

Complexité et fonctionnement des écosystèmes

Introduction

J.C. Poggiale – jean-christophe.poggiale@univ-amu.fr

UMR CNRS 7294 – Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO)

Institut Pytheas (OSU)

Complexité – Systèmes complexes

Complexité vient du latin *complexus* qui signifie *ce qui est tissé ensemble*.

Un **système complexe** est un système composé d'un **grand nombre d'entités** qui **interagissent** de manière **non linéaire** et qui **rétroagit** sur ses composantes, de telle sorte que des **propriétés émergentes** apparaissent.

Différents **niveaux d'organisation** émergent d'un système complexe.

C'est un système **auto-organisé**, dont l'évolution n'est **pas prédictible** sur la base des connaissances sur ses composants.

Complexité – Systèmes complexes

Un système compliqué n'est pas un système complexe.

Exemple :

Complexité – Systèmes complexes

Un système compliqué n'est pas un système complexe.

Exemple : un ordinateur est un système compliqué, mais toute sa structure est pensée et organisée pour remplir des fonctions prédéfinies et son évolution est complètement prédictible à partir de ses constituants, par construction. Il n'y a pas d'auto-organisation ou de propriété émergente.

Complexité – Systèmes complexes

Un système compliqué n'est pas un système complexe.

Exemple : un ordinateur est un système compliqué, mais toute sa structure est pensée et organisée pour remplir des fonctions prédéfinies et son évolution est complètement prédictible à partir de ses constituants, par construction. Il n'y a pas d'auto-organisation ou de propriété émergente.

Un cerveau, un marché économique, un écosystème, une société sont des exemples de systèmes complexes.

Conceptualisation – Modèles

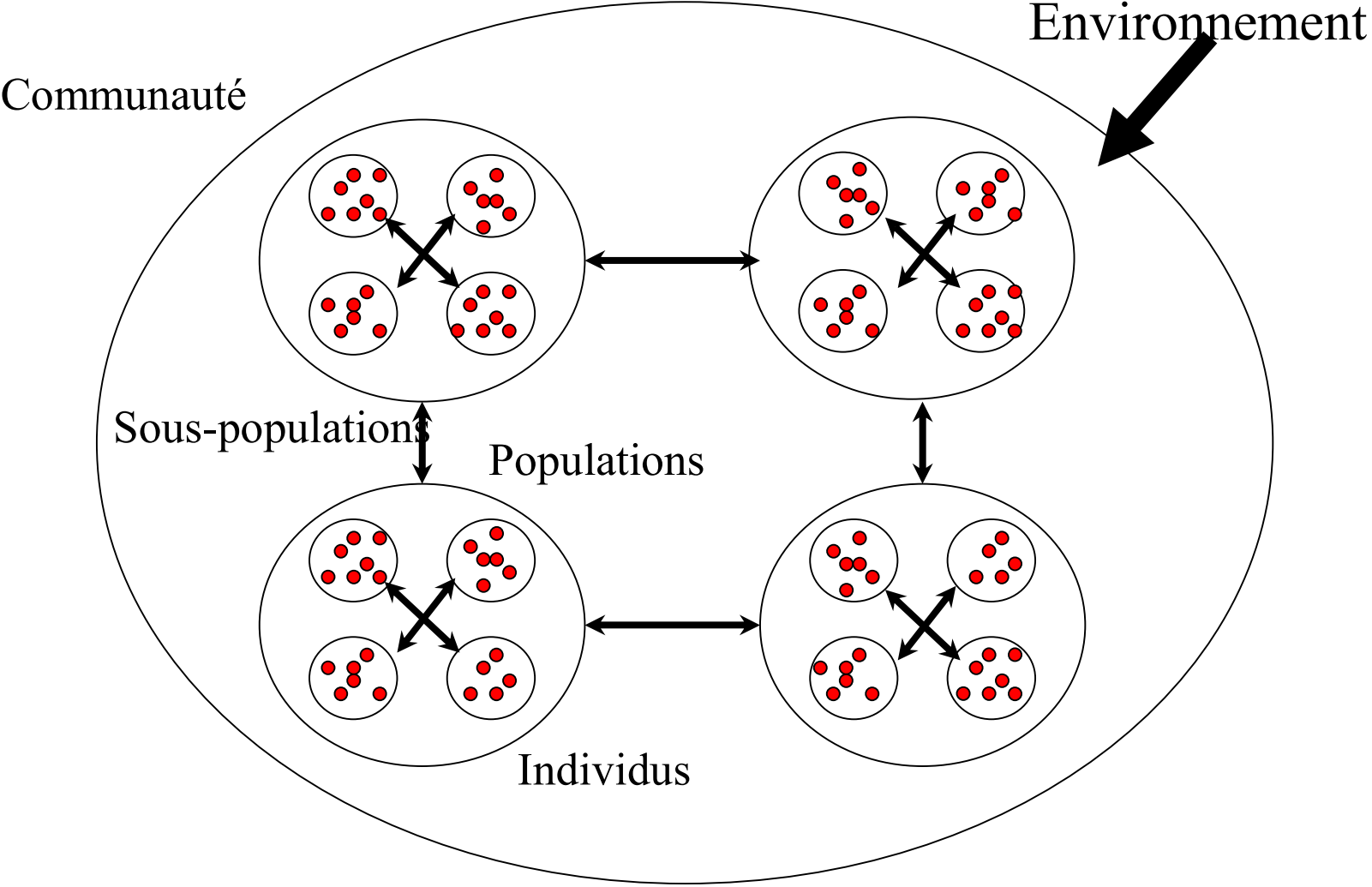
Ecosystème = grand nombre d'entités qui interagissent à différentes échelles d'espace et de temps, entre elles et avec leur environnement, lui-même variable au cours du temps et en fonction de l'espace.

Modèle : structure conceptuelle reprenant les éléments supposés majeurs et permettant une visualisation intégrée de ces éléments

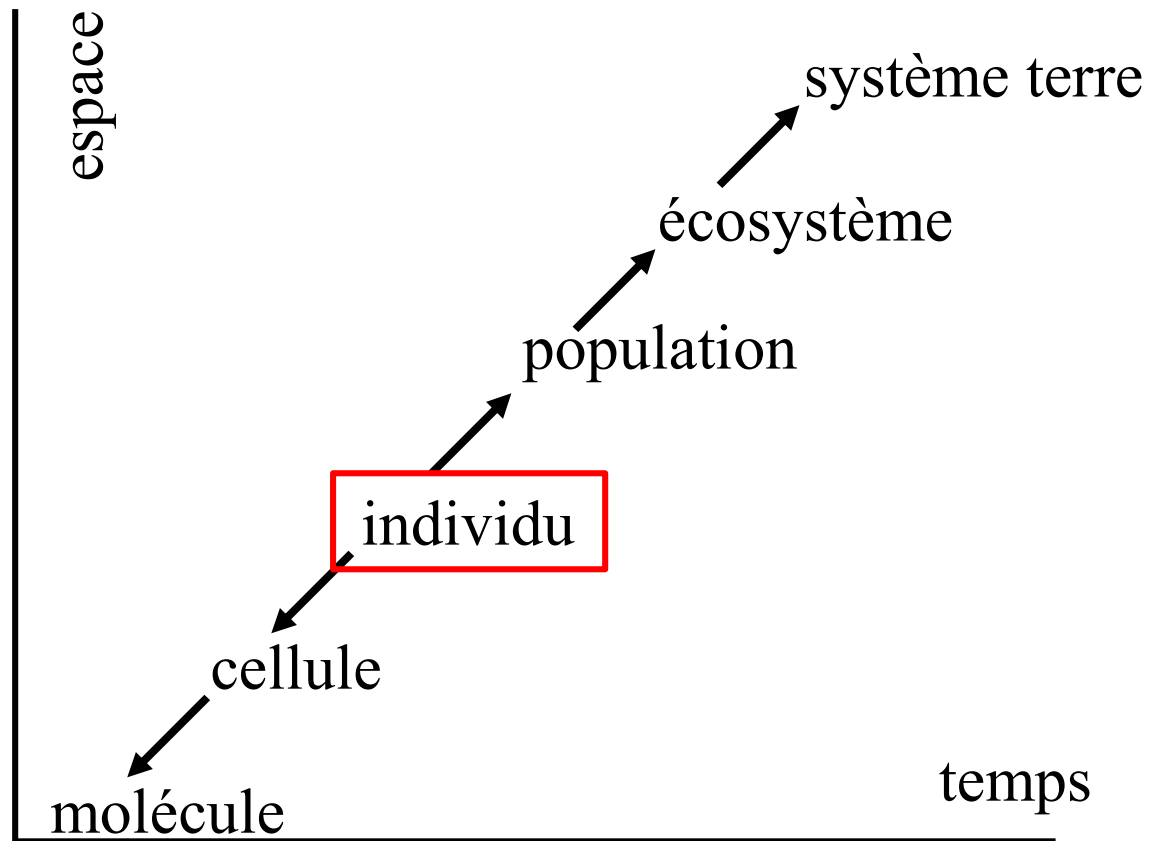
Quantification de l'une ou de plusieurs de ses composantes, suivi de la dynamique, effets des interactions

Description des processus majeurs dans chaque cas de figure étudié, définition des variables d'intérêts, mise en évidence de relations entre ces variables sous certaines conditions

