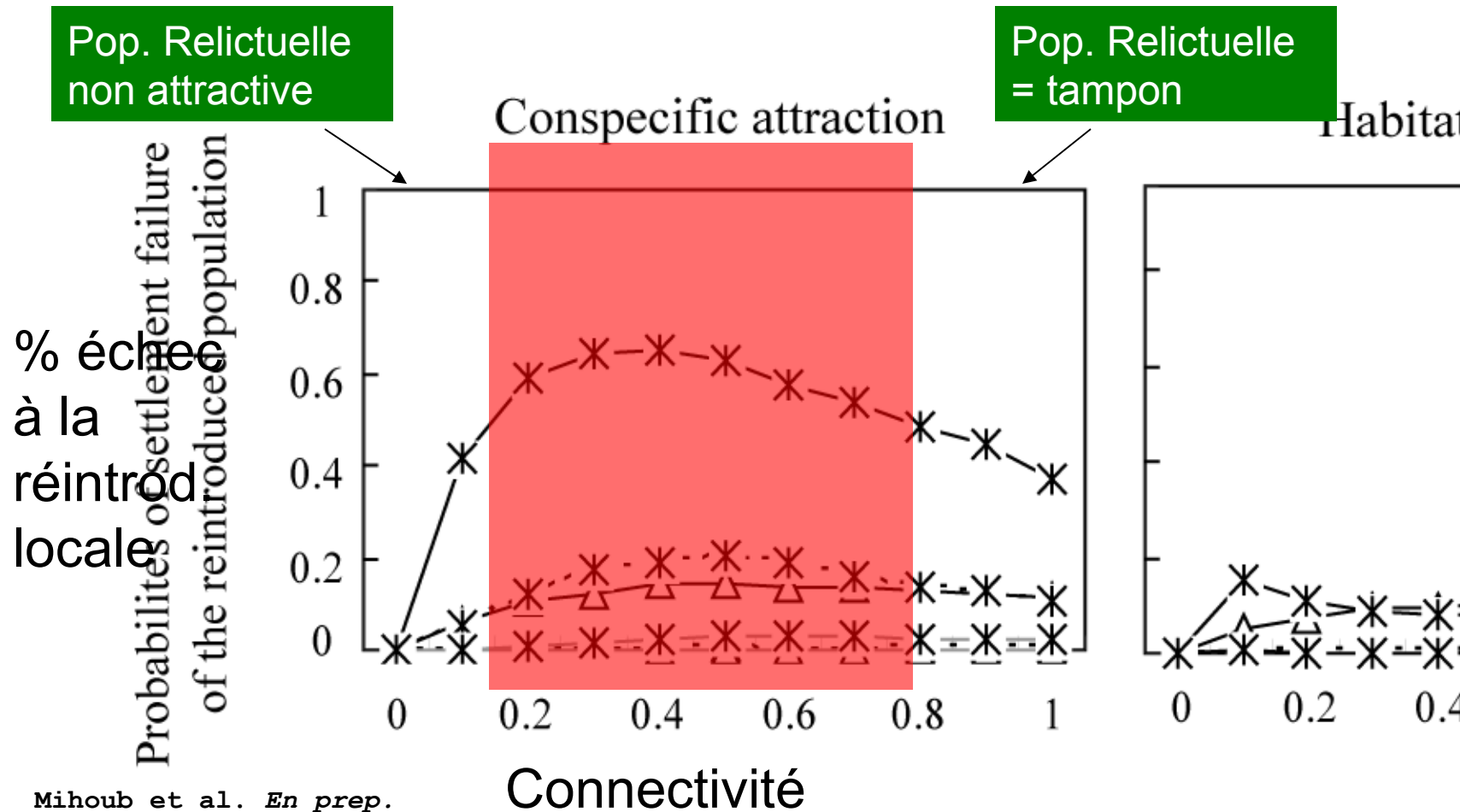


Habitat



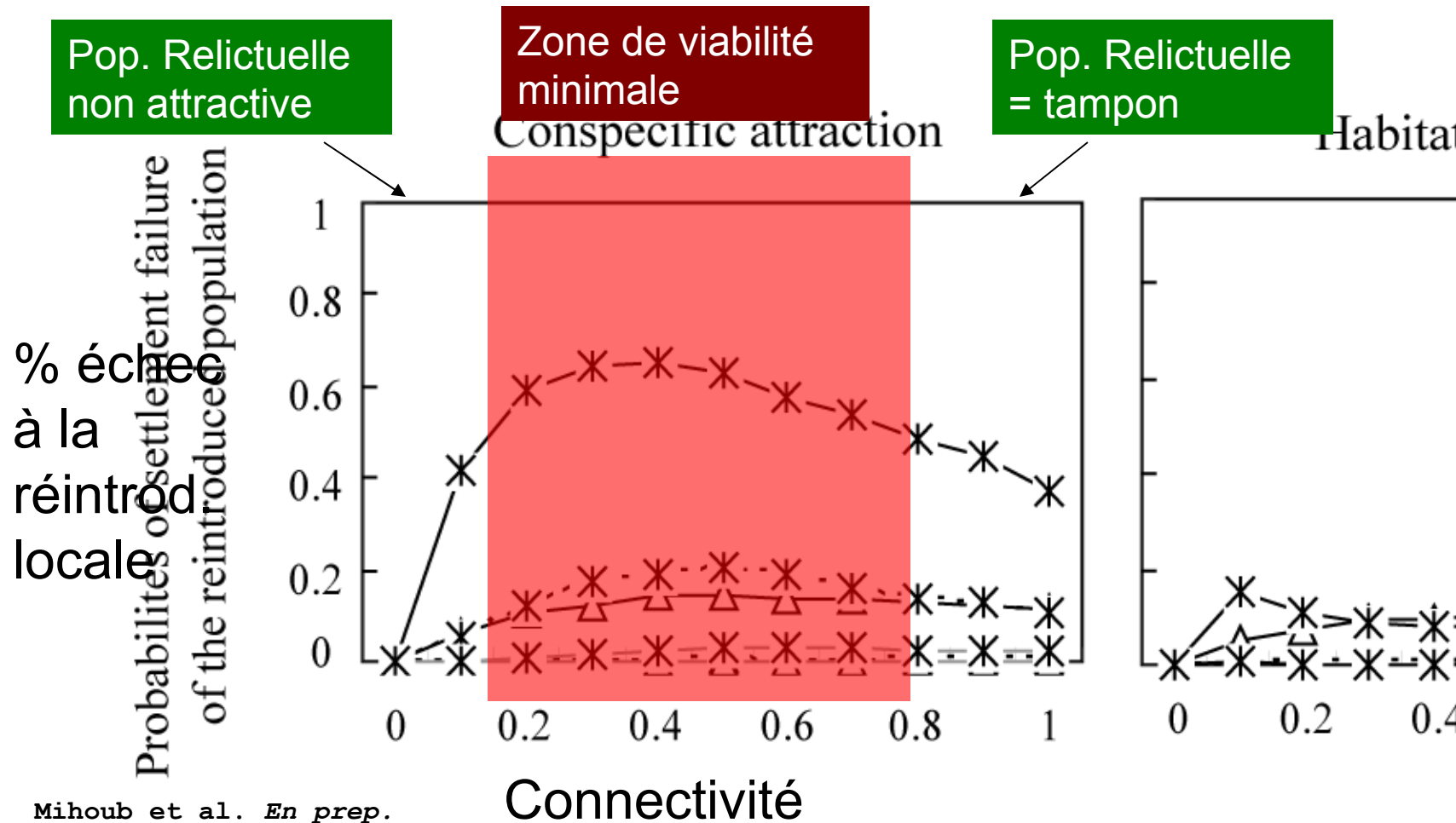
1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »



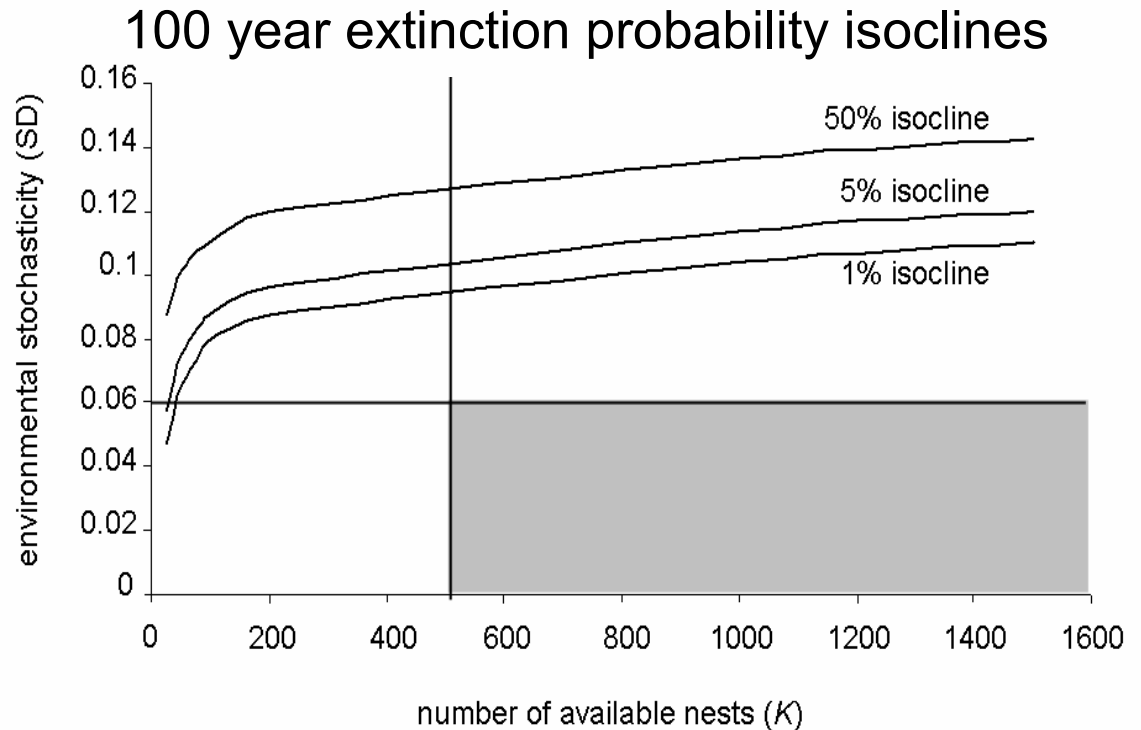
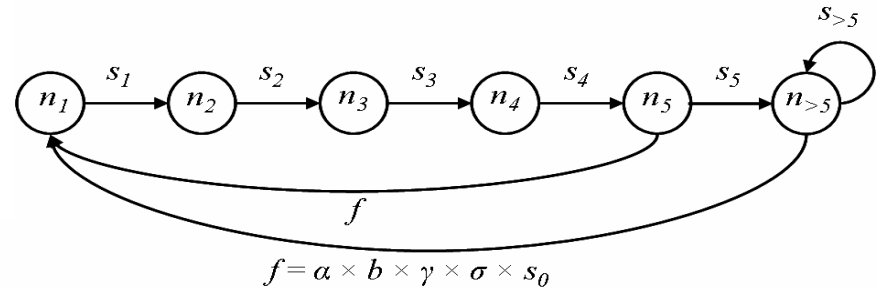
1) modèles classe-centrés

-Réintroduction et « effet aspirateur »



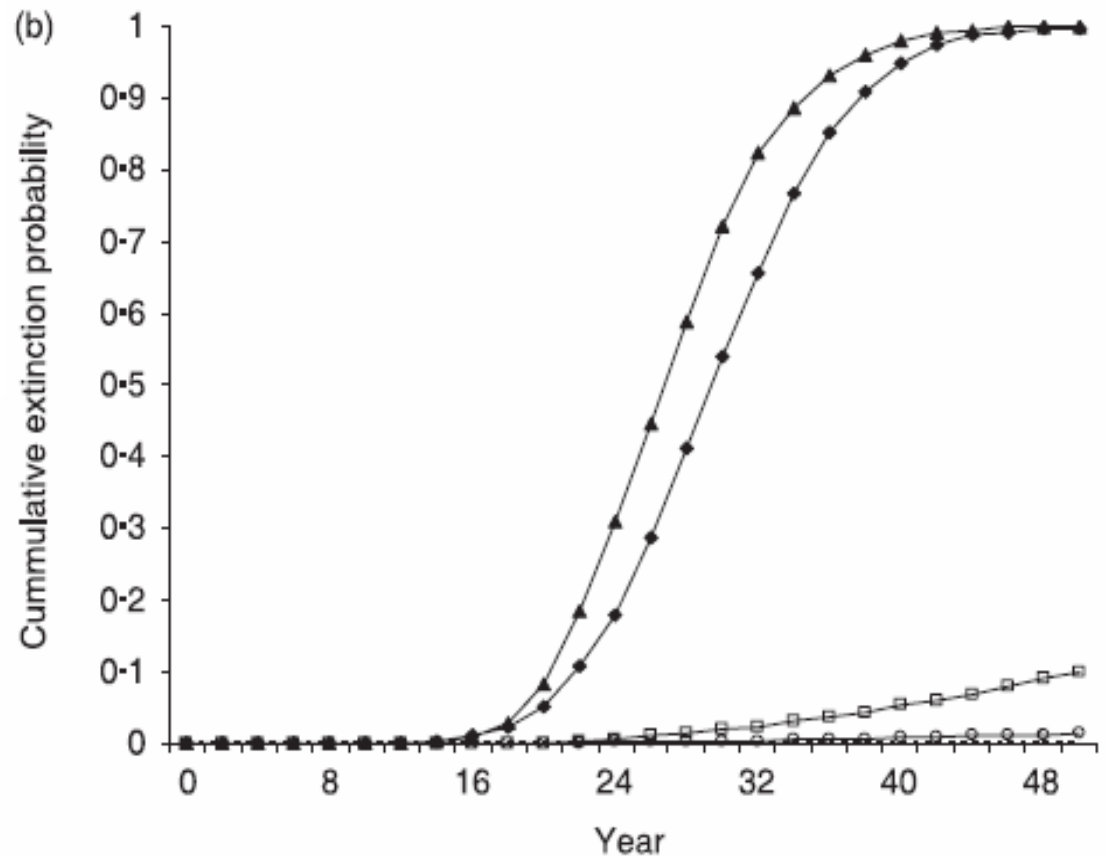
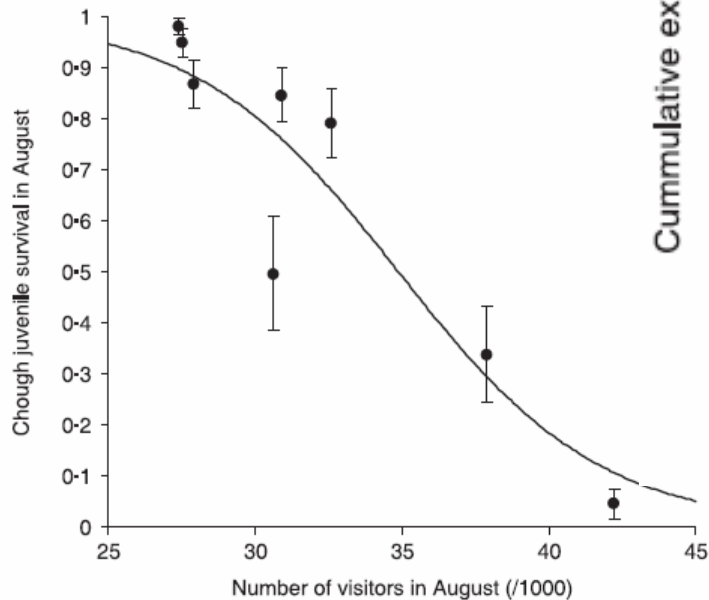
1) modèles classe-centrés

-Autres modèles classe-centrés: approches quantitatives



1) modèles classe-centrés

-Autres modèles classe-centrés: approches quantitatives



2) modèles individu-centrés

- Populations=hétérogènes

- Individus différents

 - À travers les réalisations des événements démographiques

 - Dans leurs traits

- Certaines formes de variations ne peuvent être considérées à travers les modèles en classes discrètes (âges, sexes...)