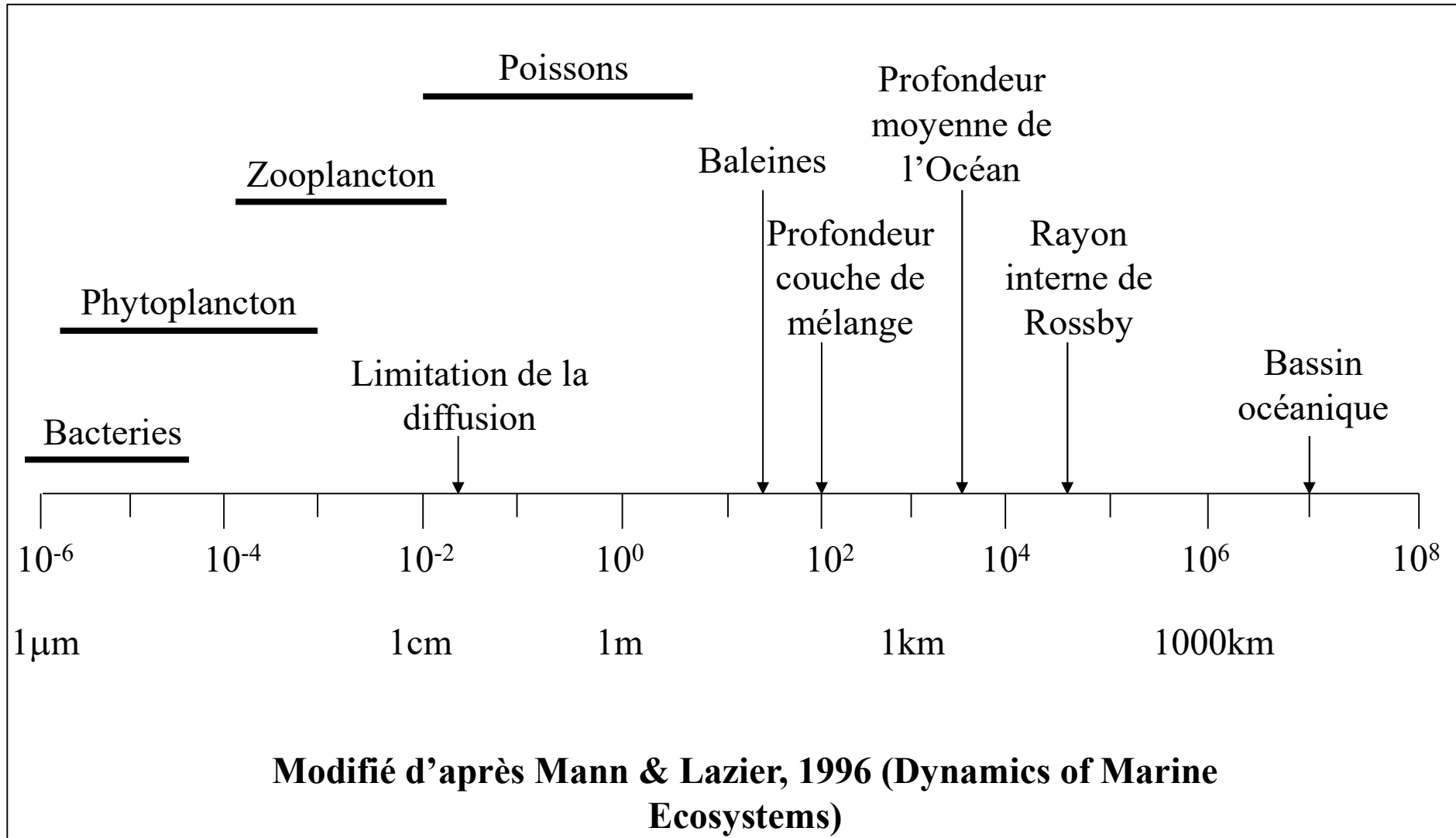
Structure hiérarchique des écosystèmes



Echelles d'espace et de temps

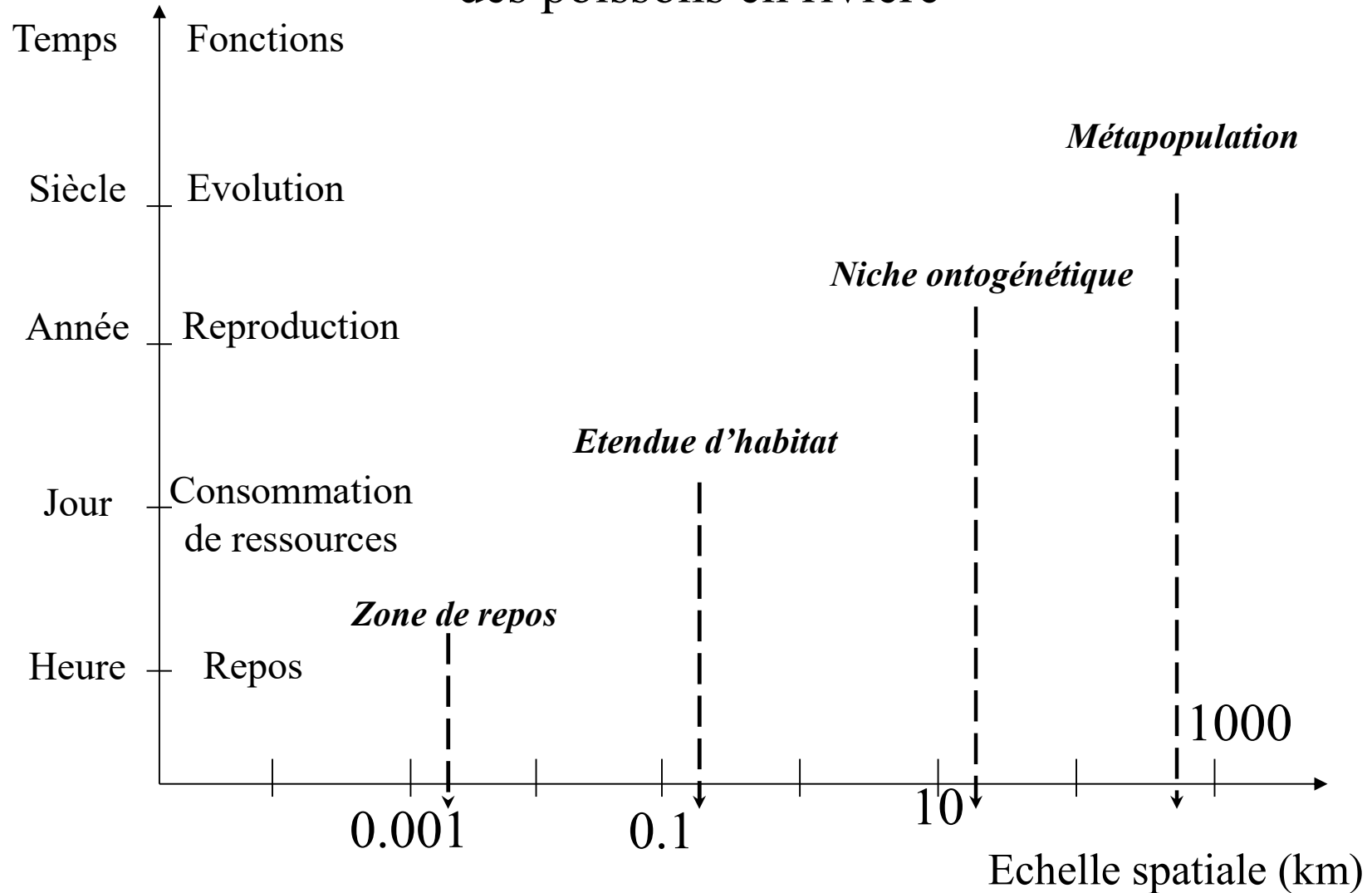


Quelques échelles biologiques et physiques caractéristiques des écosystèmes marins

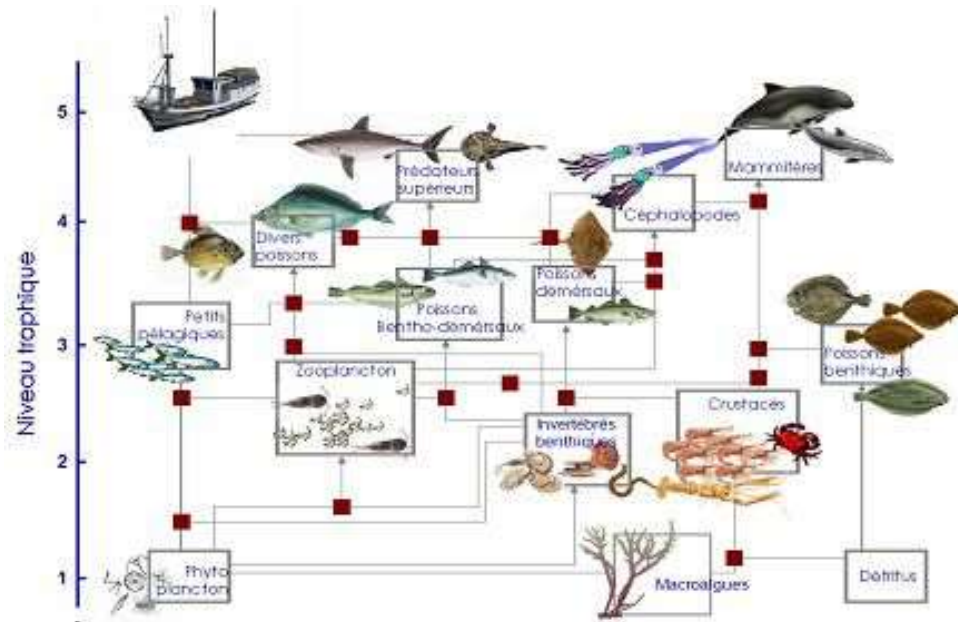


Echelles d'espace et de temps

Exemple : les 4 types majeurs d'habitats fondés sur les activités des poissons en rivière

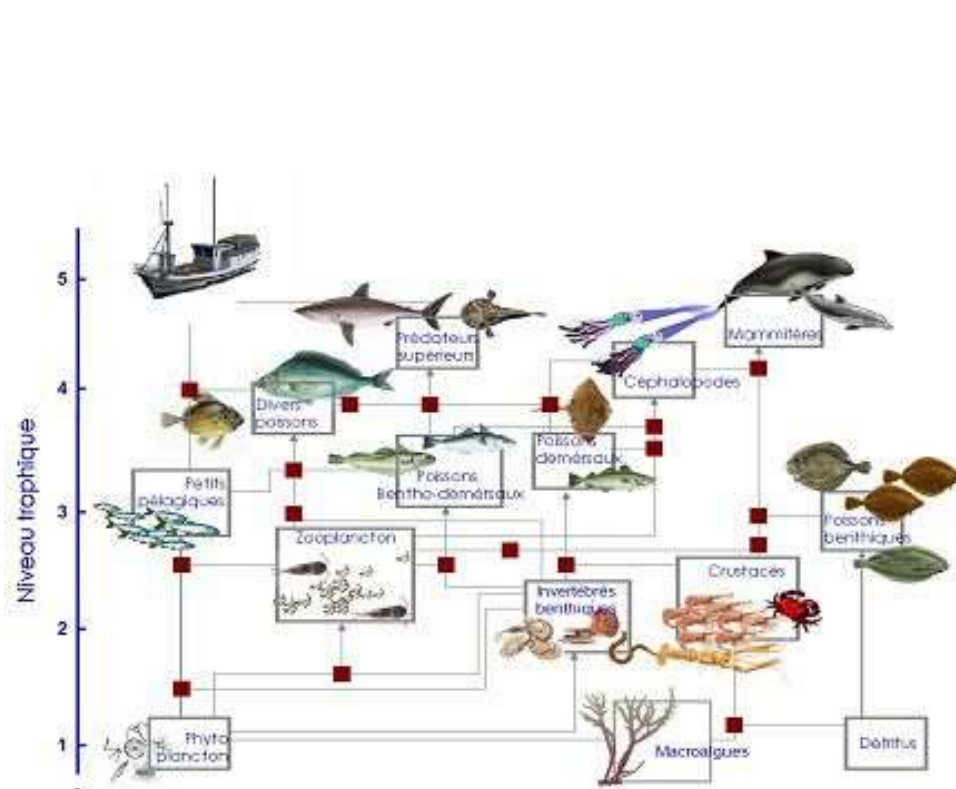


Structure fonctionnelle des écosystèmes marins



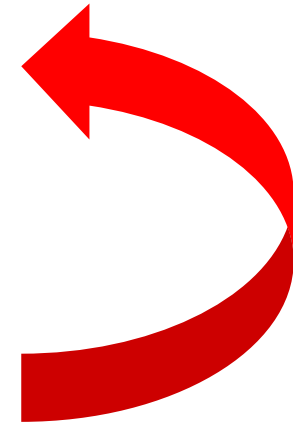
<http://wwz.ifremer.fr/manchemerdunord/>

Structure fonctionnelle des écosystèmes marins



<http://wwz.ifremer.fr/manchemerdunord/>

Transfert
d'énergie
et de
biomasse



Métacommunauté

Métapopulation

repos

habitat

Niche ontogénique

Echelle spatiale / structure spatiale / hétérogénéité

Modèles biogéochimiques

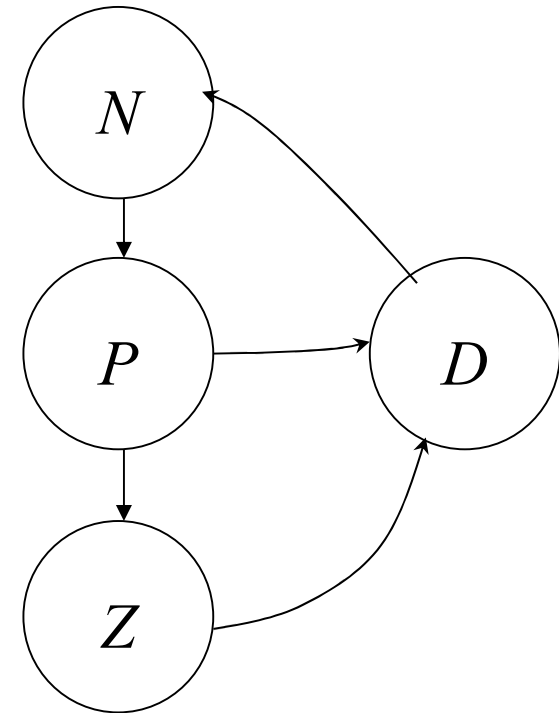
Modèle NPZD

$$\frac{dN}{dt} = -V(N, P) + R(D)$$

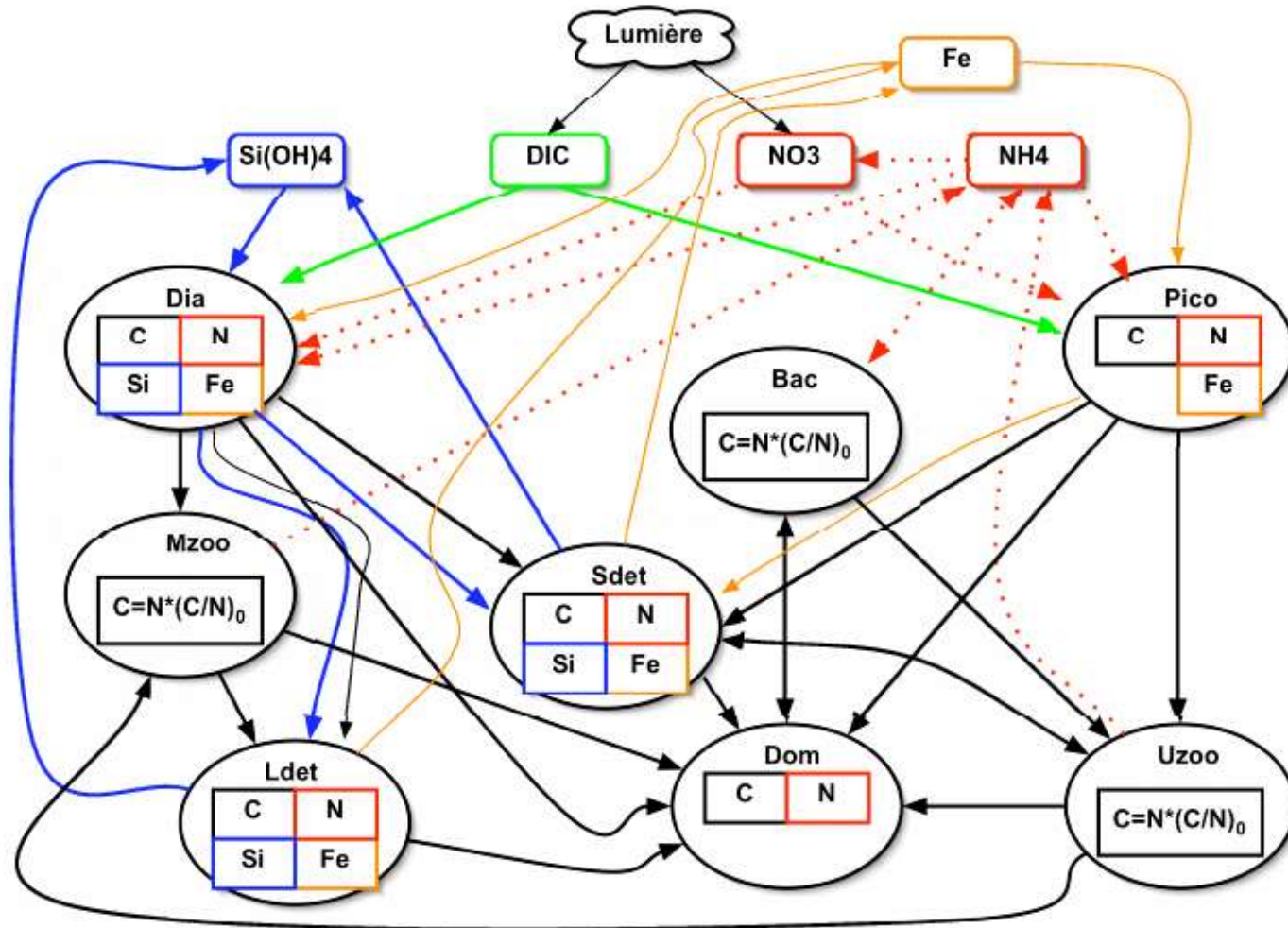
$$\frac{dP}{dt} = eV(N, P) - G(P, Z) - E_P(P)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \varepsilon G(P, Z) - \mu(Z) - E_Z(Z)$$

$$\frac{dD}{dt} = E_P(P) + E_Z(Z) + (1-e)V(N, P) + (1-\varepsilon)G(P, Z) - R(D)$$

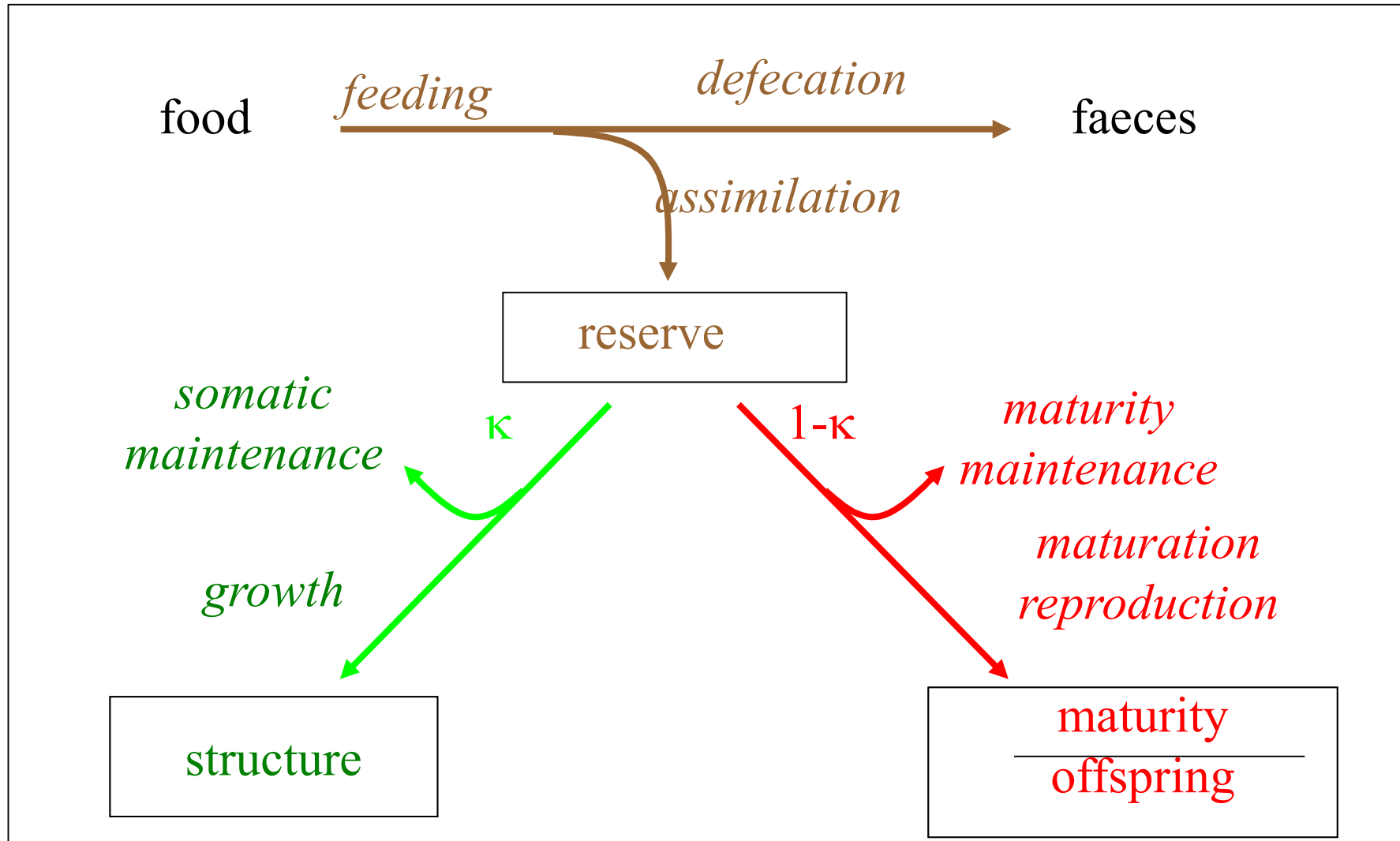


Modèles biogéochimiques



Mongin, M., D.M. Nelson and P. Pondaven.; U.S. JGOFS Synthesis & Modeling Project - Data. U.S. JGOFS. iPub: June 2005. 'date you accessed the data' <http://usjgofs.whoi.edu/las/servlets/datasets>

Modèles énergétiques (DEB)

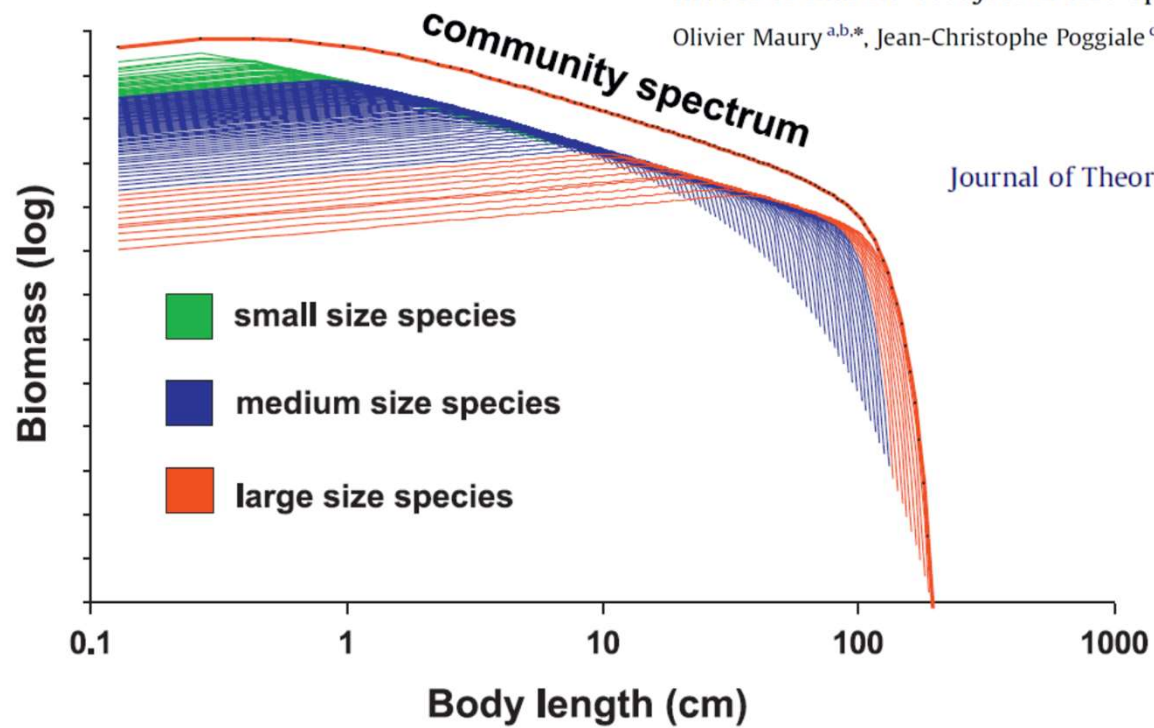


Modèles énergétiques de communautés

From individuals to populations to communities: A dynamic energy budget model of marine ecosystem size-spectrum including life history diversity

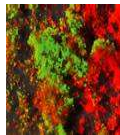
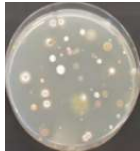
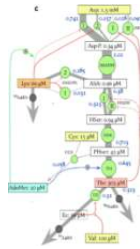
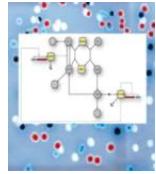
Olivier Maury ^{a,b,*}, Jean-Christophe Poggiale ^{c,1}

Journal of Theoretical Biology 324 (2013) 52–71



Echelles spatio-temporelles – Niveaux d'organisation - Données

Information - Données



Complexité

Individus

Bilan énergétique –
Propriétés génétiques
– Métabolismes -
Comportements

Groupes
fonctionnels

Activités –
Expressions
génétiques -

Communautés

Interactions
biotiques – Réseaux
trophiques

Ecosystèmes

Forçages
environnementaux –
Problèmes sociétaux
– Bilan énergétique

L'agrégation des variables

Notion introduite en écologie par Levin, Iwasa et
Andreasen (1987, 1989)

$X = (x_1; x_2; \dots; x_N)$ Variables décrivant le système à
un niveau d'organisation détaillé
 $N \gg 1$

Changement de niveau \Rightarrow changement de variables d'intérêt

$Y = (y_1; y_2; \dots; y_n)$ Variables décrivant le système à
un niveau d'organisation
supérieur
 $n \ll N$

L'agrégation des variables

$$y_i = y_i(X) = y_i(\cdots; x_j; \cdots)$$

$$\frac{dx_j}{dt} = F_j(X)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{d}{dt}(y_i(X(t))) = \sum_{j=1}^N \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \frac{dx_j}{dt} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial y_i}{\partial x_j} F_j(X)$$

$$= G_j(Y)?$$

Résumé

- 1) Connaissance à chaque niveau d'organisation
- 2) Besoin de comprendre comment ces pièces de puzzles s'emboîtent
- 3) L'intégration de la connaissance complète conduit à des modèles conceptuels détaillés complexes
- 4) Besoin de simplifier les modèles – il est préférable de proposer des simplifications sur des critères objectifs

Le concept d'hétérogénéité

Homogène ?

uniforme

régulier

absence de changement

composition identique

bien mélangé

stable

Hétérogène ?