- Exemple de la variation génétique (fitness)

 - Sélection

 - Aspects stochastiques

2) modèles individu-centrés

Application: génétique des populations captives et réintroductions

Réintroduction=méthode ultime pour restaurer biodiv.

Un grand nb de programmes utilisent des ind. issus de pop. captives (pop. captives depuis plusieurs génération)

En général, le succès des programmes de réintro. est faible (10-40%, Griffith et al. 1989, Beck et al. 1994)

Il est d'autant + faible lorsque les indiv. sont issus de captivité (Fisher & Lindenmayer 2000, Jule et al. 2008)

La captivité peut avoir des effets antagonistes sur les processus démographiques et génétiques associés à la viabilité des pops réintroduites



Captive population

La captivité peut avoir des effets antagonistes sur les processus démographiques et génétiques associés à la viabilité des pops réintroduites

Captive population

High growth rate

Small & DeMaster 1995, Ricklefs & Scheuerlein 2001, Pedrono et al. 2004...)



Ex: survie œuf-smolt x
50-100

La captivité peut avoir des effets antagonistes sur les processus démographiques et génétiques associés à la viabilité des pops réintroduites

Captive population

High growth rate

Small & DeMaster 1995, Ricklefs & Scheuerlein 2001, Pedrono et al. 2004...)

Relaxed selection

(Bryant & Reed 1999, McPhee 2004...)

Inbreeding depression

Captive population

High growth rate

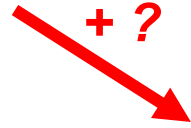
Small & DeMaster 1995, Ricklefs & Scheuerlein 2001,
Pedrono et al. 2004...)

Relaxed selection

(Bryant & Reed 1999, McPhee 2004...)

Climatic perturbations

(Keller et al. 1994)



Inbreeding depression

Captive population

High growth rate

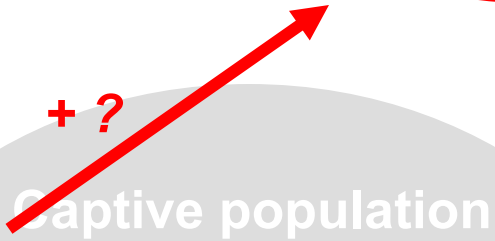
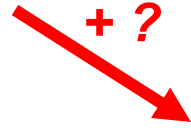
Small & DeMaster 1995, Ricklefs & Scheuerlein 2001,
Pedrono et al. 2004...)

Relaxed selection

(Bryant & Reed 1999, McPhee 2004...)

Climatic perturbations

(Keller et al. 1994)



Parasitism

(Coltman et al. 1999)



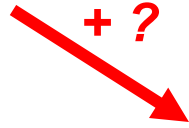
Ricklefs & Scheuerlein 2001,

ion

(Phee 2004...)

Climatic perturbations

(Keller et al. 1994)

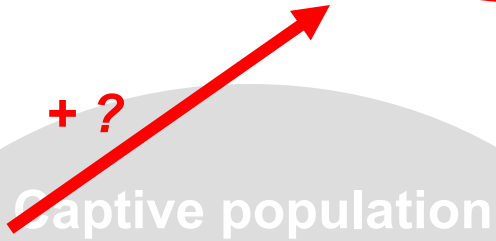


Competition

(Meagher et al. 2000, Keller et al. 2002)



Inbreeding depression



Captive population

Parasitism

(Coltman et al. 1999)



Ricklefs & Scheuerlein 2001,

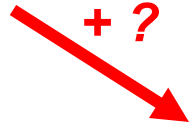
ion

McPhee 2004...)

High growth rate

Climatic perturbations

(Keller et al. 1994)

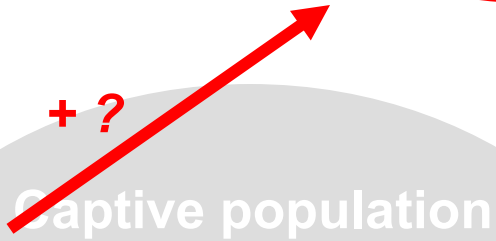


Competition

(Meagher et al. 2000, Keller et al. 2002)



Inbreeding depression



Captive population

Parasitism

(Coltman et al. 1999)



Ricklefs & Scheuerlein 2001,

ion

McPhee 2004...)

Captivity

(Crnokrak & Roff 1999)



- ?



La captivité peut avoir des effets antagonistes sur les processus démographiques et génétiques associés à la viabilité des pops réintroduites

Captive population

High growth rate

Small & DeMaster 1995, Ricklieds & Scheuerlein 2001, Pedrono et al. 2004...)

Relaxed selection

(Bryant & Reed 1999, McPhee 2004...)

Ex: capacité repro
- 40% / generation
captiv.



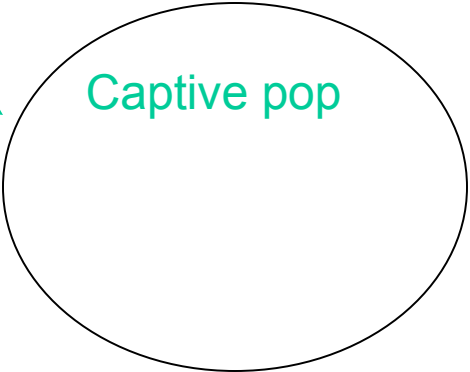
Methods

-two-sex Individual-based demographic model

-Genetic vectors: reduction of juvenile survival due to spontaneous deleterious mutations

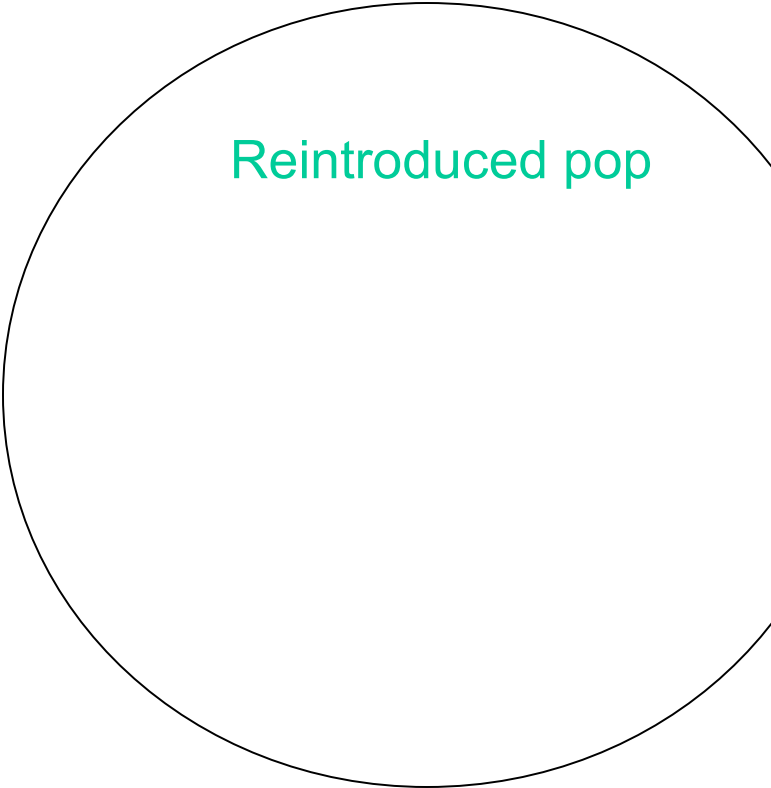
Methods

Founders
(N_{founder})



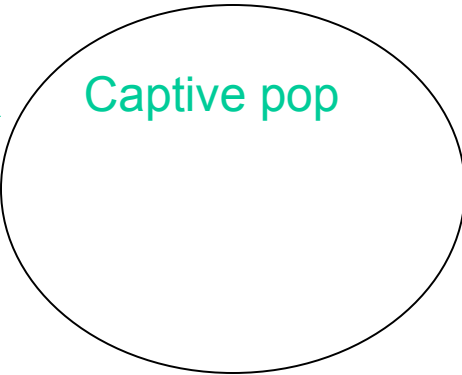
Rr

Duration

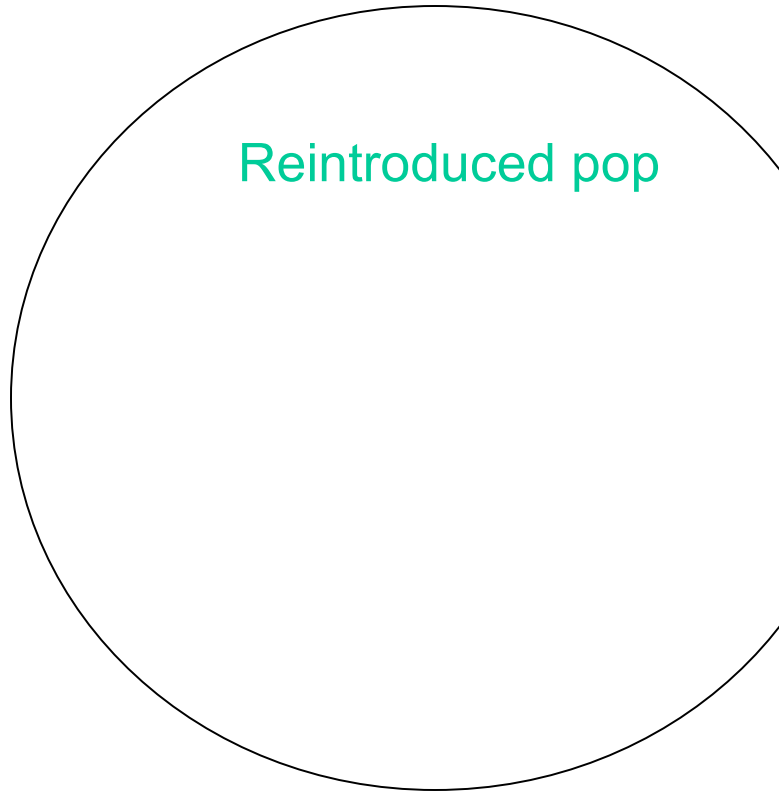


Methods

Founders
(N_{founder})

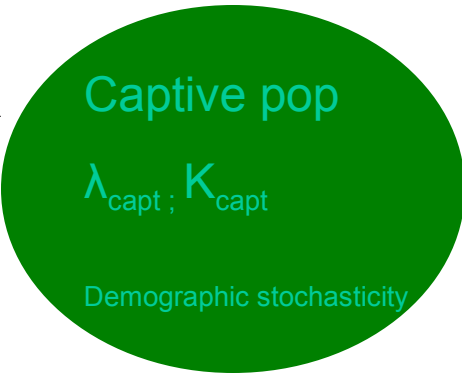
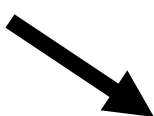


Rr
Duration

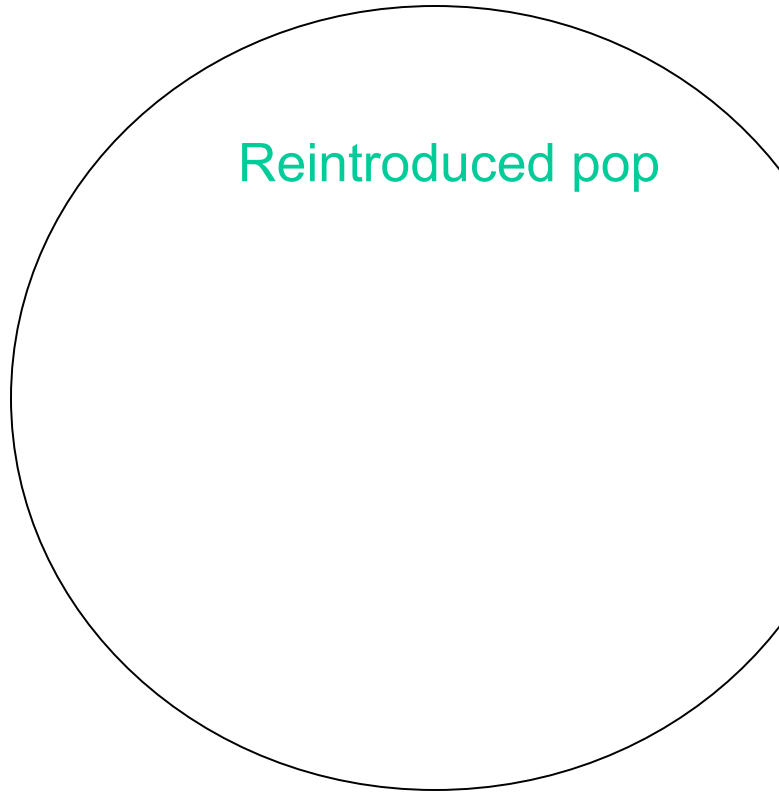


Methods

Founders
(N_{founder})

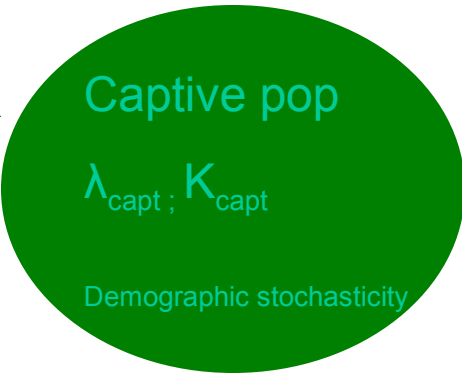
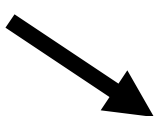


Rr
Duration

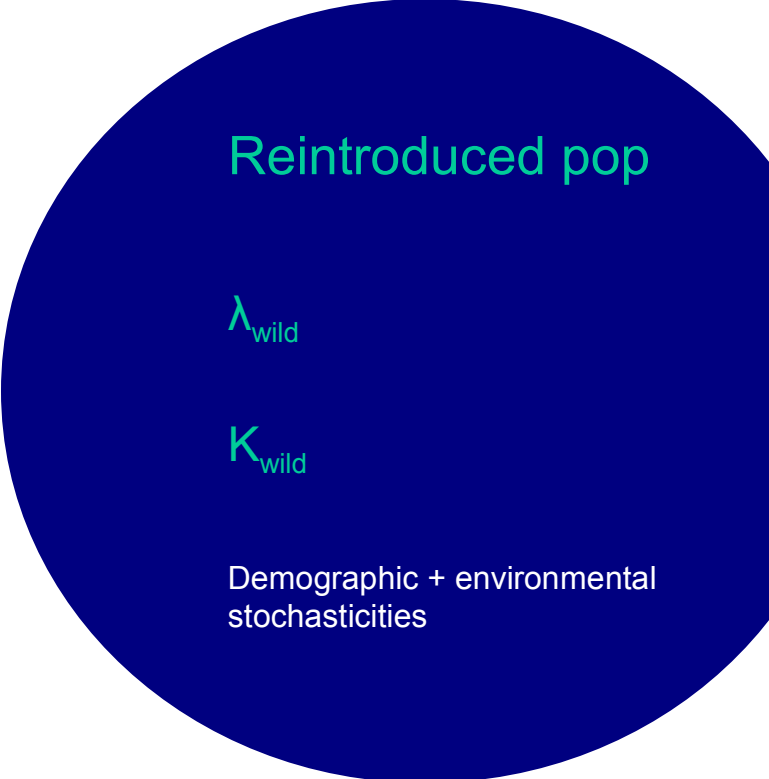


Methods

Founders
(N_{founder})