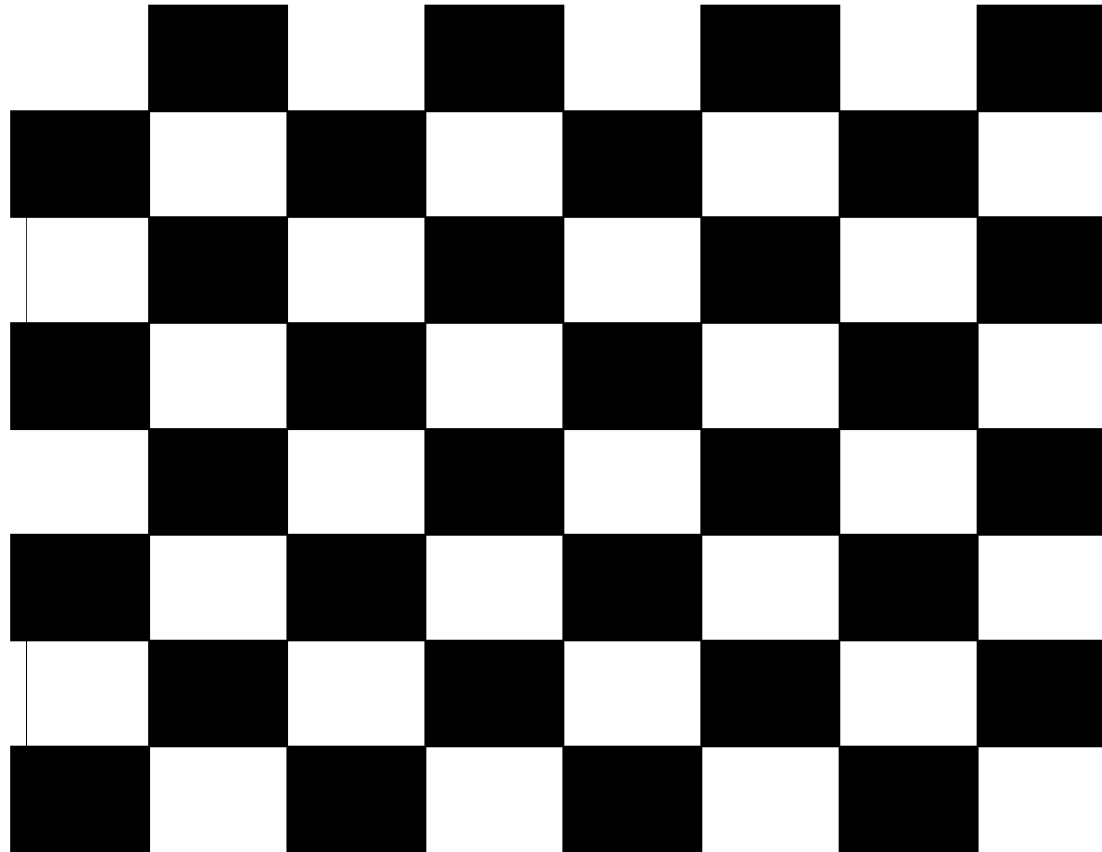
inhomogène

variable

erratique

Le concept d'hétérogénéité

spatiale

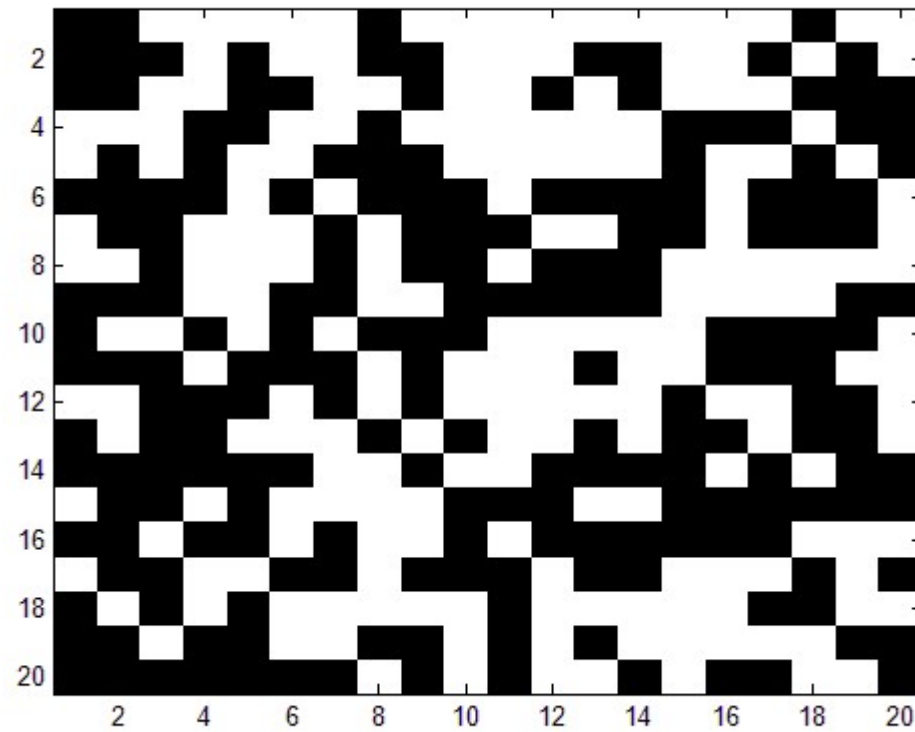


Ressources

■ Absence de ressources

Le concept d'hétérogénéité

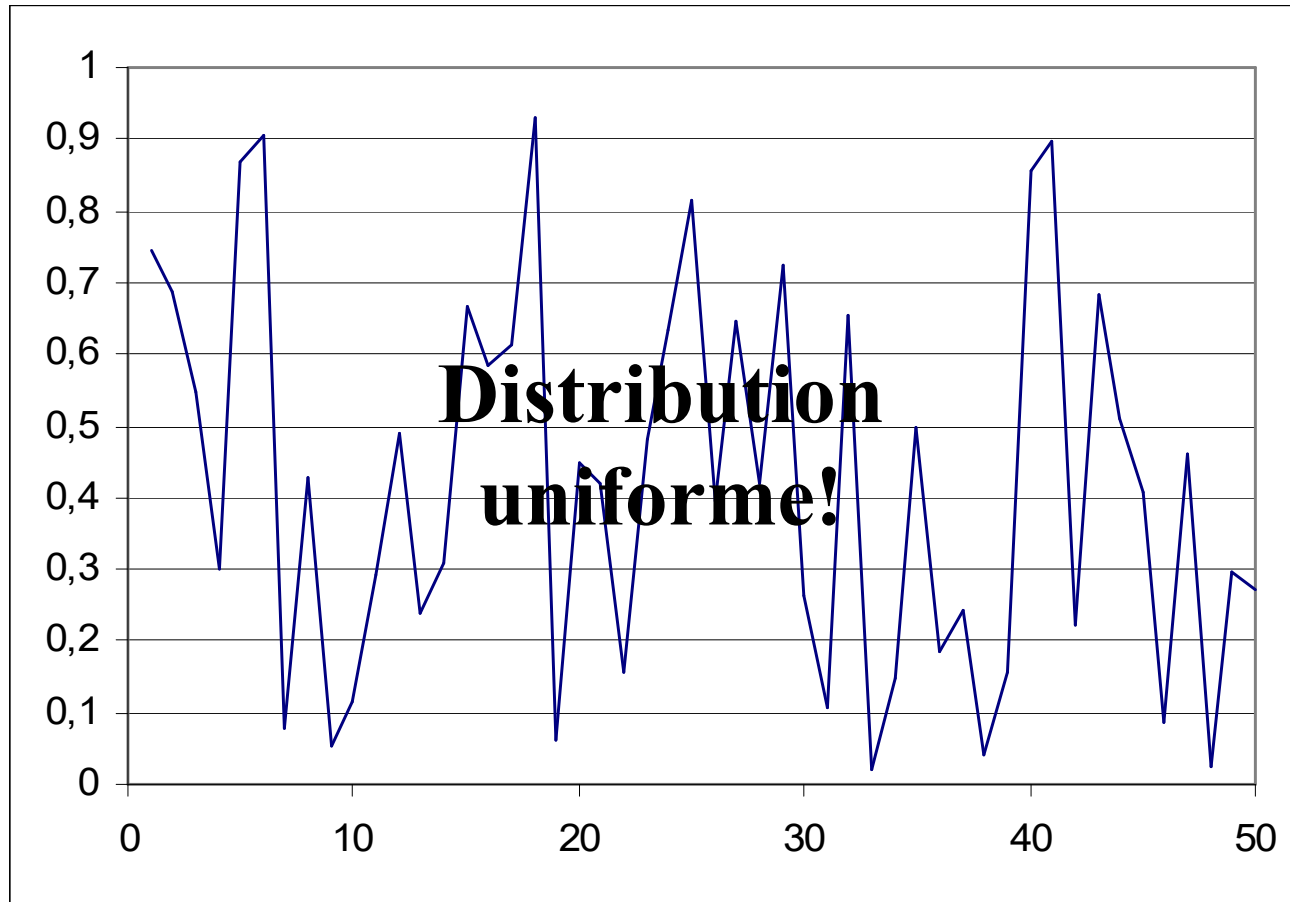
spatiale



=> Importance de l'échelle

Le concept d'hétérogénéité

temporelle



Pourquoi intégrer le concept d'hétérogénéité en écologie et dans les modèles?

- Jusque dans les années 1960, paradigme de l'homogénéité en écologie
- Impacts de l'hétérogénéité: sur la diversité spécifique/fonctionnelle, sur la richesse des conditions de vie
- Perturbations environnementales : situations génériques hors d'équilibre

Comment intégrer le concept d'hétérogénéité dans les modèles?

- Le concept d'hétérogénéité est lié à celui d'échelle spatiale - temporelle
- L'échelle est liée au niveau d'organisation dans la structure hiérarchique de l'écosystème
- La prise en compte de l'hétérogénéité peut être fondée sur la structure hiérarchique de l'écosystème
- Approche permettant le « transfert d'échelles »; études des effets « top-down » et « bottom-up »

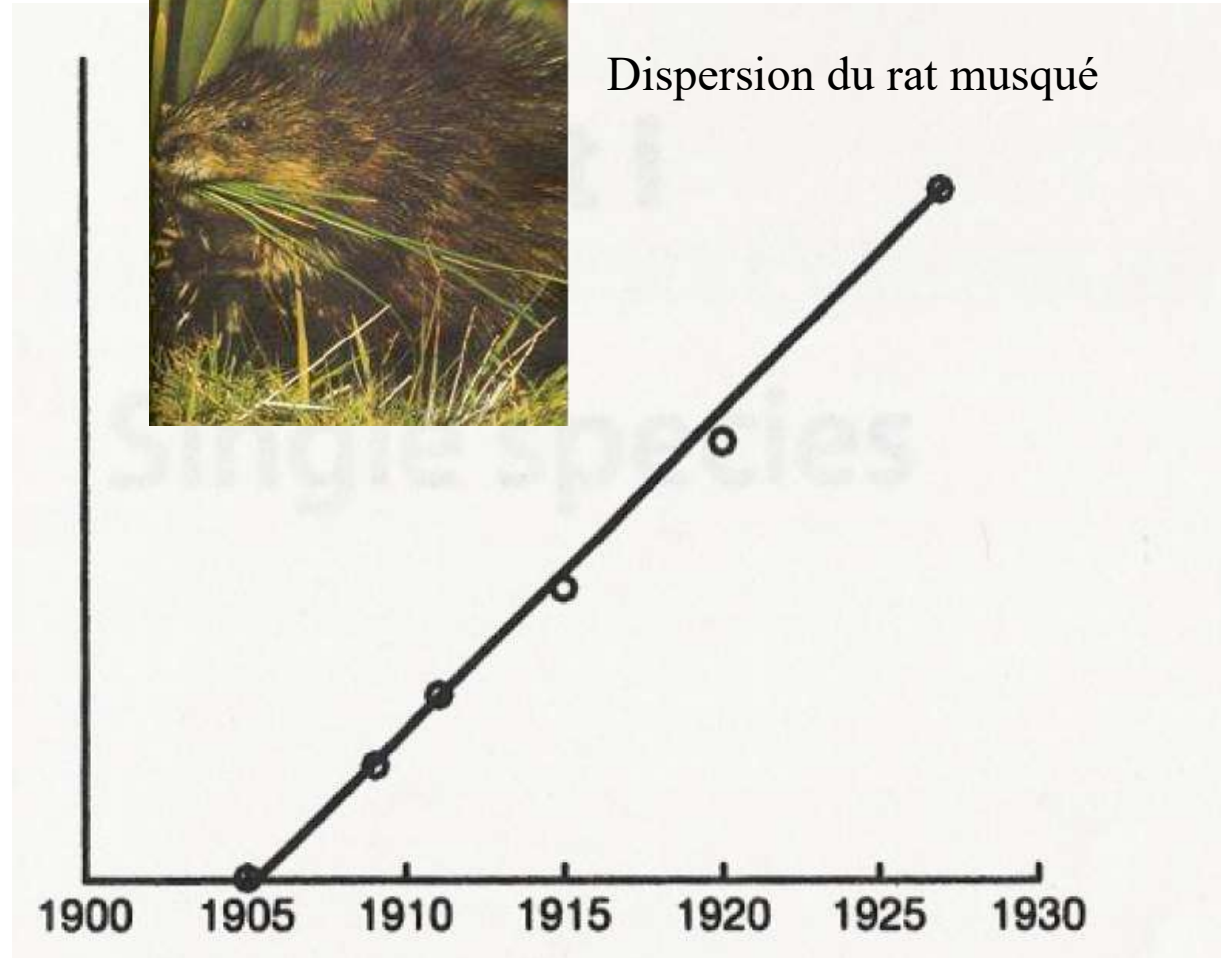
Structuration spatiale

- Propagation des fronts (espèces invasives, contamination, épidémies, ...)
- Formation de structures dans des environnements homogènes, source d'hétérogénéité (ex. : le zooplancton).
- Quelle est la taille minimale que doit avoir un domaine pour soutenir une biodiversité fixée? Y en a t'il une?

DYNAMIQUE DES POPULATIONS

Structuration spatiale

Racine carrée de la surface habitée en Europe Centrale



D'après Skellam, 1951

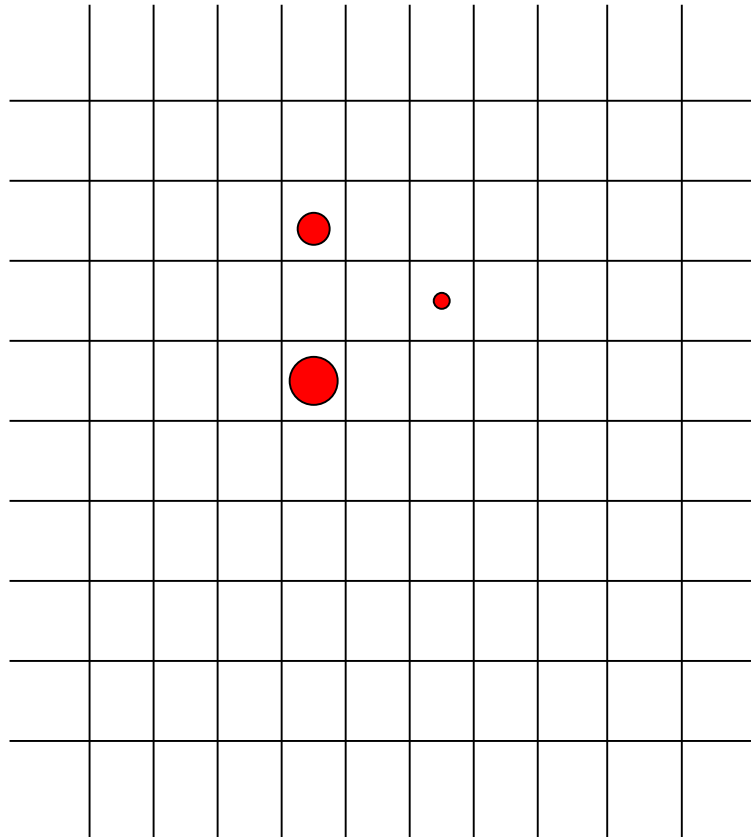
Années

PROCESSUS DE TRANSPORT

- Formation de structures
- Distribution spatiale des individus
- Impact de la structure spatiale sur la dynamique des communautés

PROCESSUS DE TRANSPORT

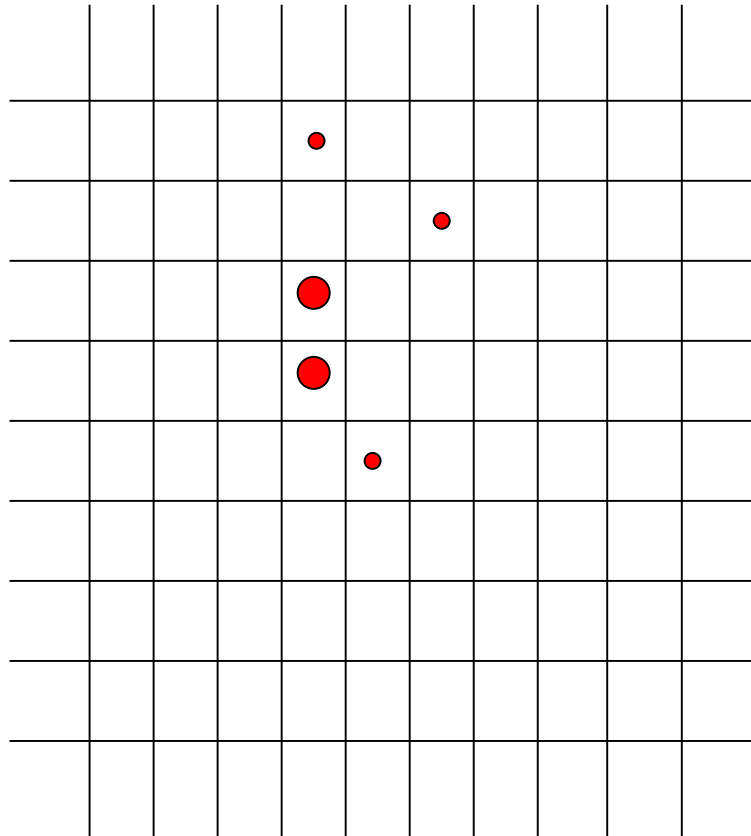
Transport diffusif



Situation à
l'instant t

PROCESSUS DE TRANSPORT

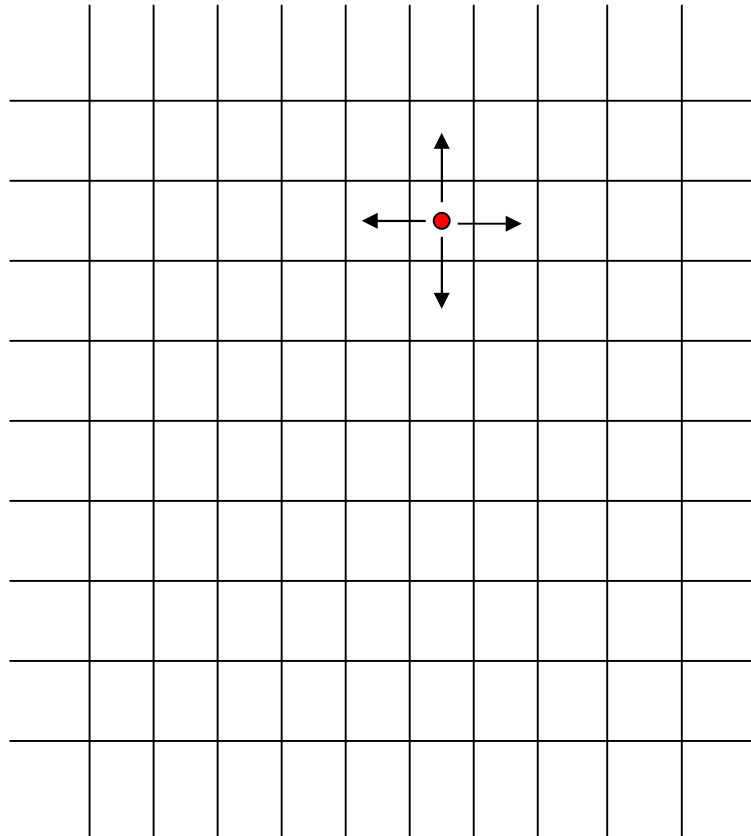
Transport diffusif



Situation à
l'instant $t+1$

PROCESSUS DE TRANSPORT

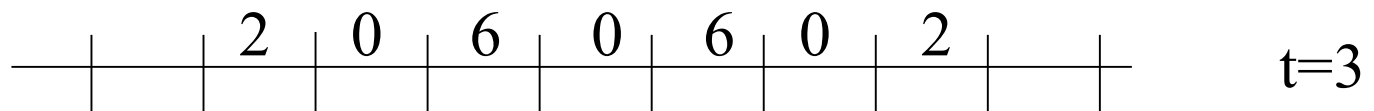
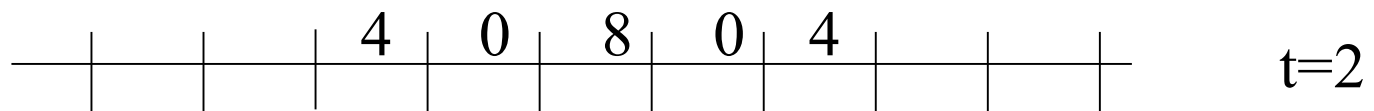
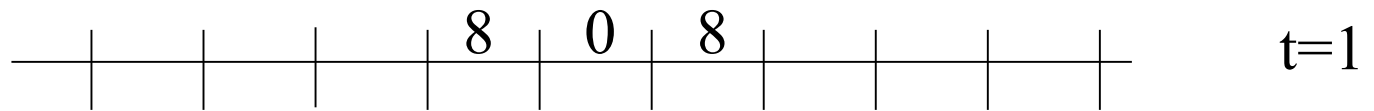
Transport diffusif



PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif

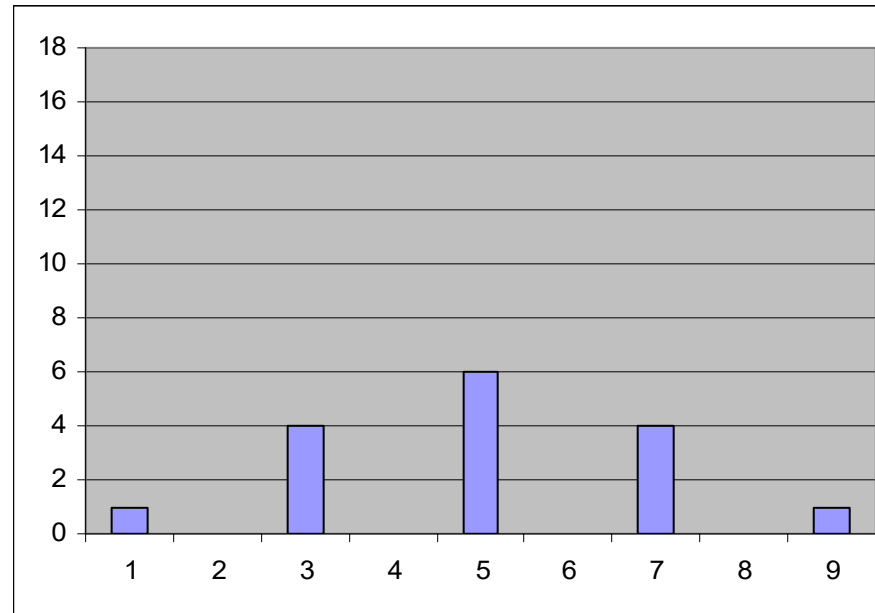
Exemple :



PROCESSUS DE TRANSPORT

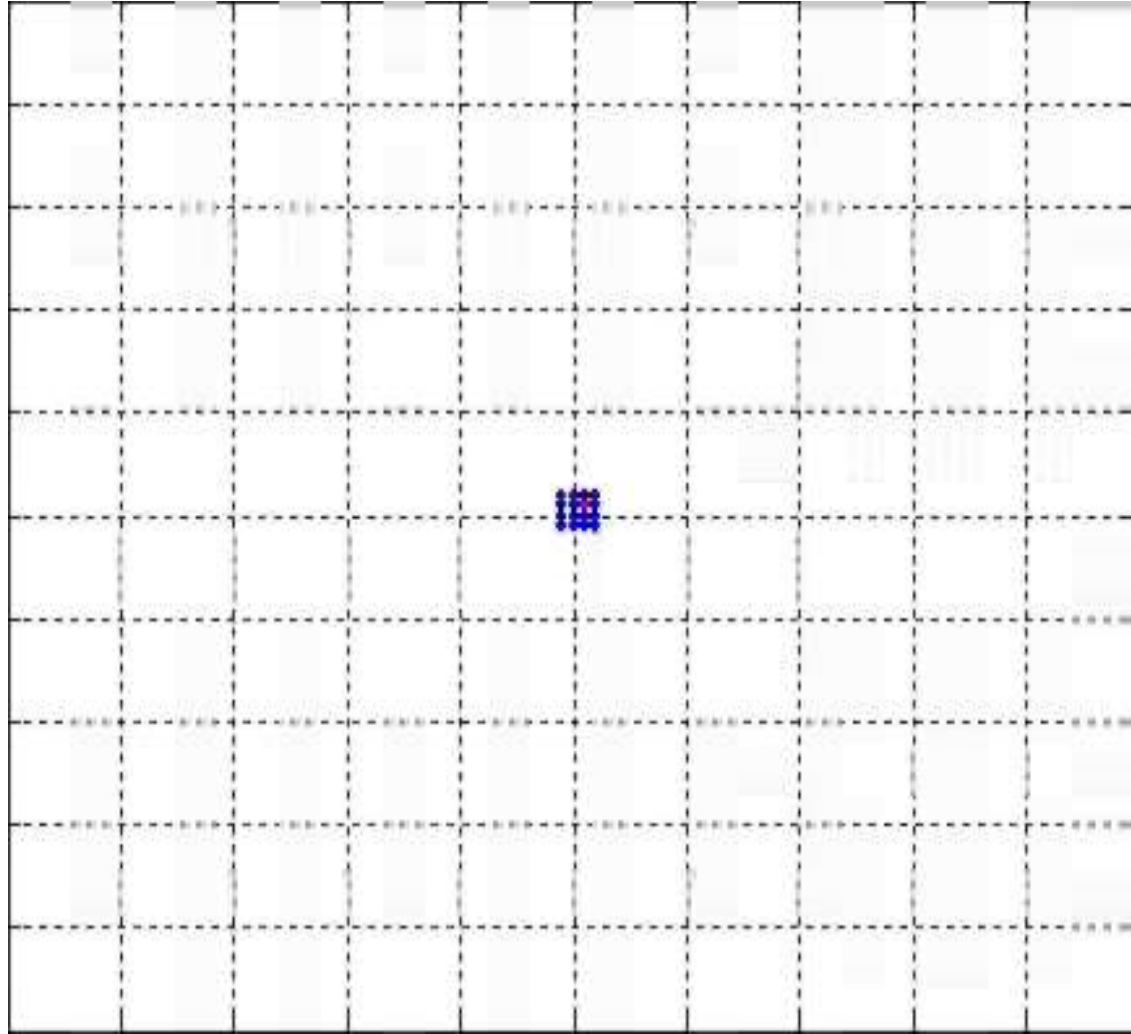
Transport diffusif

Exemple :