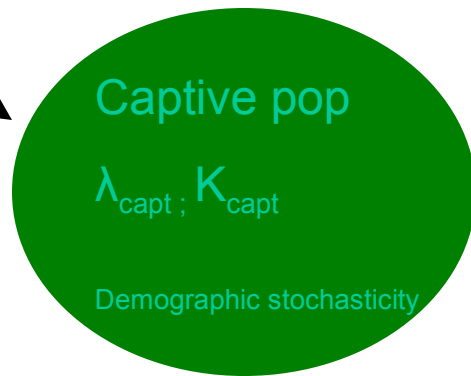


Rr
Duration



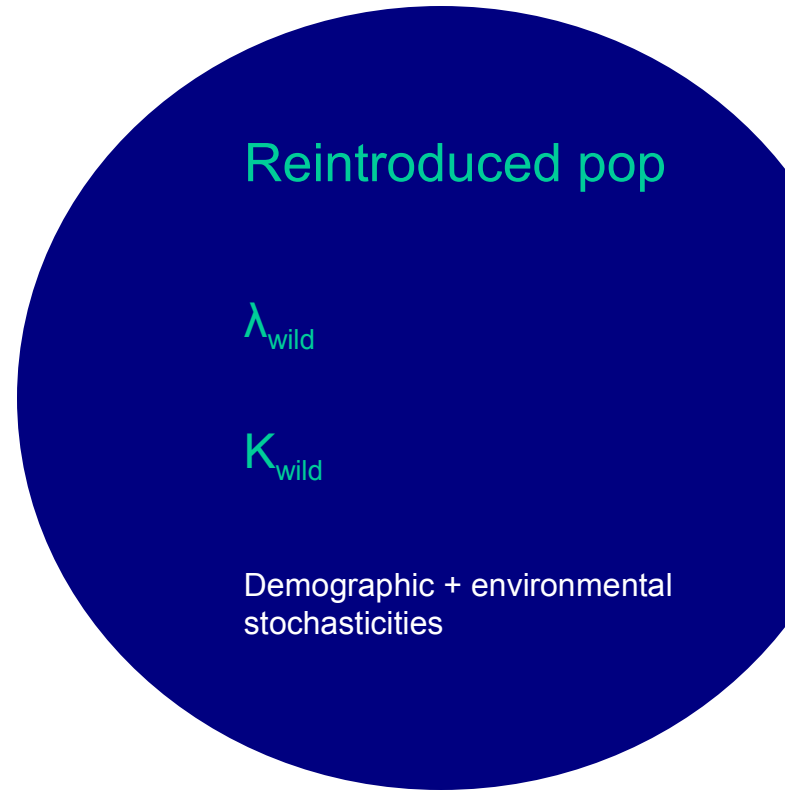
Methods

Founders
(N_{founder})



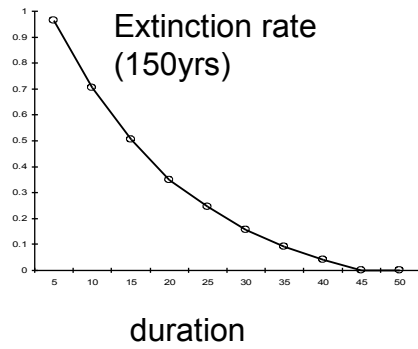
Rr

Duration

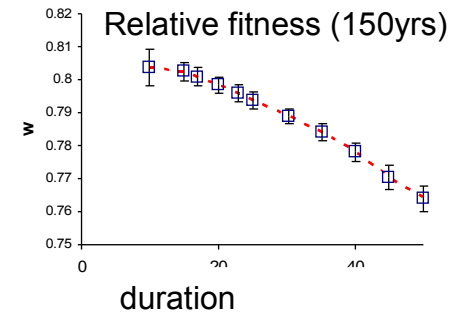
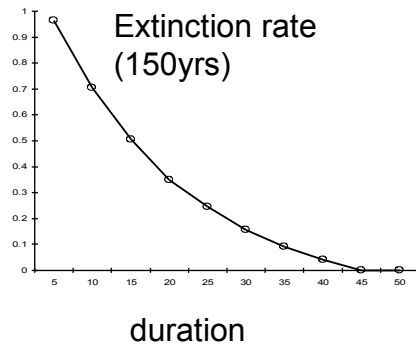


-Improved survival and fecundity rates in captivity ($\lambda_{\text{capt}} < \lambda_{\text{wild}}$)

-Relaxed selection in captivity

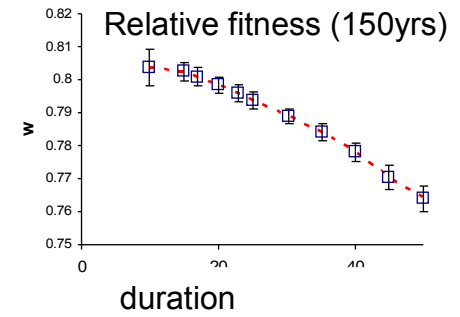
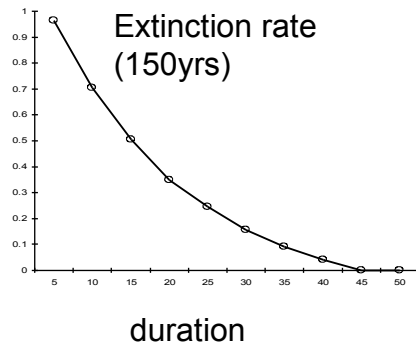


Demographic model:
Reduction of extinction rate when
duration increases



Demographic model:
Reduction of extinction rate when
duration increases

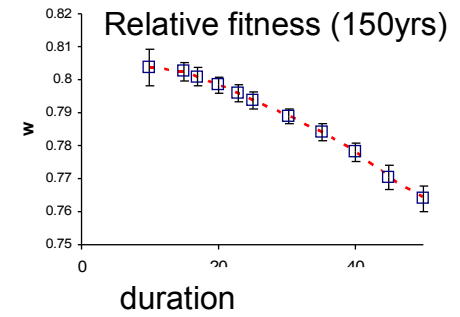
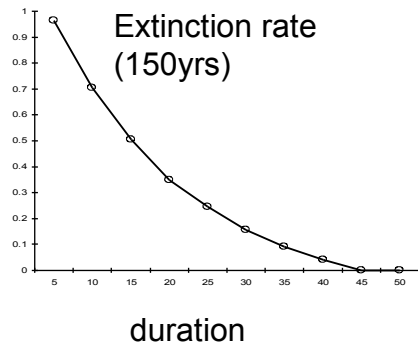
Genetic model:
Reduction of fitness when duration
increases



Demographic model:
Reduction of extinction rate when duration increases

Genetic model:
Reduction of fitness when duration increases

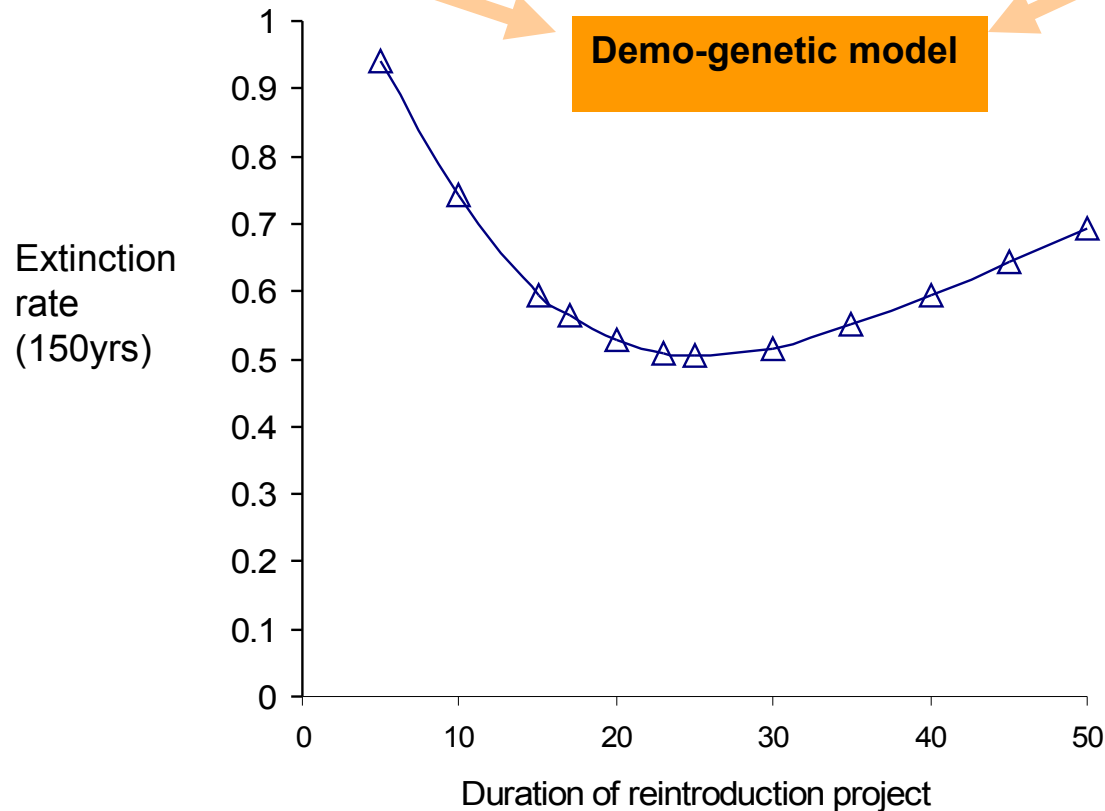
Demo-genetic model

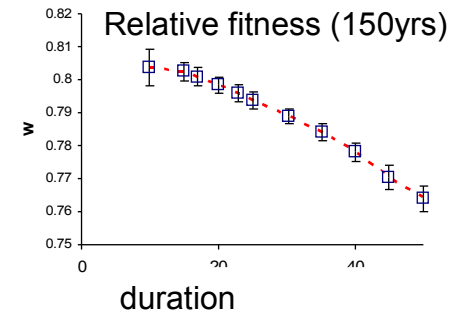
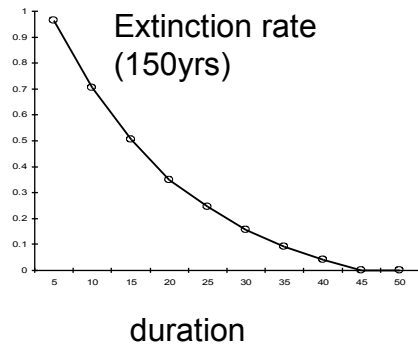


Demographic model:
Reduction of extinction rate when duration increases

Genetic model:
Reduction of fitness when duration increases

Demo-genetic model

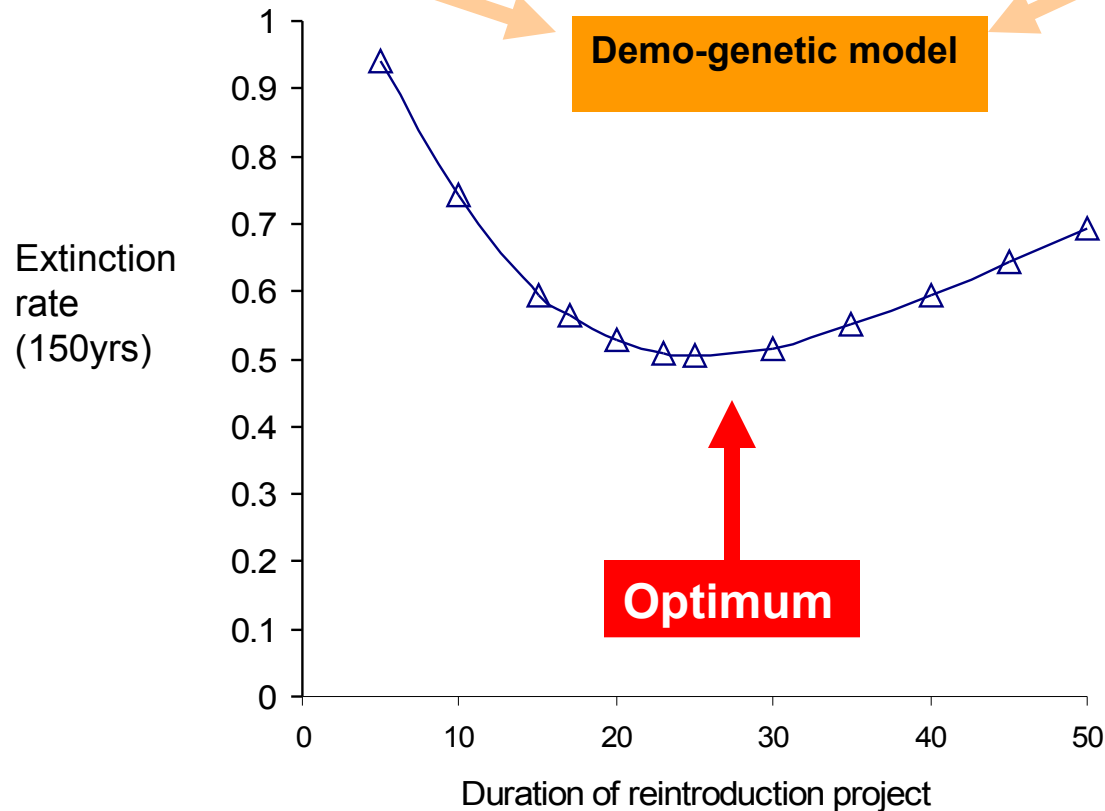


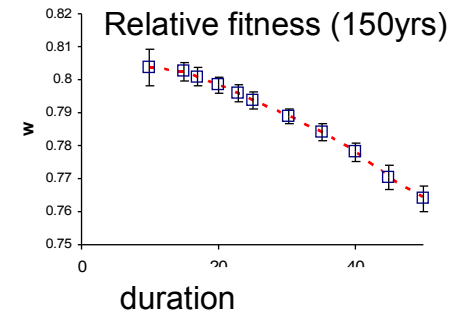
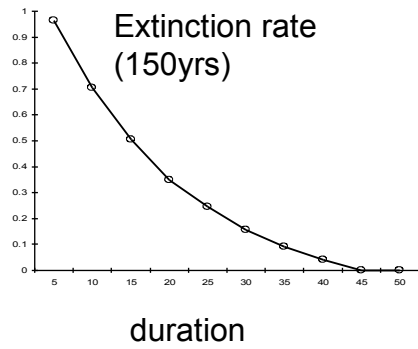