PROCESSUS DE TRANSPORT

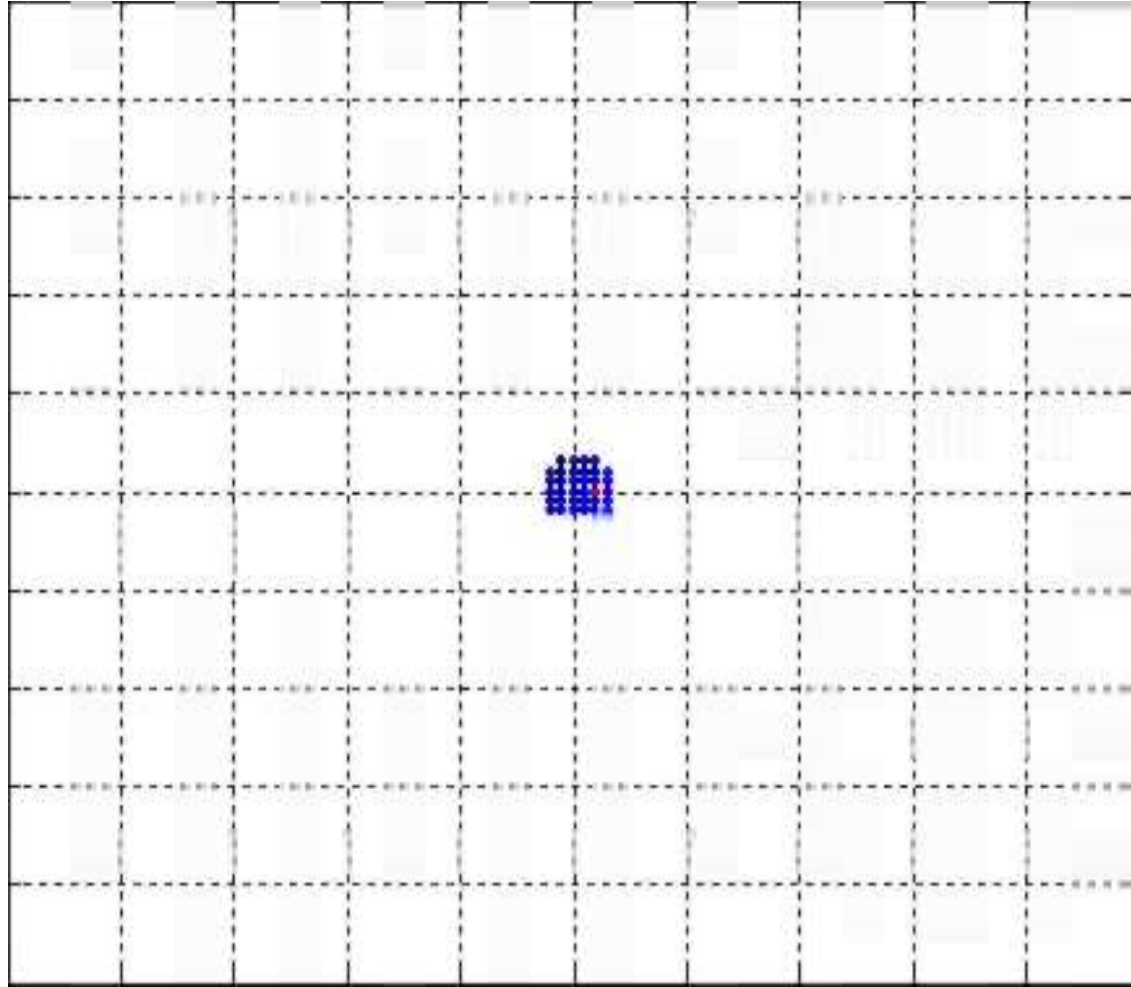
Transport diffusif



$D=1$

PROCESSUS DE TRANSPORT

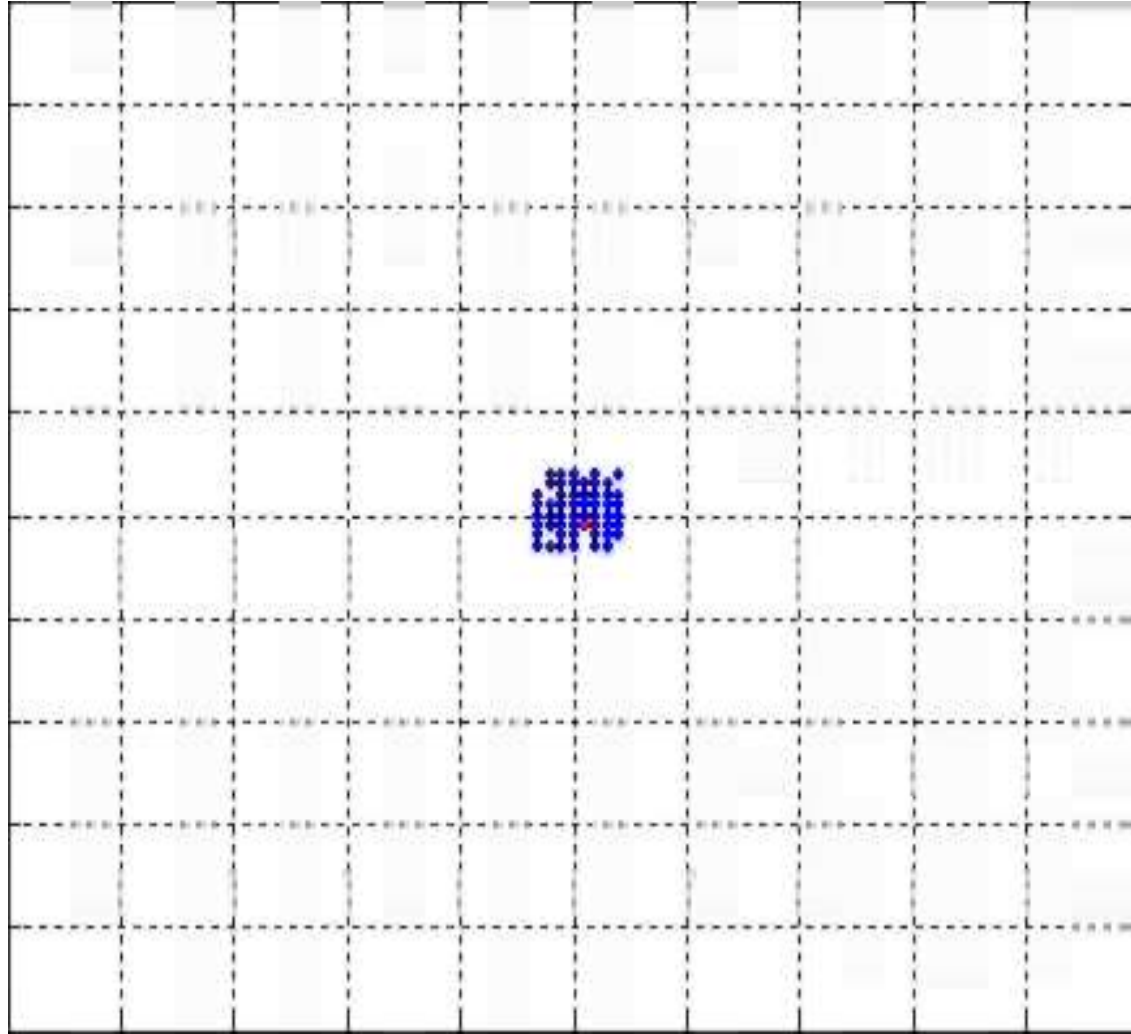
Transport diffusif



$D=2$

PROCESSUS DE TRANSPORT

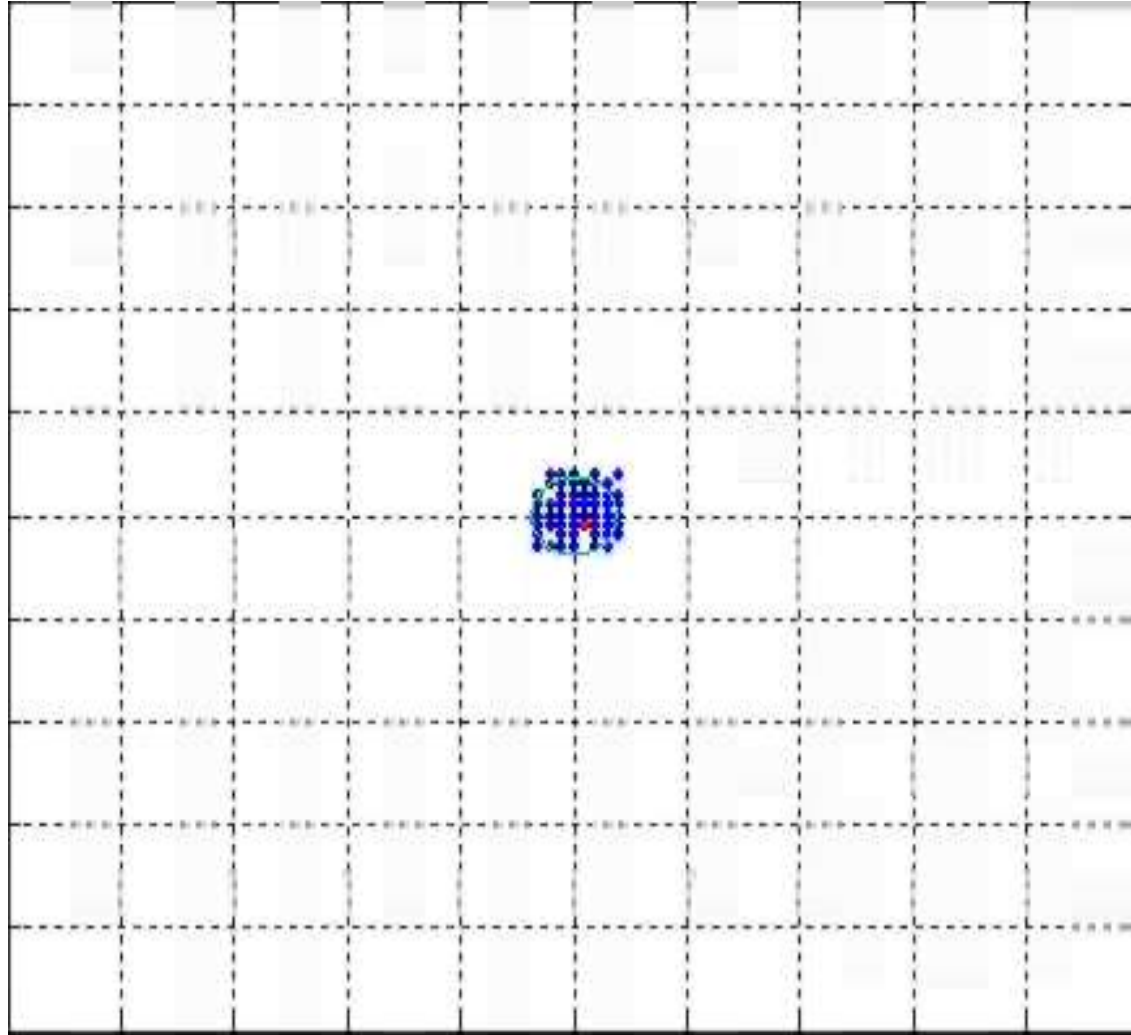
Transport diffusif



D=3

PROCESSUS DE TRANSPORT

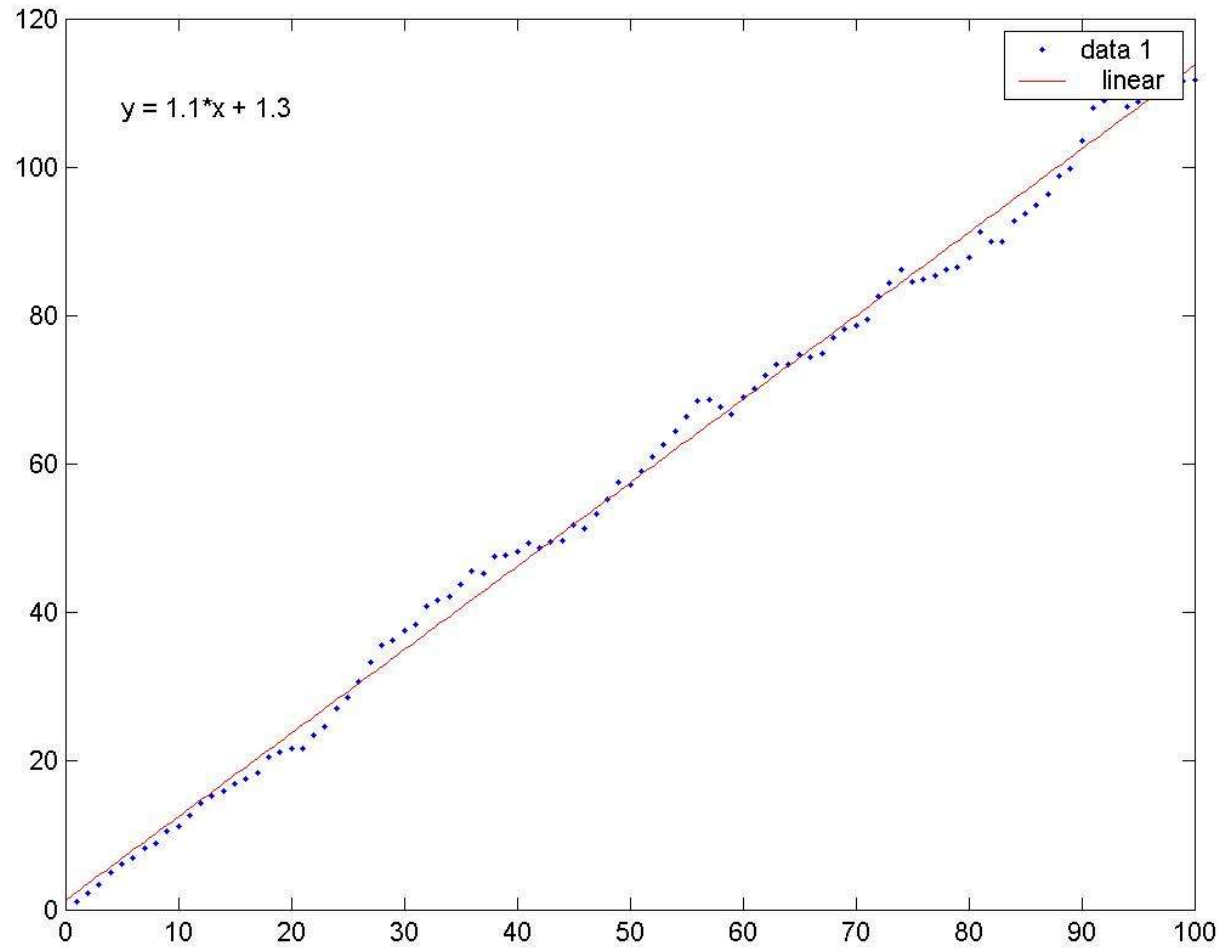
Transport diffusif



D=3

PROCESSUS DE TRANSPORT

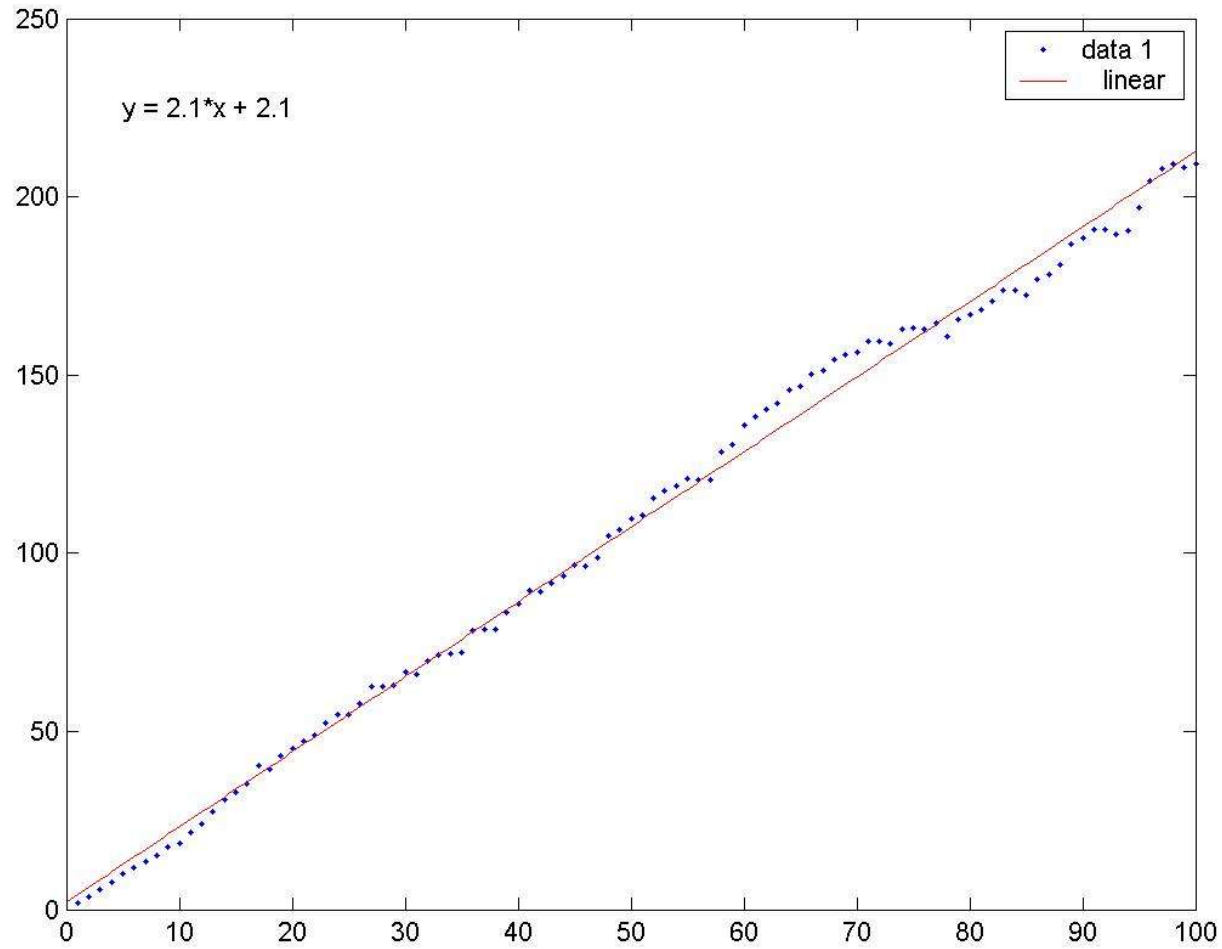
Transport diffusif



D=1

PROCESSUS DE TRANSPORT

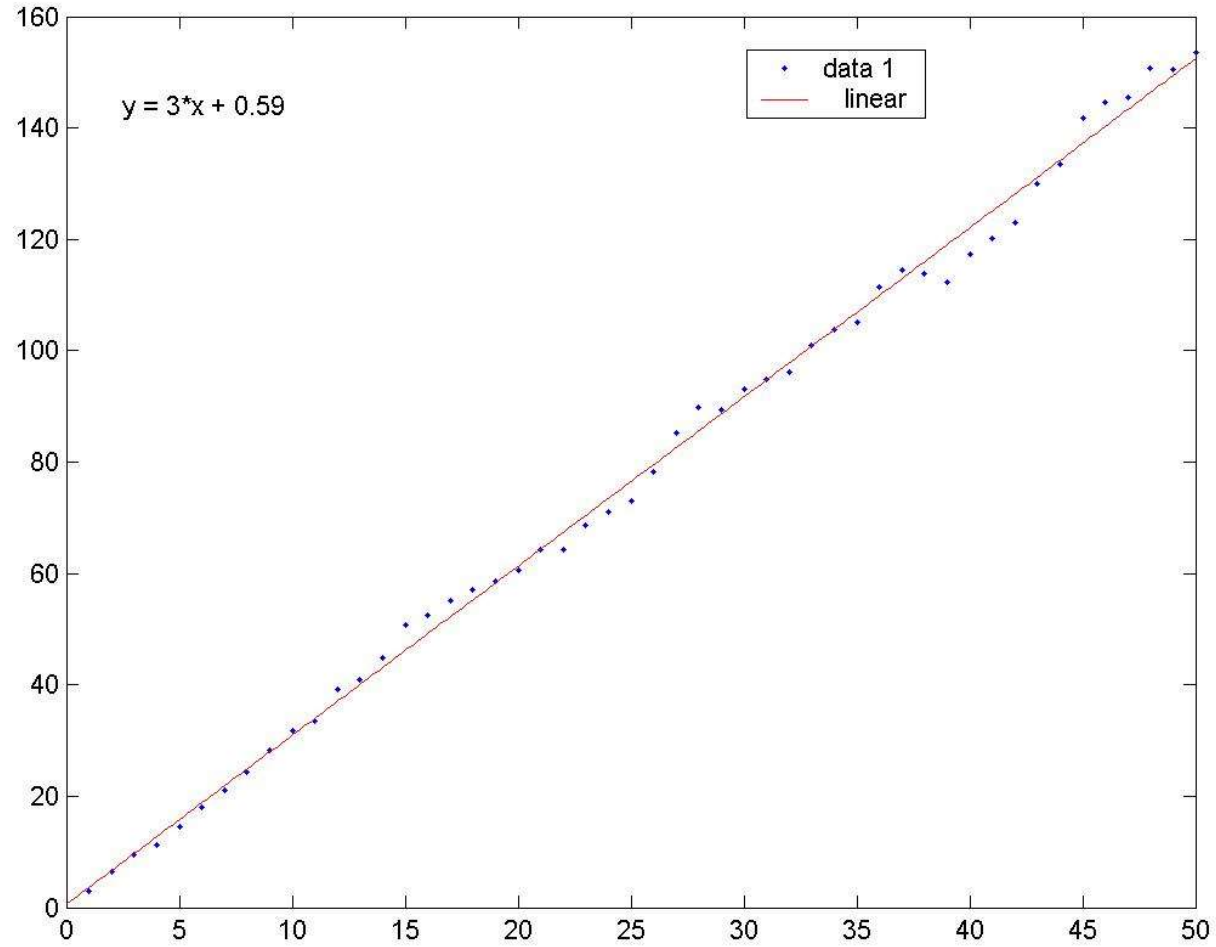