Demographic model:
Reduction of extinction rate when duration increases

Genetic model:
Reduction of fitness when duration increases

Demo-genetic model

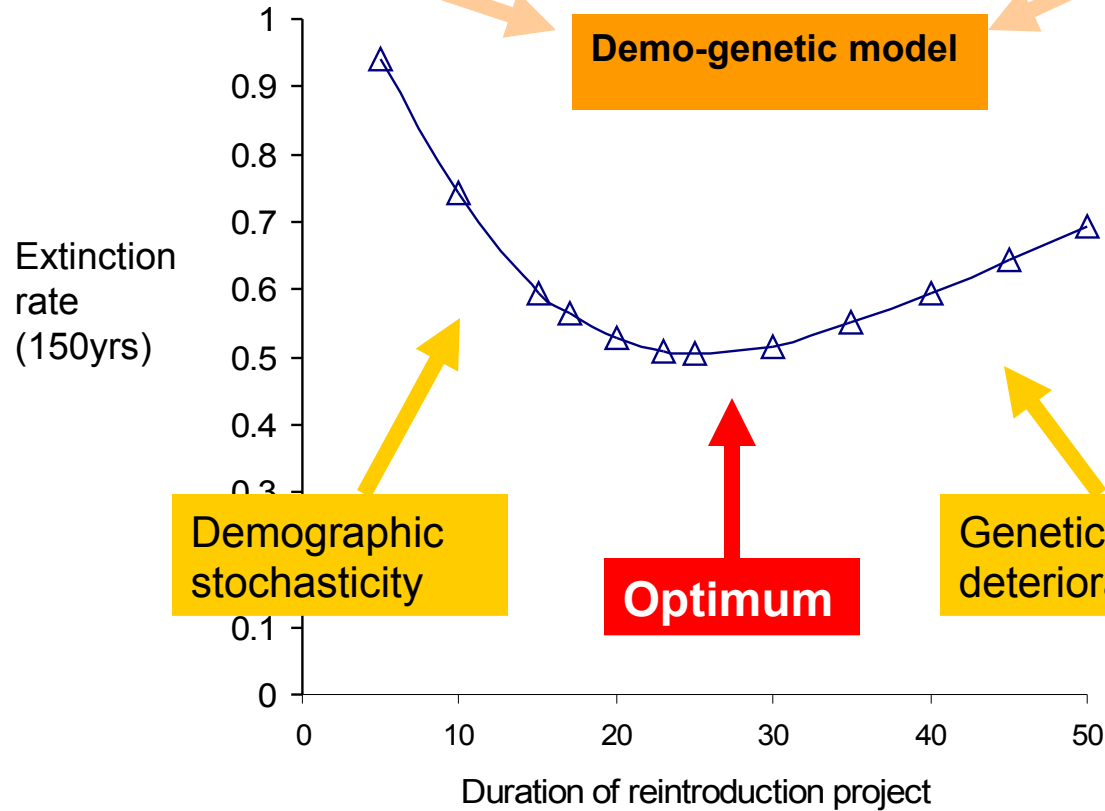




Demographic model:
Reduction of extinction rate when duration increases

Genetic model:
Reduction of fitness when duration increases

Demo-genetic model



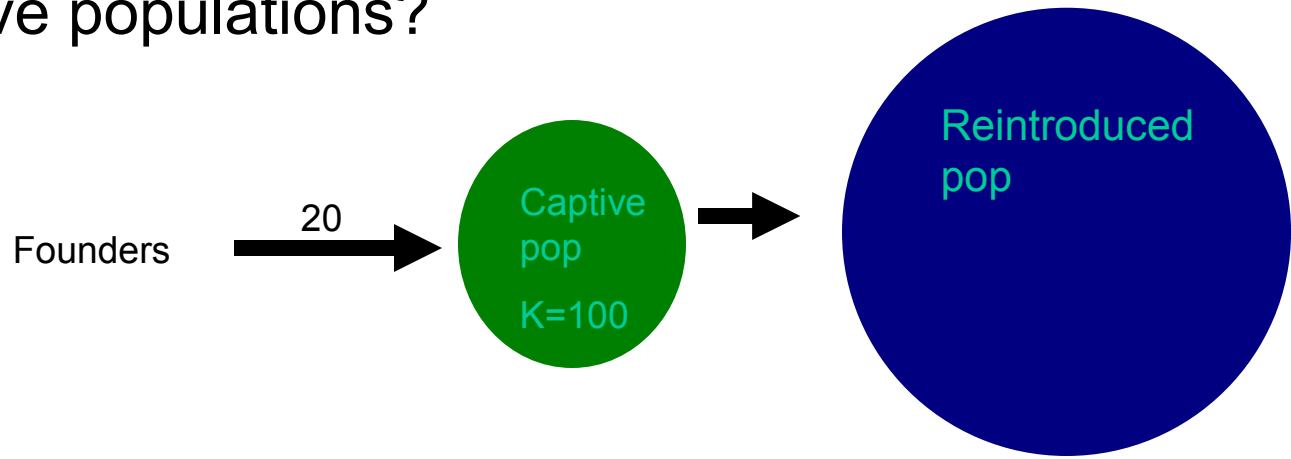
Demographic stochasticity

Optimum

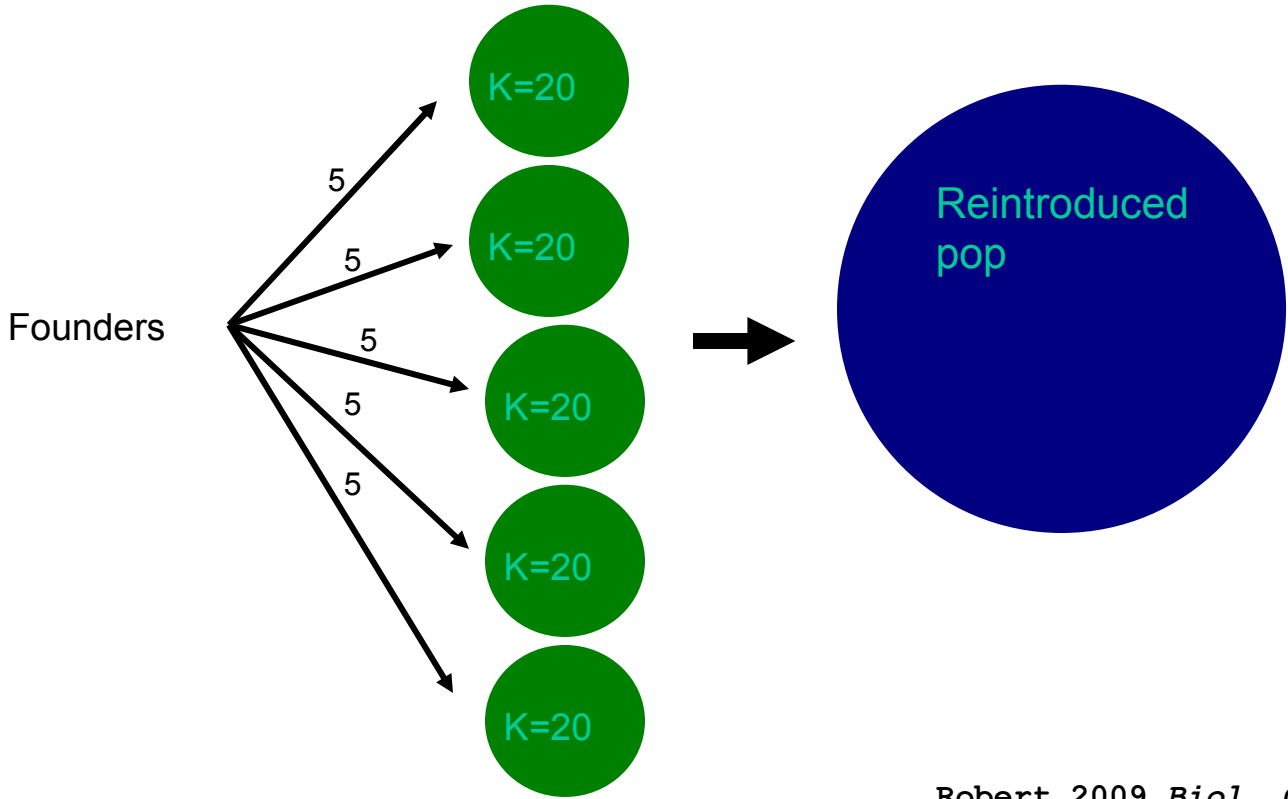
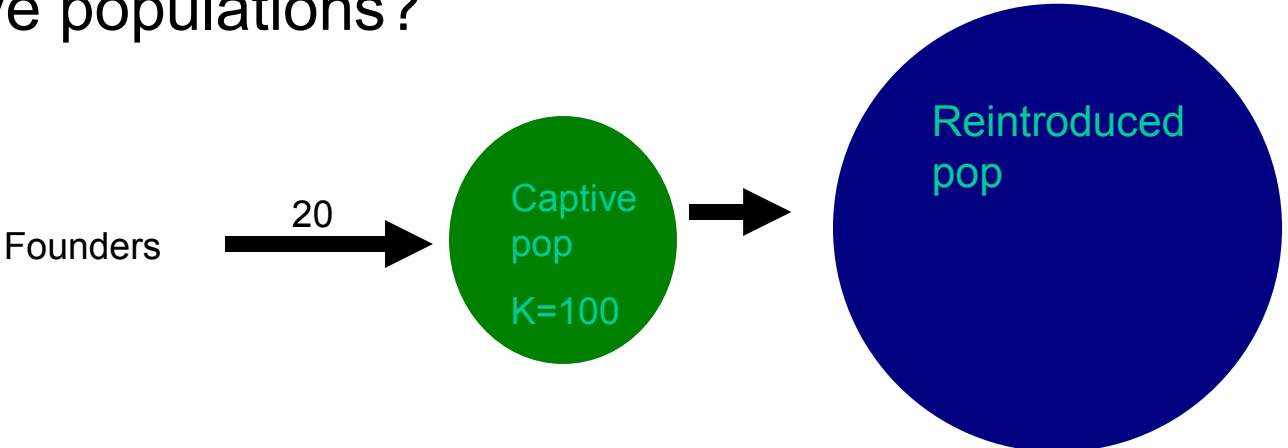
Genetic deterioration

Several captive populations?

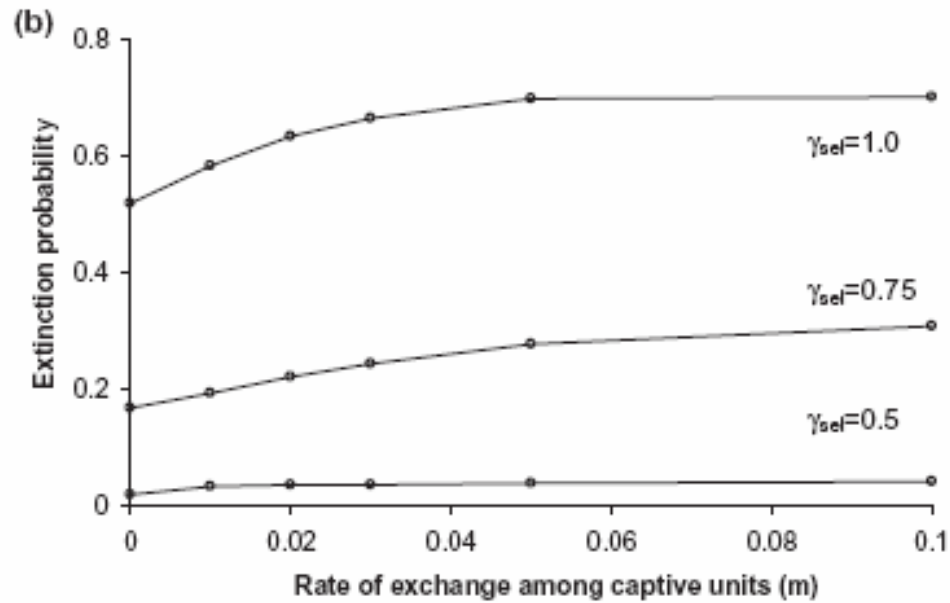
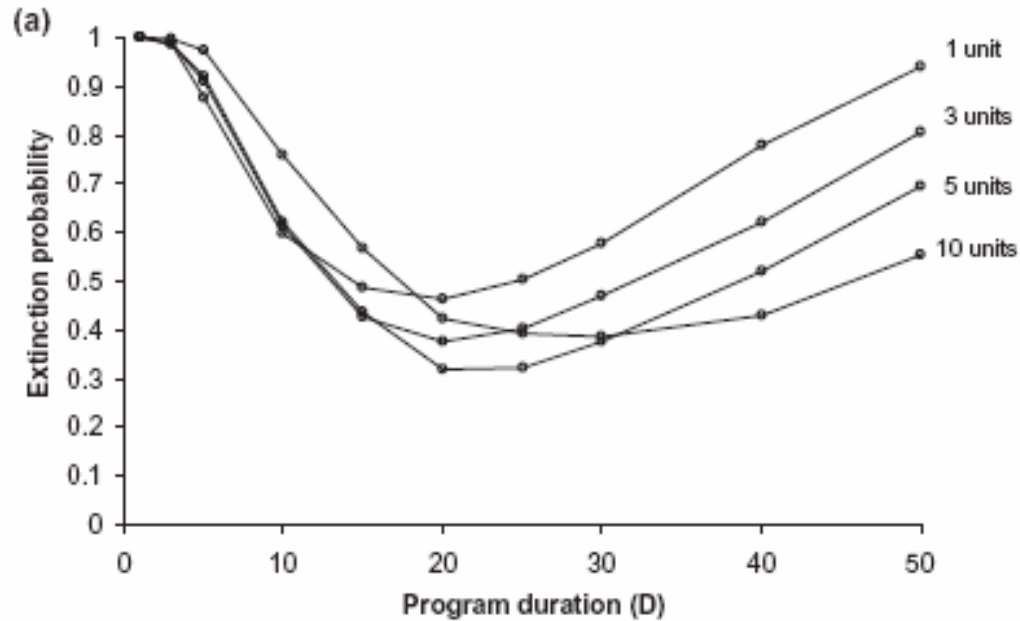
Several captive populations?



Several captive populations?



Several captive populations?



3) modèles patch-centrés

Cas des populations fragmentées

3) modèles patch-centrés

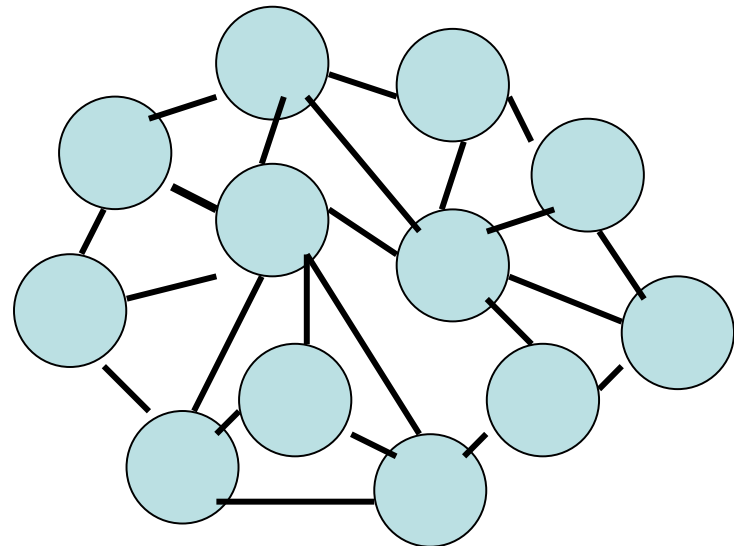
Cas des populations fragmentées

-Beaucoup d'espèces ont naturellement un habitat fragmenté ou « patchy », à une certaine échelle spatiale

-chez beaucoup d'autres, la fragmentation a une origine anthropique



La mélitée du plantain
(*Melitaea cinxia*)



3) modèles patch-centrés

Cas des populations fragmentées

-Beaucoup d'espèces ont naturellement un habitat fragmenté ou « patchy », à une certaine échelle spatiale

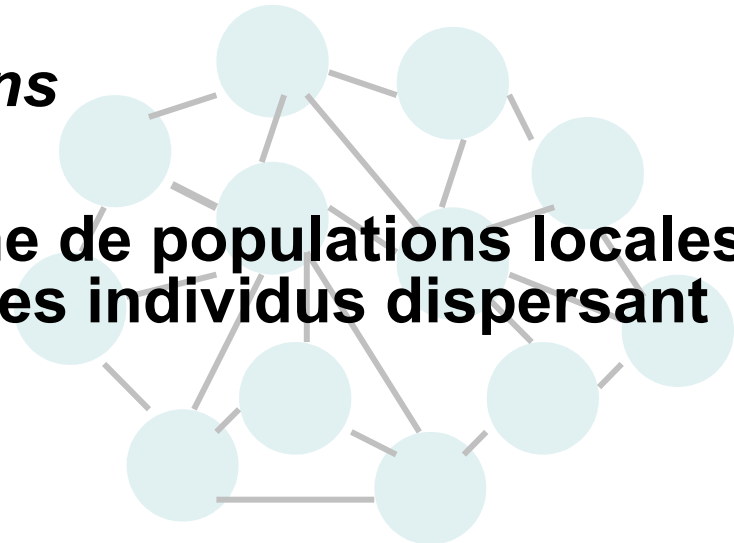
-chez beaucoup d'autres, la fragmentation a une origine anthropique