Transport diffusif



D=2

PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif



D=3

PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif

Loi de Fick ->

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial \Phi}{\partial x} (x, t)$$

$$\Phi (x, t) = - D \frac{\partial C}{\partial x} (x, t)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

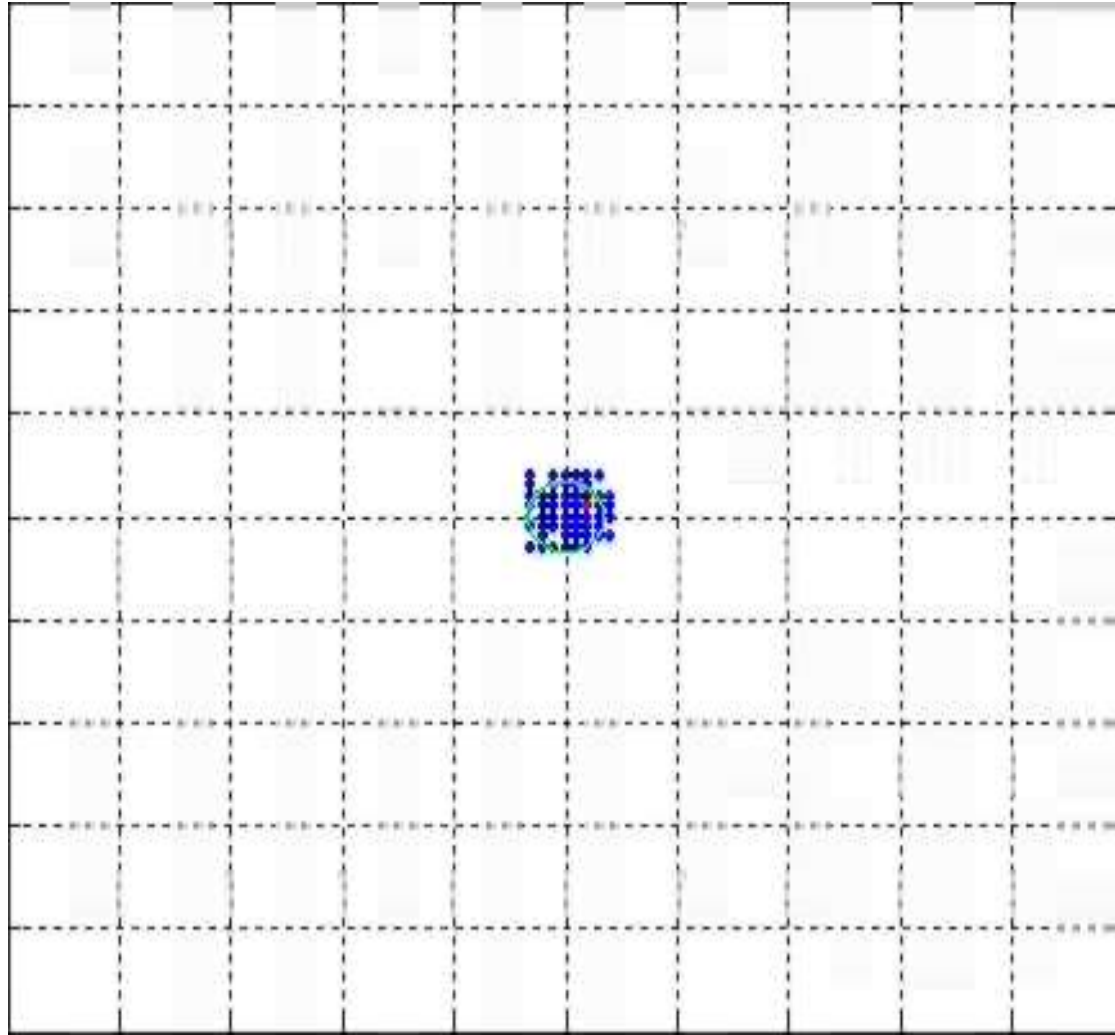
$$N(x, t) = \frac{N(x, 0)}{\pi \sqrt{2Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