Théorie des métapopulations

Définition générale: système de populations locales (patches) connectées par des individus dispersant (Hanski & Gilpin 1991)



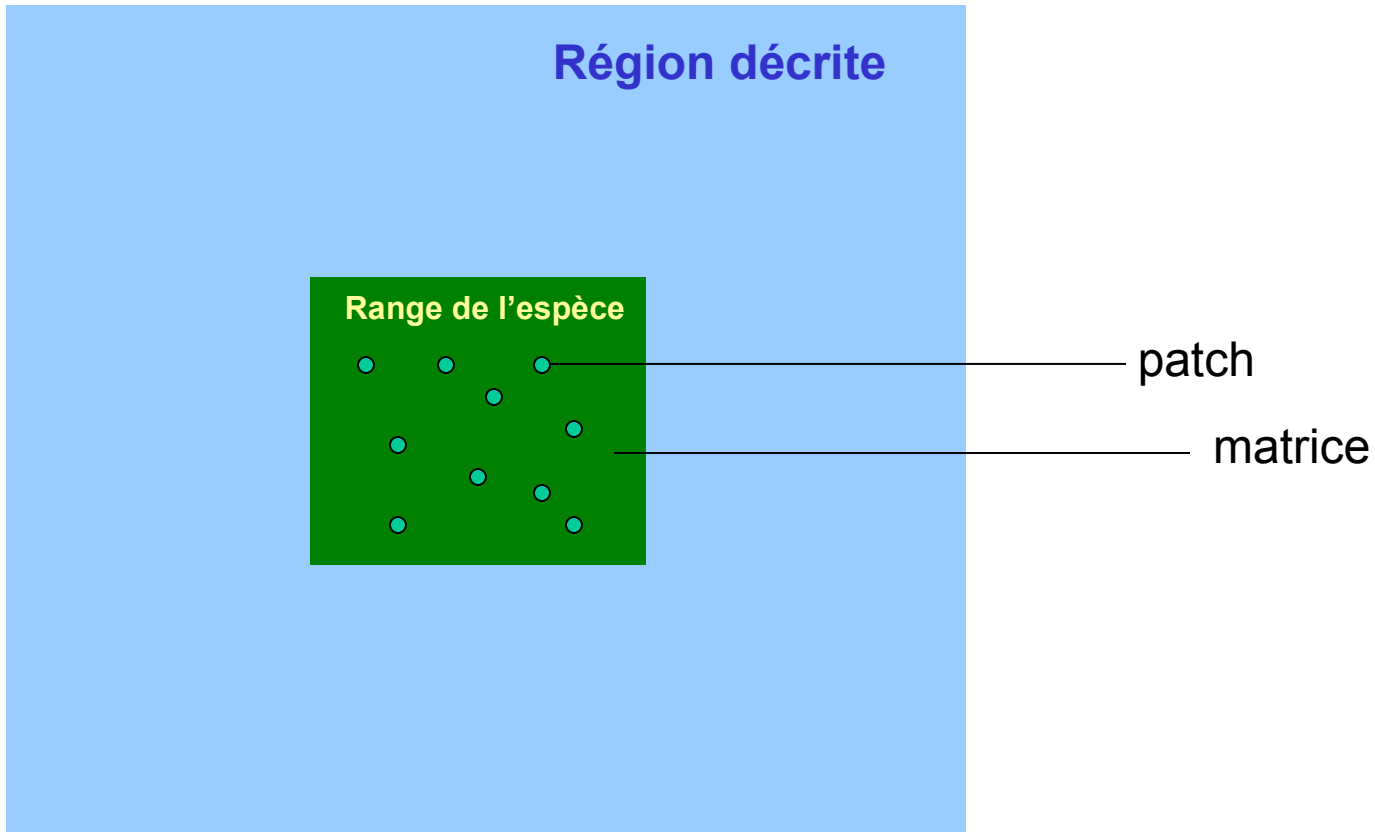
La mélitée du plantain
(*Melitaea cinxia*)



Le modèle

« région décrite », grille 2D coordonnées xy

B patches distribués aléatoirement dans le « range de l'espèce »

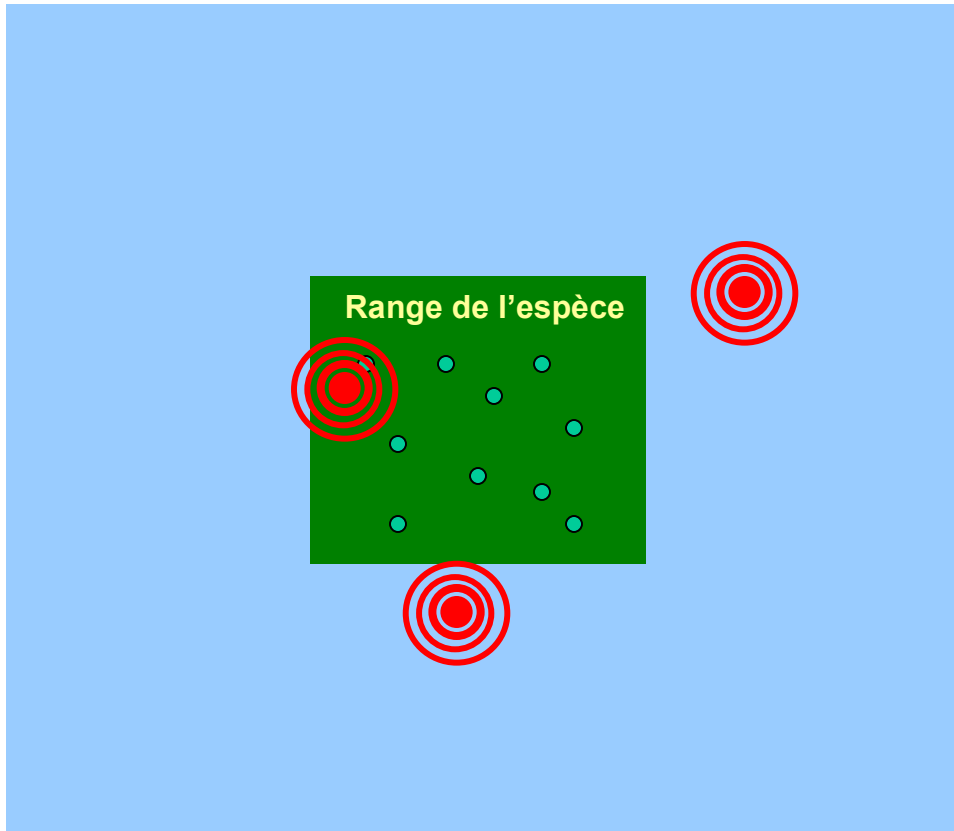


Le modèle

« région décrite », grille 2D coordonnées xy

B patches distribués aléatoirement dans le « range de l'espèce »

Perturbations



« effet » de la perturbation k à une distance x de son « épiceutre » donné par

$$W_k(x) = e^{-\alpha x}$$

qualité environnement patch i donnée par

$$q_i(t) = 1 - \text{Min} \left[\sum_{k=1}^{P(t)} W_k(d_{ik}), 1 \right]$$

Le modèle

Dynamique intra-patch, pour chaque patch i :

$$N_i(t) = I_i(t) - E_i(t) + N_i(t-1) e^{\frac{r_{0i}(t)(K_i - N_i(t))}{K_i}}$$

$$r_{0i}(t) = \text{Ln}(q_i(t)\lambda)$$

$N_i(t)$: taille de population patch i au temps t ,

$E_i(t)$ et $I_i(t)$: nb d'Émigrants et d'immigrants,

$R_i(t)$: tx de croissance patch i temps t

λ : « tx de croissance déterministe » pour l'espèce,

$q_i(t)$: qualité de l'environnement local (i) à t

K_i : capacité de charge du patch i

Dispersion : proportion d'émigrants fixe (m): $E_i(t) = mN_i(t)$

proportion d'émigrants survivants dépend de la présence d'autres patches à proximité du patch de départ:

$$E'_i(t) = E_i(t) \times \text{Min} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^B e^{-\beta d_{ij}}, 1 \right]$$

proportion de dispersants arrivant à i parmi les émigrants de j donnée par

$$p_{ij} = \frac{e^{-\beta d_{ij}}}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^B e^{-\beta d_{jk}}}$$

nb total d'immigrants arrivant à i donné par $I_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^B E'_j(t) p_{ij}(t)$

$E_i(t)$: nb d'émigrants partant de i à t

$E'_i(t)$: nb d'émigrants partant de i à t et qui survivent

m: tx fixe d'émigration

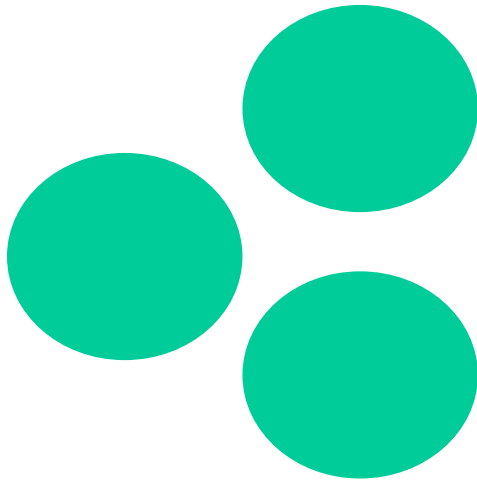
B: nb de patches

d_{ij} : distance entre patches i et j

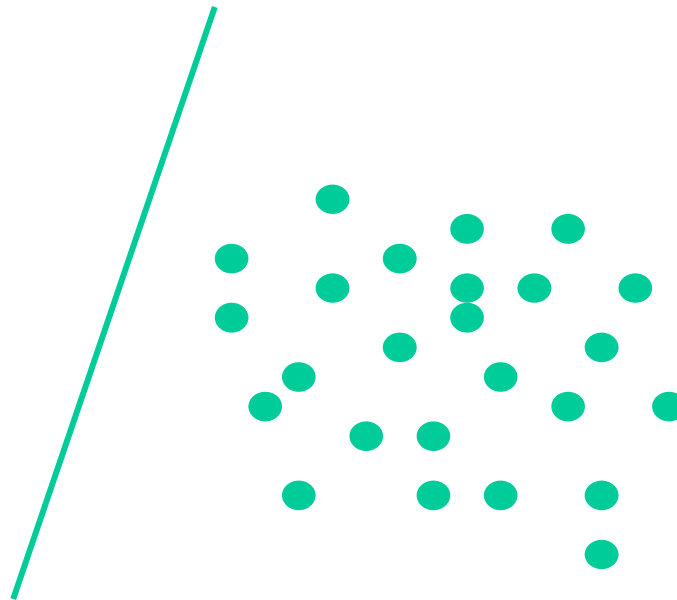
β : paramètre quantifiant l'accroissement de la mortalité avec la distance de dispersion

Une question classique

Le FLOMS (Few Large Or Many Small?)



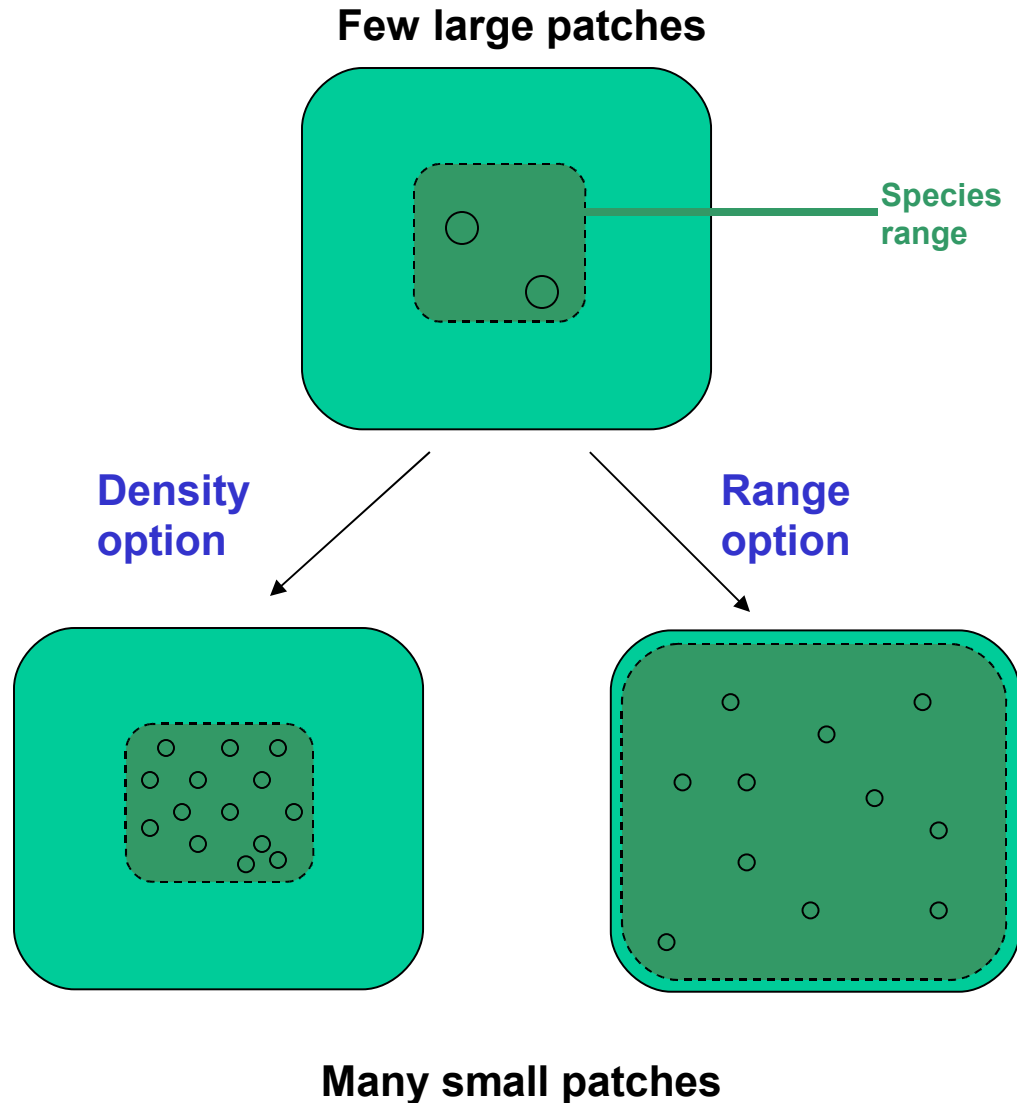
Few large patches



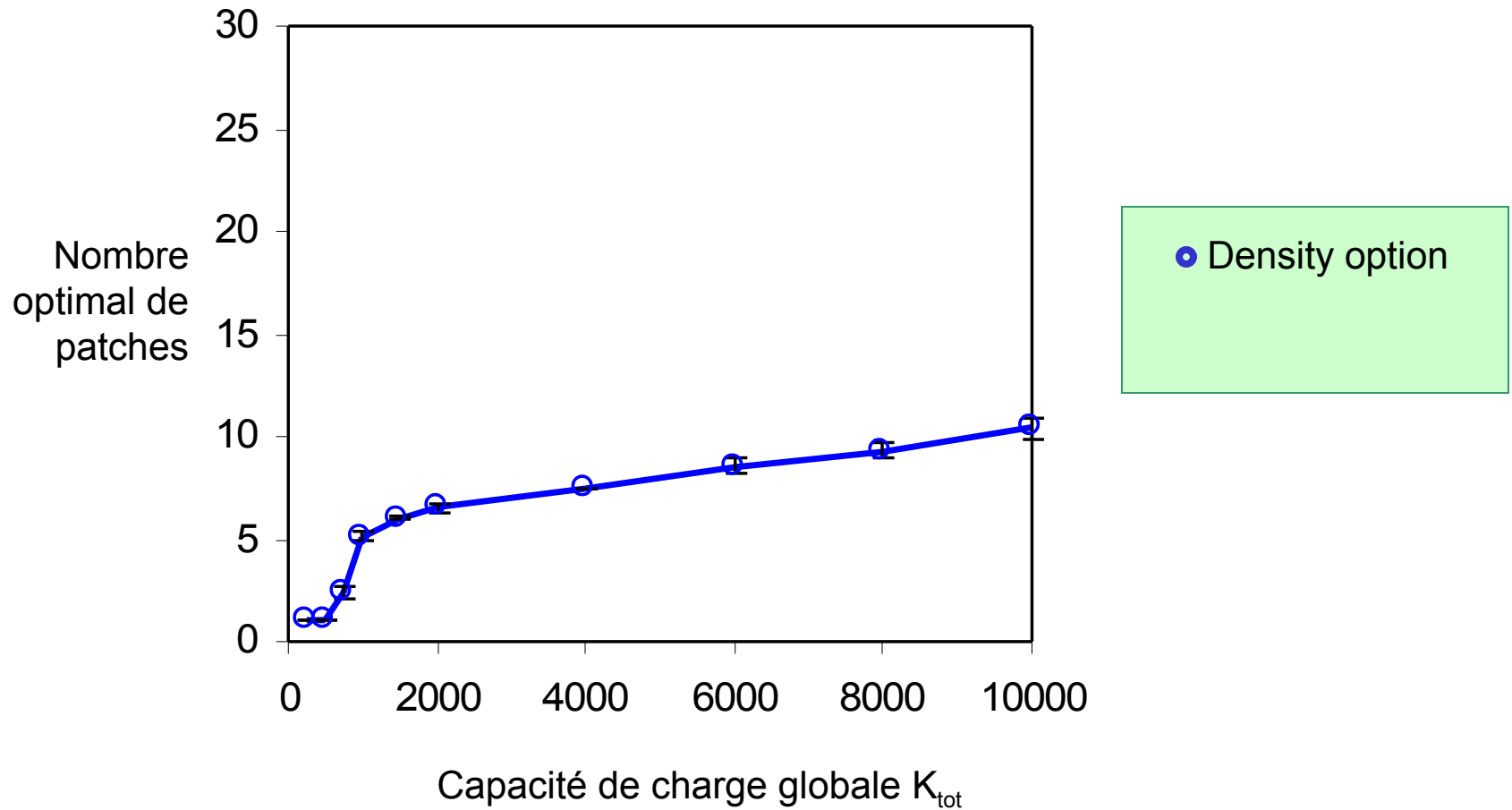
Many small patches

La prise en compte explicite du range, de l'autocorrélation spatiale et de la dispersion distance dépendante permet d'affiner la question

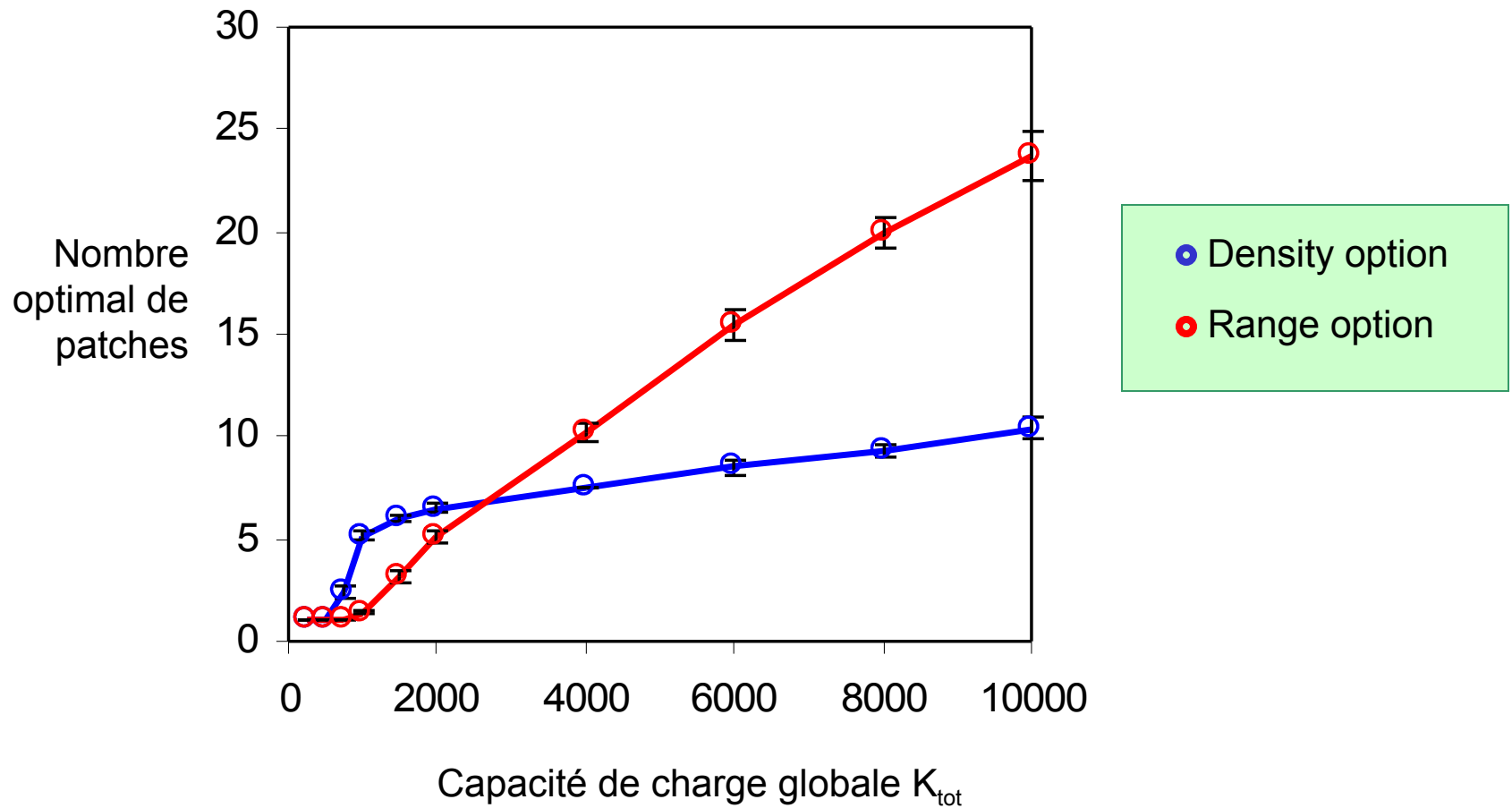
Comment passe t-on de FL (few large) à MS (many small)?



Résultats



Résultats



4) modèles espèce-centrés

Modèles multi-espèces: utilisés pour comprendre comment certains indices de diversité biologiques répondent à des perturbations

Utilisation de différents indices pour quantifier la « biodiversité »

4) modèles espèce-centrés

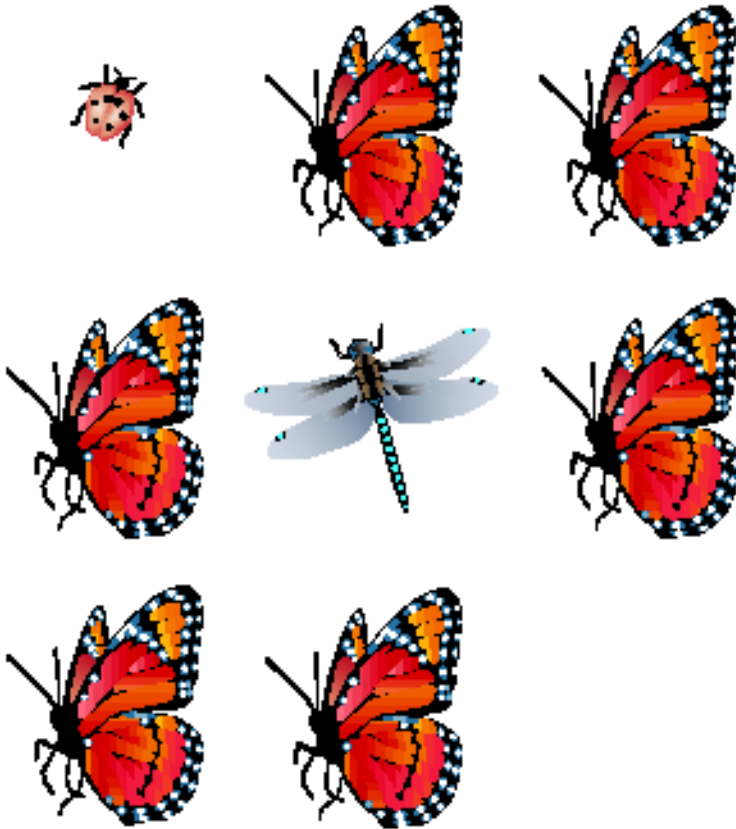
Modèles multi-espèces: utilisés pour comprendre comment certains indices de diversité biologiques répondent à des perturbations

Utilisation de différents indices pour quantifier la « biodiversité »
Basés sur

- le nb d'espèces (richesse)
- les abondances relatives de ces espèces (Simpson, Shannon-Wiener, Evenness...)

Which Is More Diverse?

Sample A

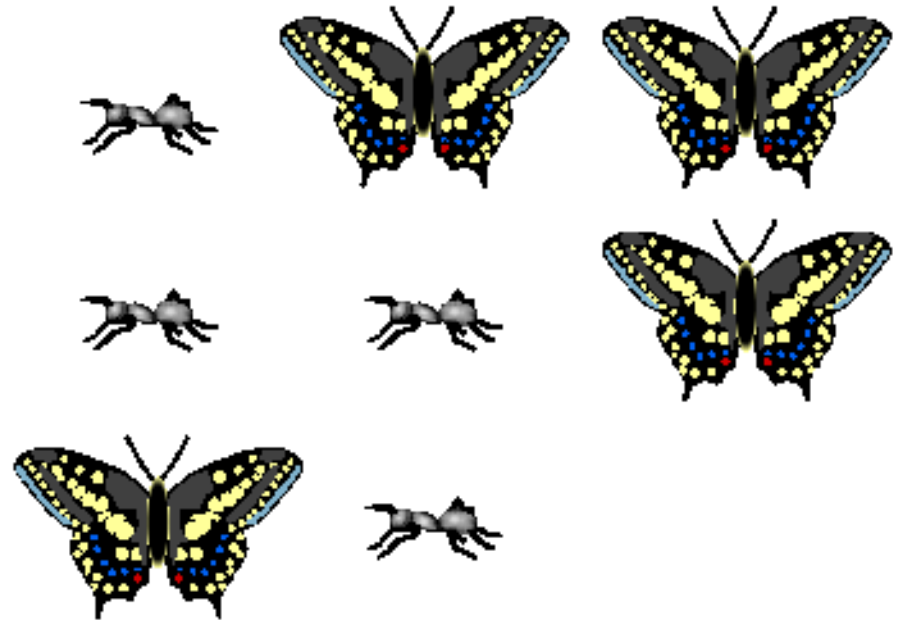


$$S = 3, D = 0.4$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$$

= probability that two randomly selected individuals are of different species

Sample B



$$S = 2, D = 0.5$$

4) modèles espèce-centrés

Modèles multi-espèces: utilisés pour comprendre comment certains indices de diversité biologiques répondent à des perturbations

Utilisation de différents indices pour quantifier la « biodiversité »
Basés sur

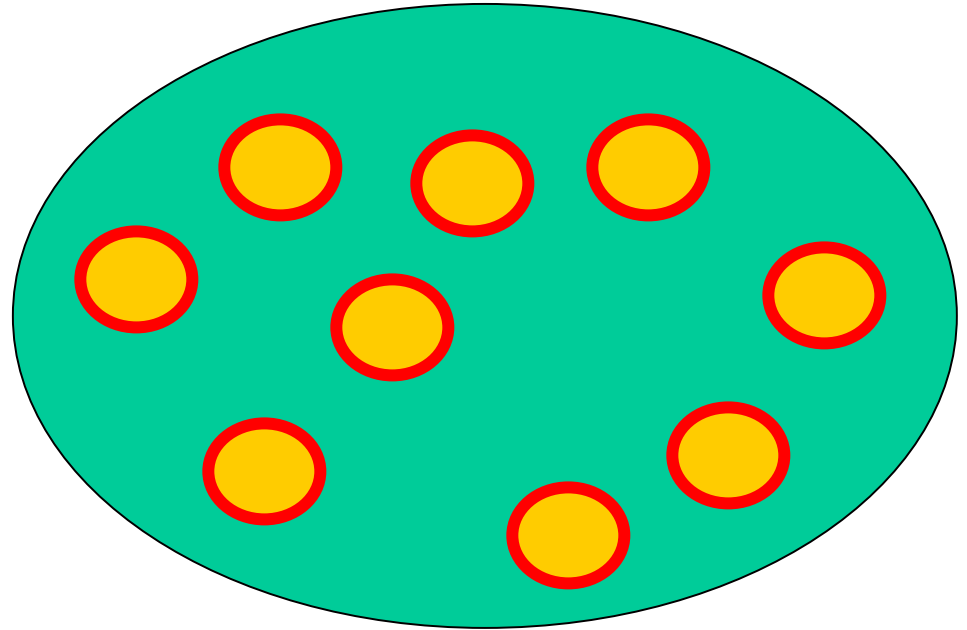
- le nb d'espèces (richesse)
- les abondances relatives de ces espèces (Simpson, Shannon-Wiener, Evenness...)
- des aspect fonctionnels (\neq taxonomiques)
(ex: **SPECIALISATION**)

Spécialisation

- **Generalist**
 - large niches
 - tolerate wide range of environmental variations
 - do better during changing environmental conditions
- **Specialist**
 - narrow niches
 - more likely to become endangered
 - do better under consistent environmental conditions



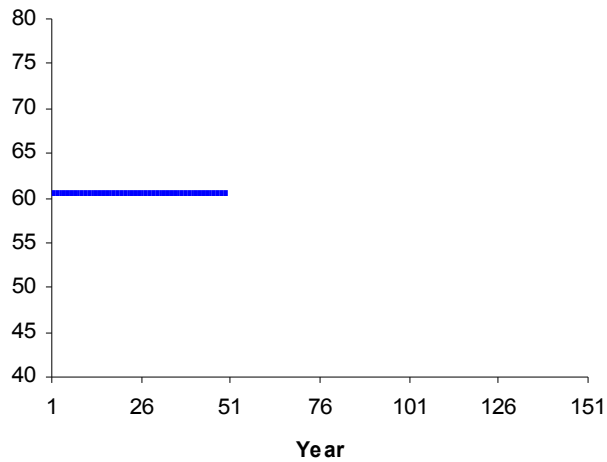
Modèle de méta-communauté et indices de biodiversité



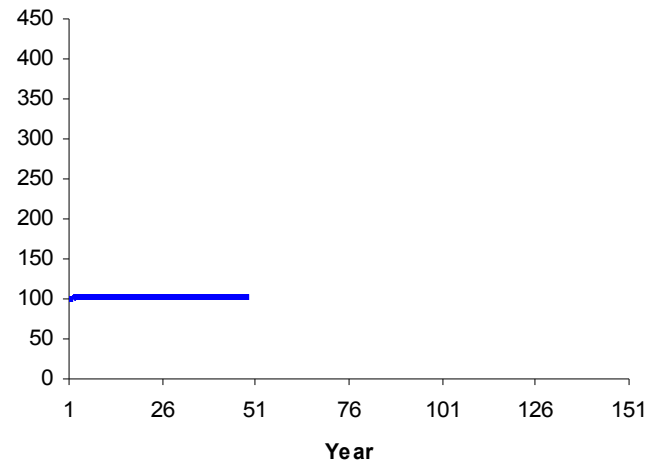
- Species-based model
- 100 sp., different growth rates, specialization levels
- Sp. Distributed in 100 communities
- Specialist species more affected by disturbance
- Response of various biodiversity indicators to disturbance?