95% des observations sont dans un cercle de rayon :

$$R = \sqrt{Dt}$$

PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif

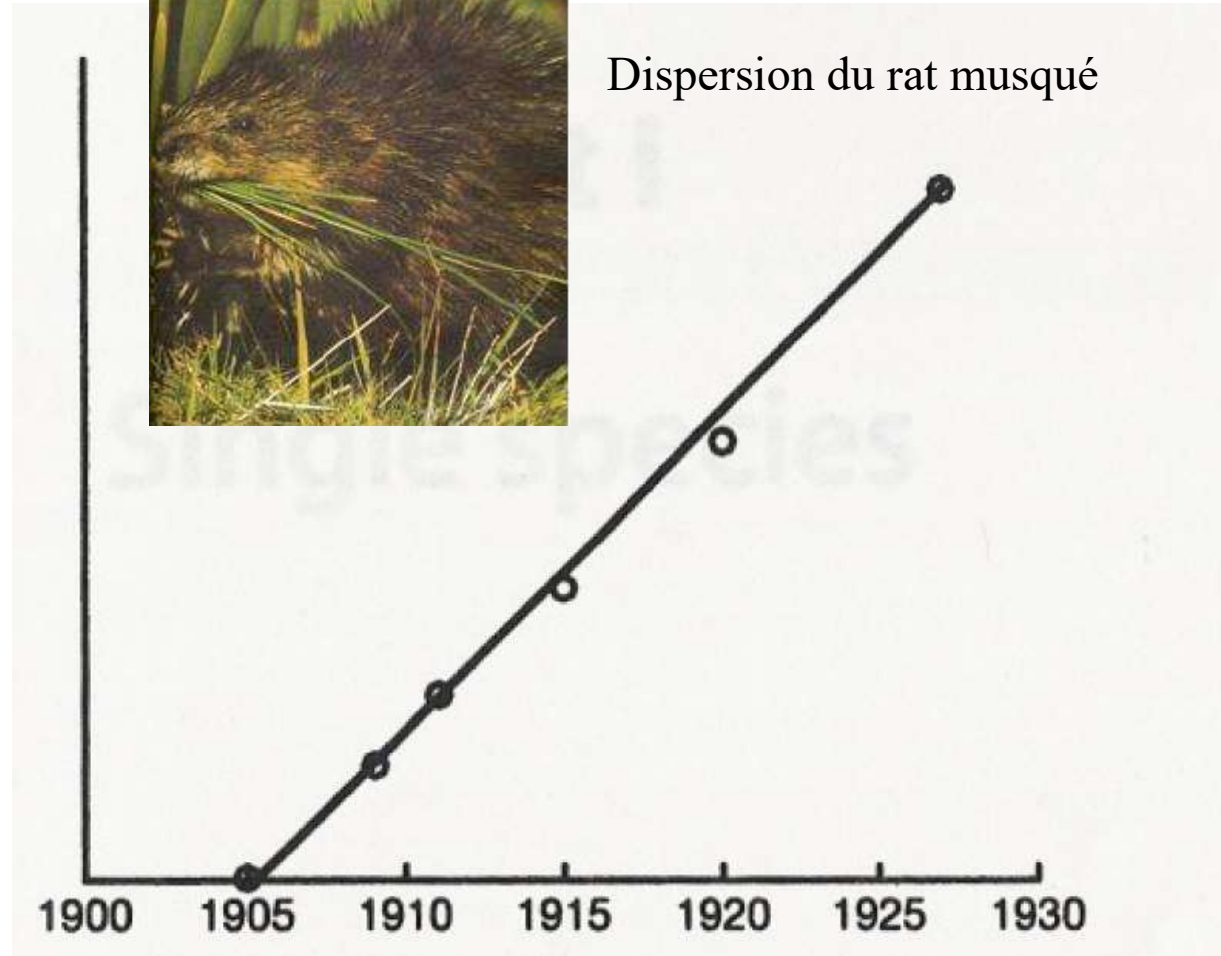


$D=3$

DYNAMIQUE DES POPULATIONS

Structuration spatiale

Racine carrée de la surface habitée en Europe Centrale



D'après Skellam, 1951

Années

PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif

Loi de Fick ->

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial \Phi}{\partial x} (x, t) + f(x, t)$$

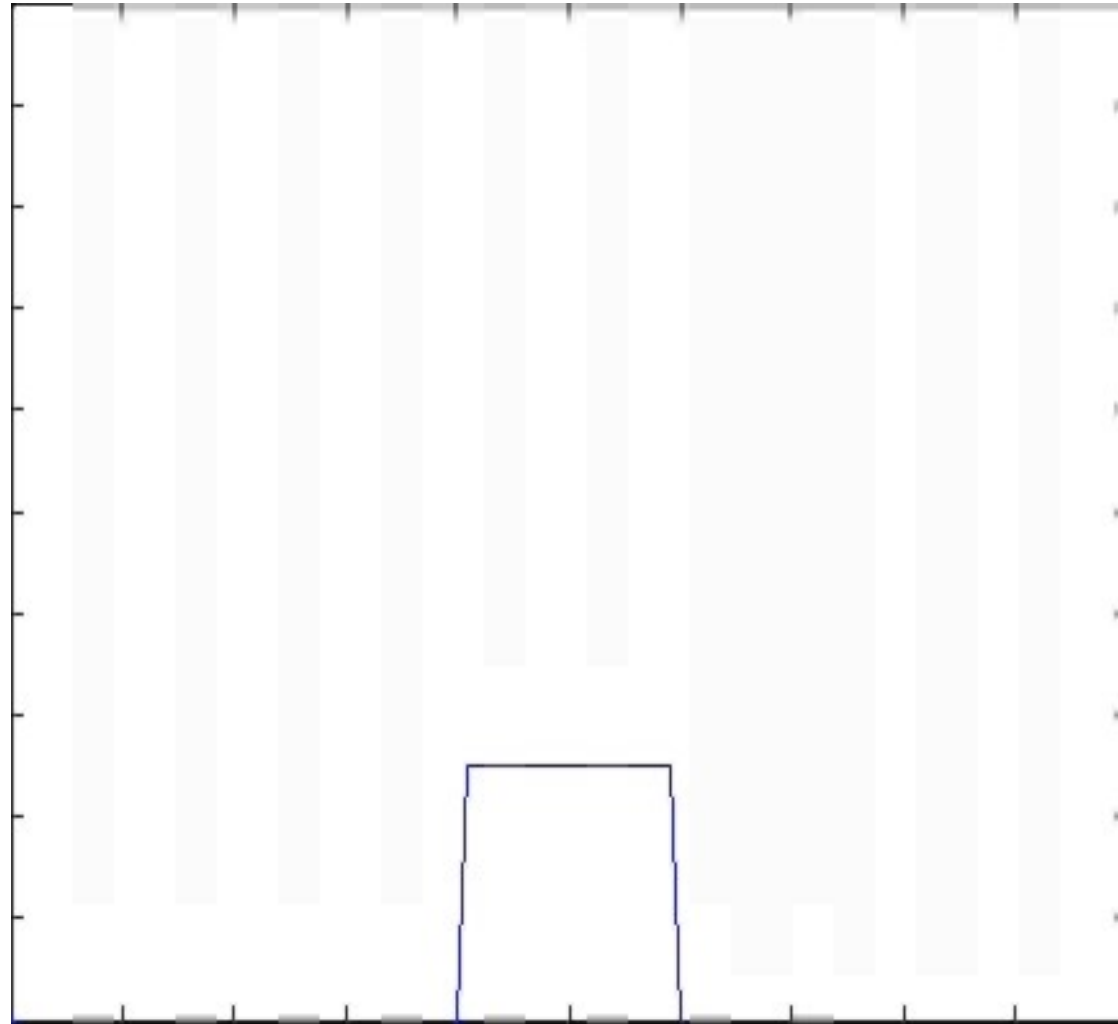
$$\Phi(x, t) = -D \frac{\partial C}{\partial x} (x, t)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + f(x, t)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + rN \left(1 - \frac{N}{K} \right)$$

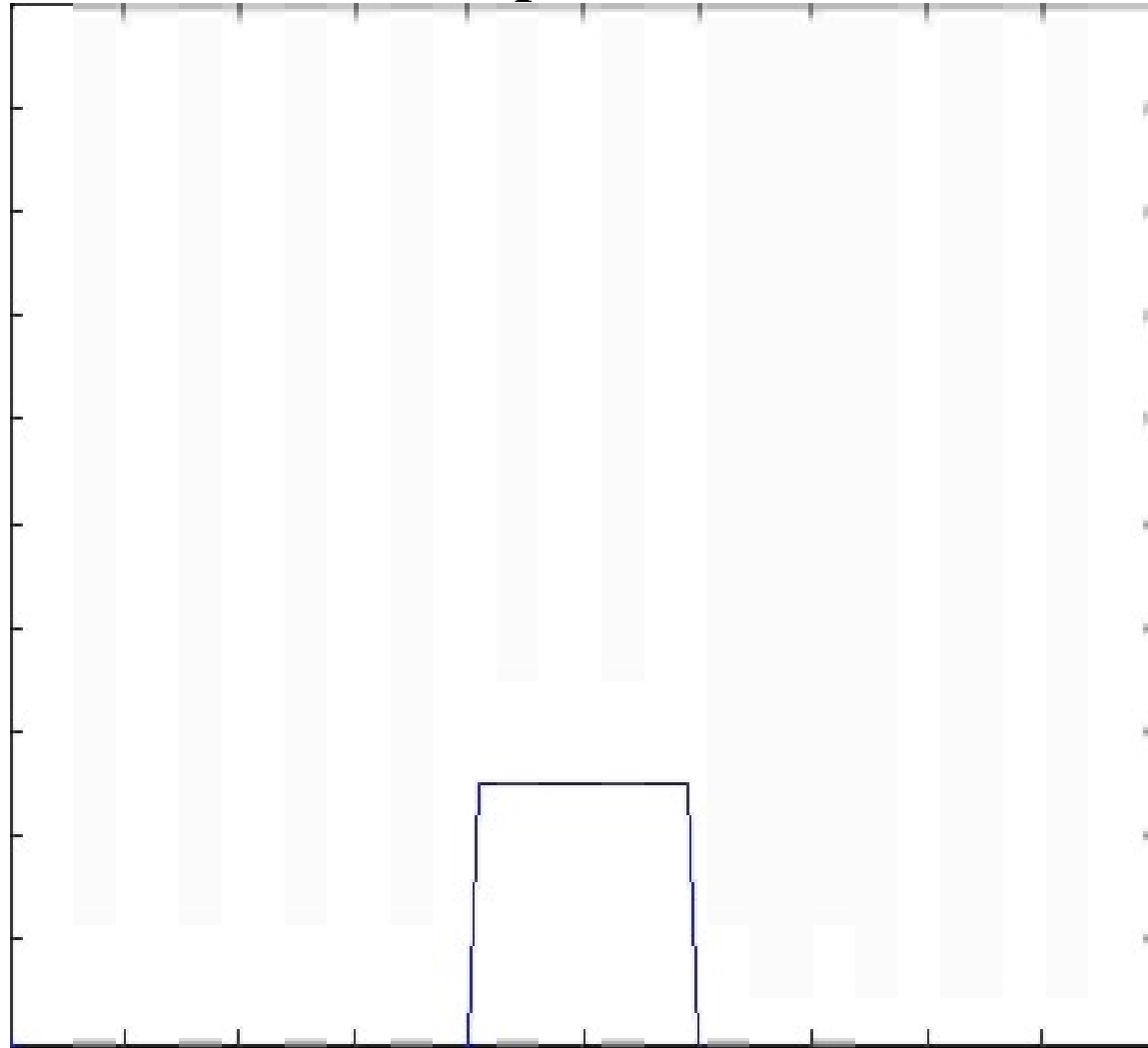
PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport diffusif



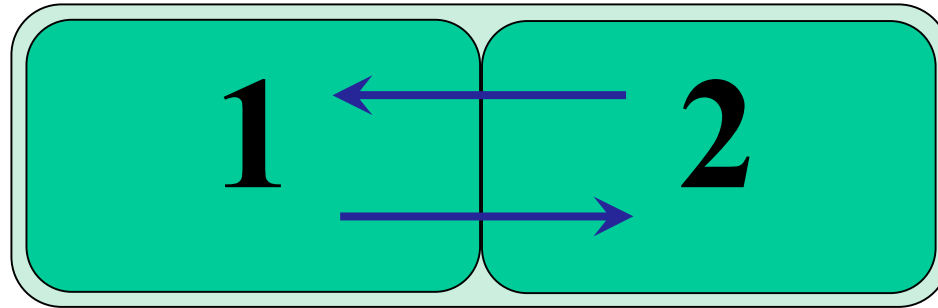
PROCESSUS DE TRANSPORT

Transport advectif



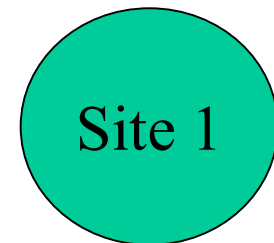
PROCESSUS DE TRANSPORT

Hétérogénéité spatiale



$$\begin{cases} \frac{dN_1}{d\tau} = m_{12}N_2 - m_{21}N_1 + \varepsilon r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1}\right) \\ \frac{dN_2}{d\tau} = m_{21}N_1 - m_{12}N_2 + \varepsilon r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2}\right) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN_1}{d\tau} &= \underbrace{m_{12}N_2 - m_{21}N_1}_{\text{déplacements}} + \underbrace{\varepsilon r_1 N_1}_{\text{croissance}} - \underbrace{\varepsilon r_1 \frac{N_1^2}{K_1}}_{\text{compétition}} \end{aligned} \right.$$



$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN_2}{d\tau} &= \underbrace{m_{21}N_1 - m_{12}N_2}_{\text{déplacements}} + \underbrace{\varepsilon r_2 N_2}_{\text{croissance}} - \underbrace{\varepsilon r_2 \frac{N_2^2}{K_2}}_{\text{compétition}} \end{aligned} \right.$$