Modèle de méta-communauté et indices de biodiversité

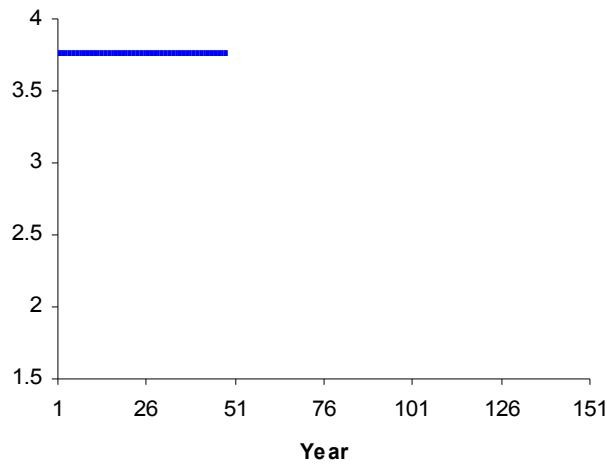
Mean community specific richness



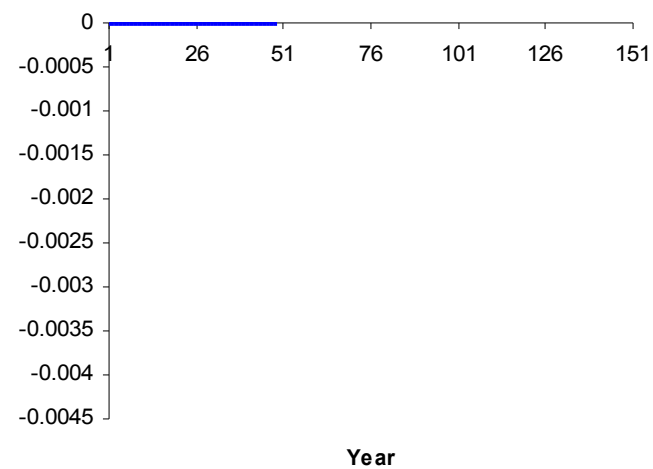
Mean standardised abundance of species



Shannon index

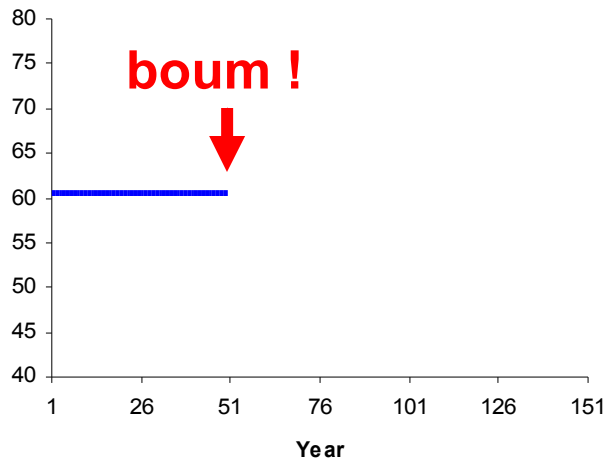


Community specialisation index

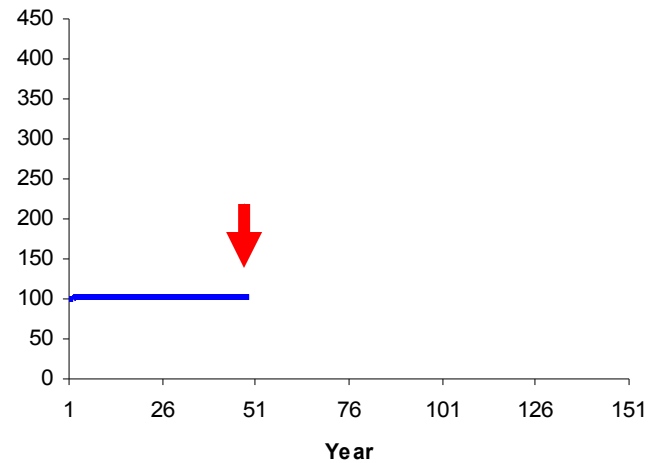


Modèle de méta-communauté et indices de biodiversité

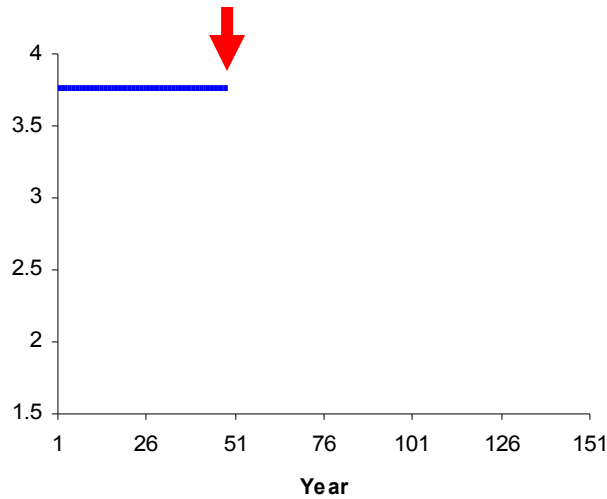
Mean community specific richness



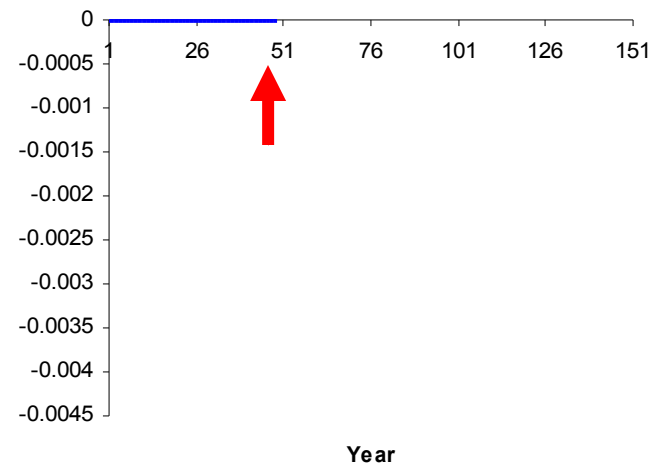
Mean standardised abundance of species



Shannon index

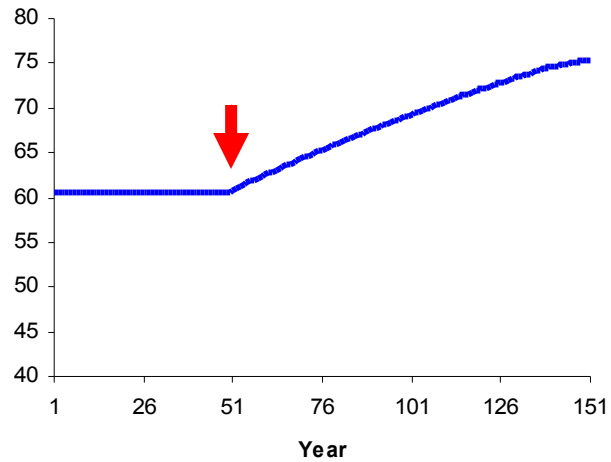


Community specialisation index

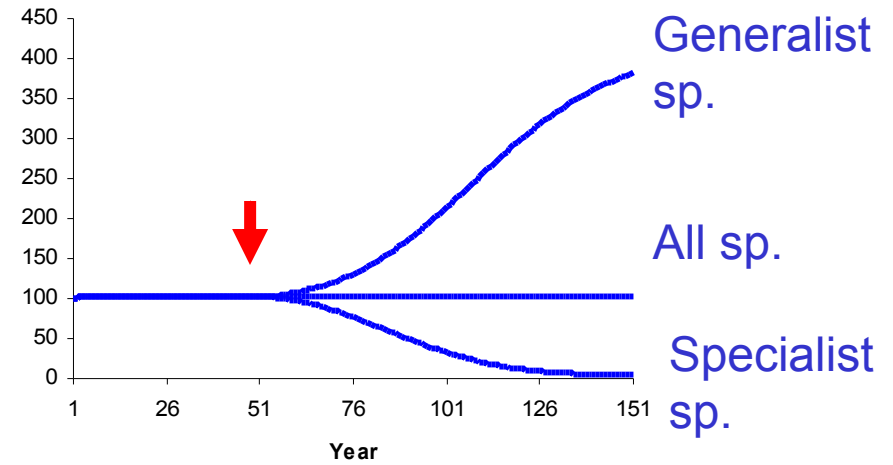


Modèle de méta-communauté et indices de biodiversité

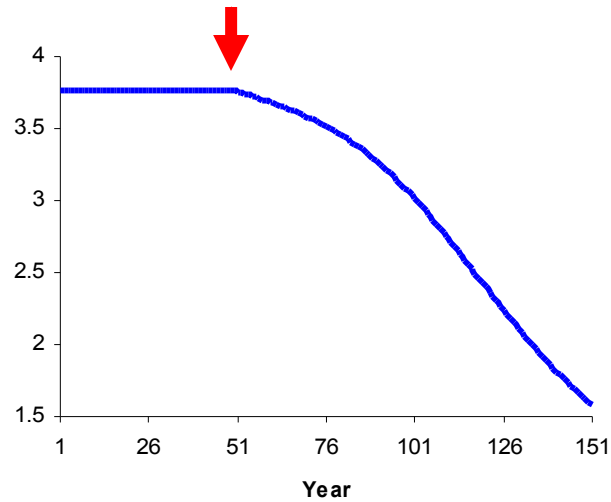
Mean community specific richness



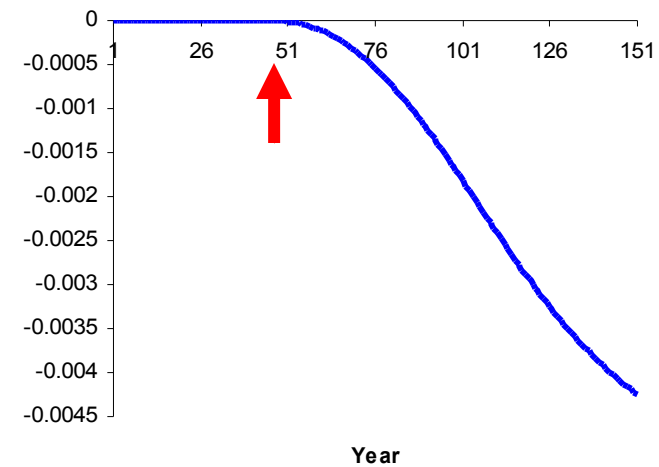
Mean standardised abundance of species



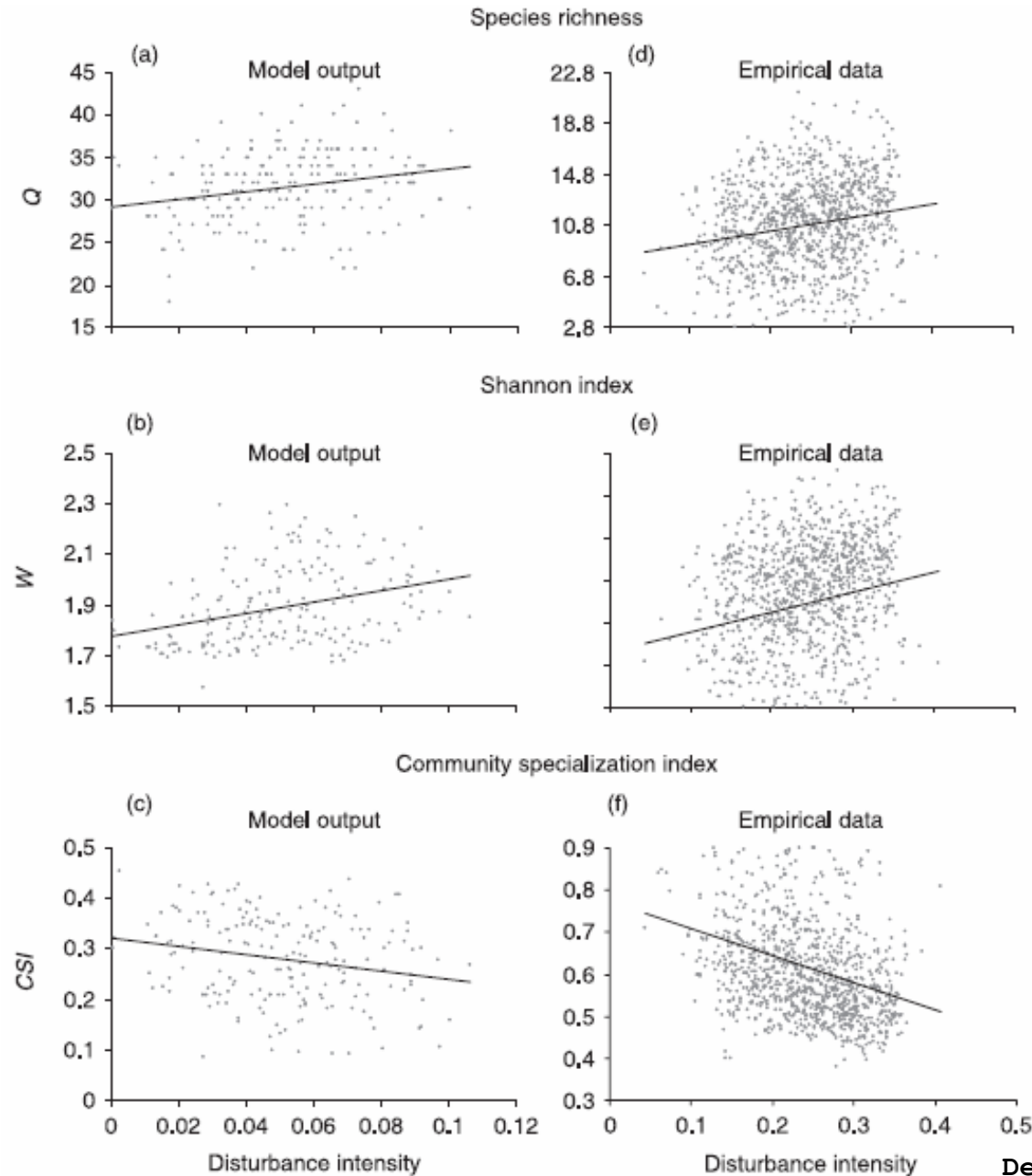
Shannon index



Community specialisation index



Modèle de méta-communauté et indices de biodiversité



Développement d'indices de biodiversité

Prise en compte de:

- Traits biologiques (ex: fonction de pollinisation, morphologie...)

- Philogénie (e.g. Diversité phylogénétique avec plus ou moins de poids à la rareté)

$$H_a(\mathbf{p}) = \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i^a\right) / (a-1). \quad I_a = \sum_{K=1}^N (t_K - t_{K-1}) H_{a,K}$$

Pavoine et al. 2009 Ecol. Lett.

Décomposition de la diversité selon des facteurs hiérarchiques ou croisés (e.g. espace et temps)

$$\overbrace{H(P_{\bullet\bullet})}^{\text{Diversité totale}} = \overbrace{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^m \lambda_i \mu_j H(P_{ij})}^{\text{Diversité moyenne intra-collection}} + \overbrace{-J_1(\{P_{i\bullet}\} : \{\lambda_i\})}^{\text{Effet du facteur A}} + \overbrace{-J_1(\{P_{\bullet j}\} : \{\mu_j\})}^{\text{Effet du facteur B}} + \overbrace{J_2(\{P_{ij}\} : \{\lambda_i \mu_j\})}^{\text{Effet de l'interaction entre A et B}}.$$

Pavoine et al. 2005 Envir. Ecol. Stat.

5) Autres modèles

Modèles présentés ici

- Démographie
- Appliqués
- (purement) Biologiques
- Stochastiques
- Mécanistes

5) Autres modèles

Modèles évolutifs, systèmes de reproduction des plantes

Fluctuations
environnement



Fluctuations
Coeff
sélection



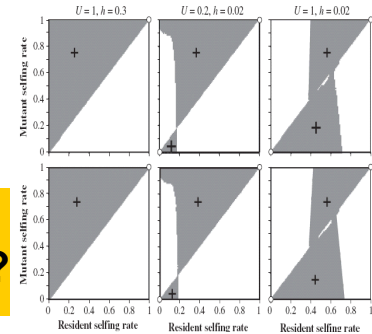
Variance
Dépression de
consang



Purge ?

Évolution
Autofécondation ?

porcher et al. 2009 J. Evol Biol.



Modélisation d'aires de distributions d'oiseaux

Distribution
actuelle

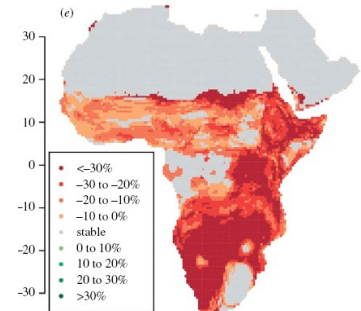


Simulations
climatiques



Modélisation
statistique de la
distribution future

Barbet-Massin et al. 2009 Biol. Lett.



Modélisation mathématique démo-génétique

Theodorou et al. 2009 J. Evol. Biol.

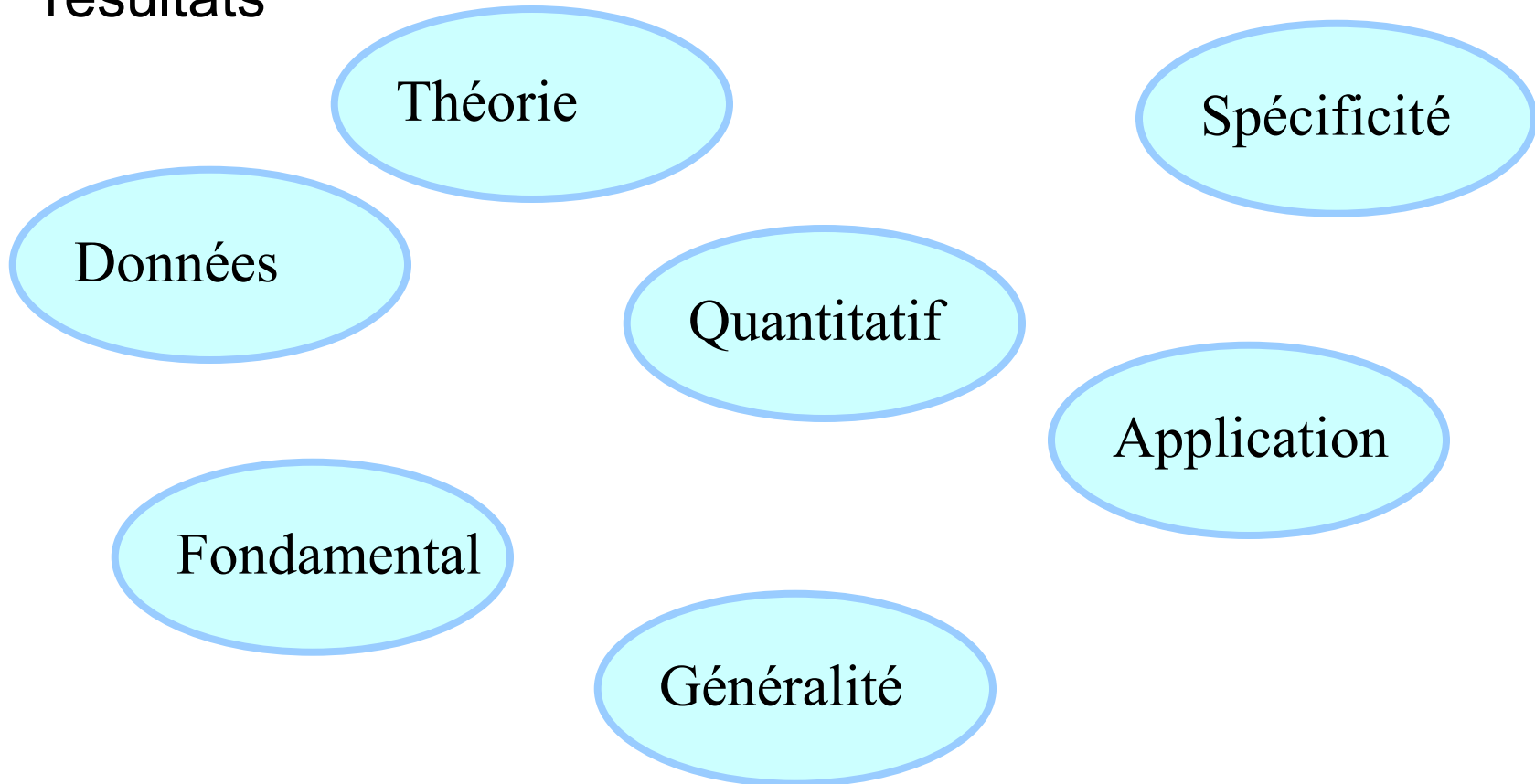
Modélisation mathématique Bio-économique

Delara & Doyen 2008 *Sustainable management of natural resources* (Springer)

6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

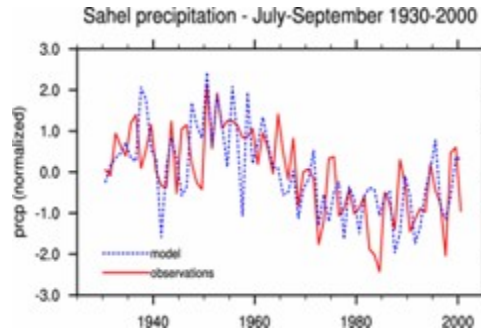
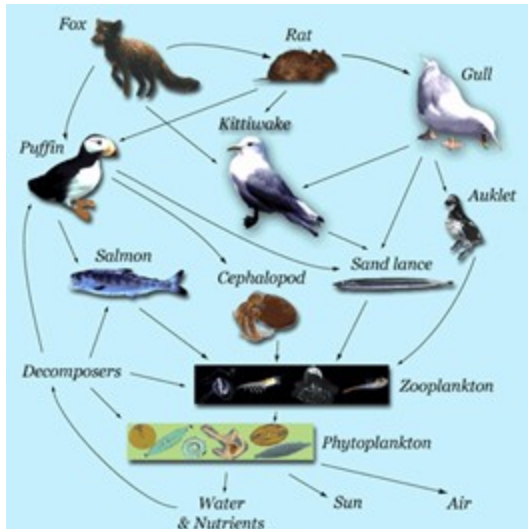
-Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats



6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

-Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats

-Données



6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

-Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats

-Données

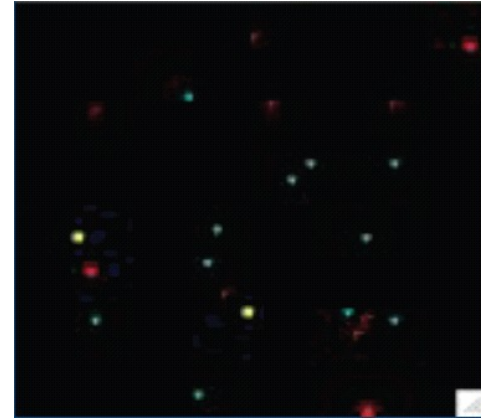
-Intégration de la variabilité inter-individuelle et environnementale

6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

- Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats
- Données
- Intégration de la variabilité inter-individuelle et environnementale
- Peu de prise en compte de facteurs non biologiques

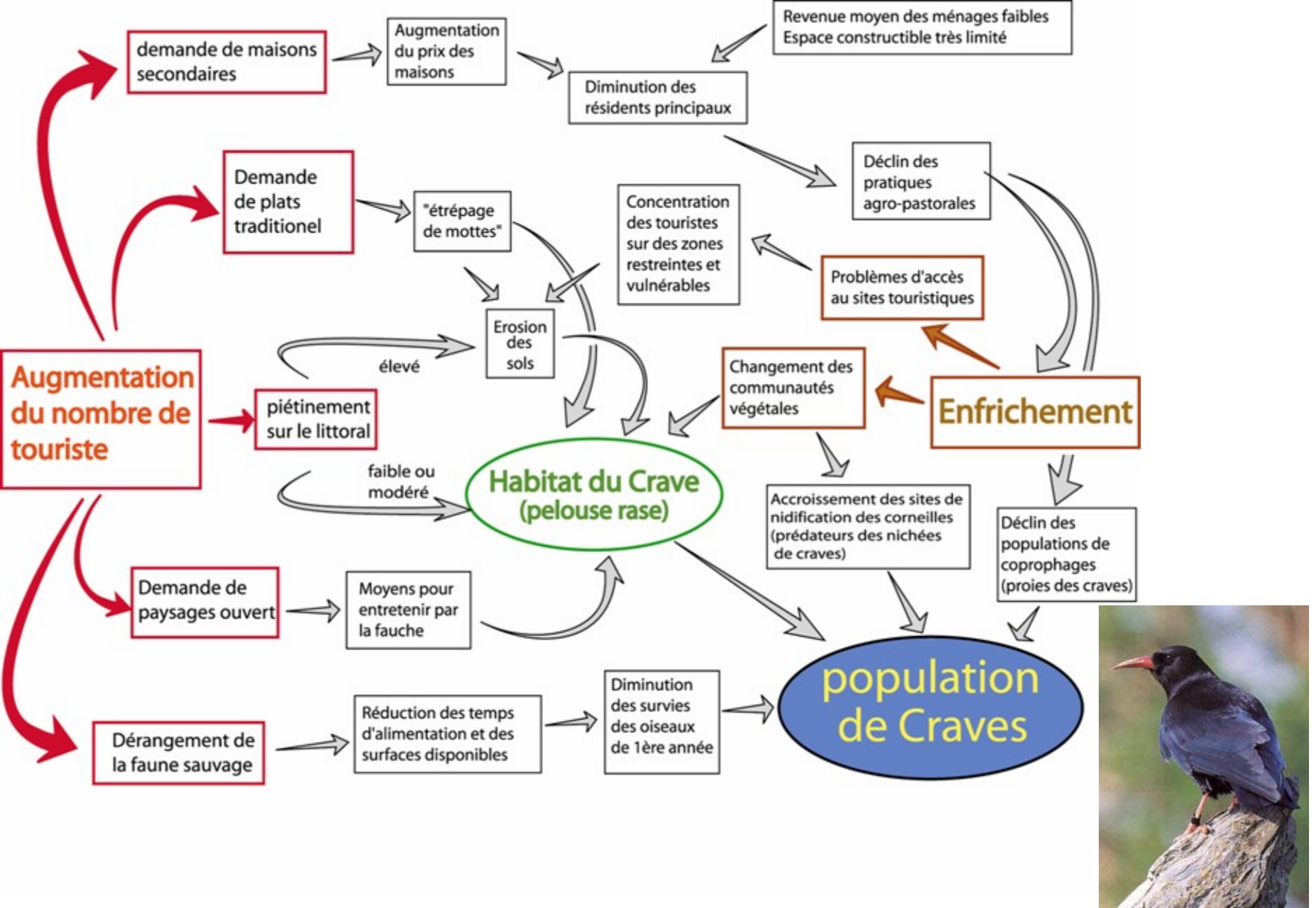
Quelques pistes pour résoudre ces problèmes?

Automates cellulaires, Modèles multi-agents...



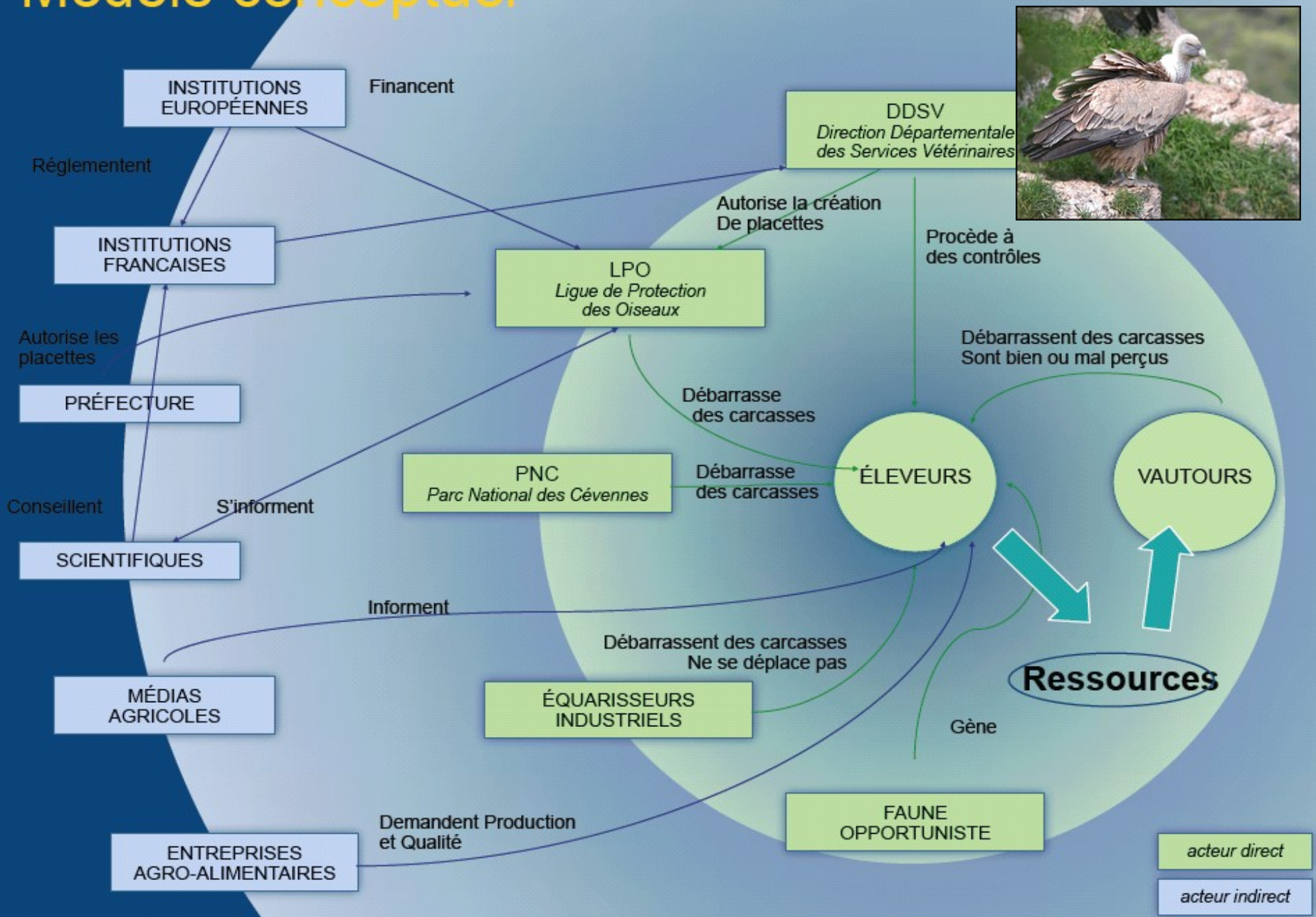
Lorrilière et al. 2009 *Ibis*

Deygout et al. 2009 *Ecol. Mod.*



(d'après Christian Kerbiriou et Harold Levrel)

Modèle conceptuel



6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

- Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats
- Données
- Intégration de la variabilité inter-individuelle et environnementale
- Peu de prise en compte de facteurs non biologiques

6) Conclusion: problèmes rencontrés et perspectives

- Nombreux compromis quant à la portée et la pertinence des résultats
- Données
- Intégration de la variabilité inter-individuelle et environnementale
- Peu de prise en compte de facteurs non biologiques
- Compétences: mathématiques, algorithmique, statistiques, informatique

Merci, bonne journée