

# De l'agitation thermique et de la gravité pour une Vie – artificielle – plus intéressante

Olivier Bastien

Laboratoire de Physiologie Cellulaire Végétale



- Glade, N., Bastien, O., Ballet, P. Gravity and turbulence in the Game of Life makes artificial life more interesting. *Submitted.*
- Glade, N., Ballet, P., Bastien, O. A new Approach of the Drake Equation parameters and its impact on the fl estimation. *In prep.*

# Confinement, vivacité, survie, diversité

02

- Nous avons voulu voir ce que donnerait l'application de gravité et la fourniture d'énergie (agitation thermique, chaleur terrestre ...) sur des systèmes purement catalytiques produisant des structures émergentes (jeu de la Vie)
- On s'est intéressé à l'influence de ces paramètres sur
  - la diversité
  - la densité des espèces (vivacité)
  - leur durée de vie (survie)
  - leur répartition dans l'espace : confinement

# Systemes naturels

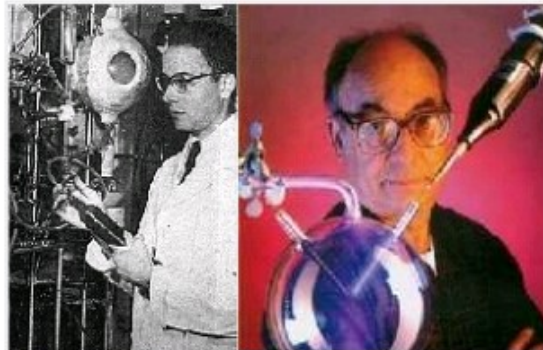
- Ecologie prébiotique
- Ecosystèmes benthiques, forestiers
  - Les vasières du fond des lacs ou des océans
  - La couche d'humus des forêts  
couches de compositions différentes
- Hétérogénéités liée à la sédimentation et au turn-over
  - interfaces
  - couches de compositions différentes

=> microcosmes

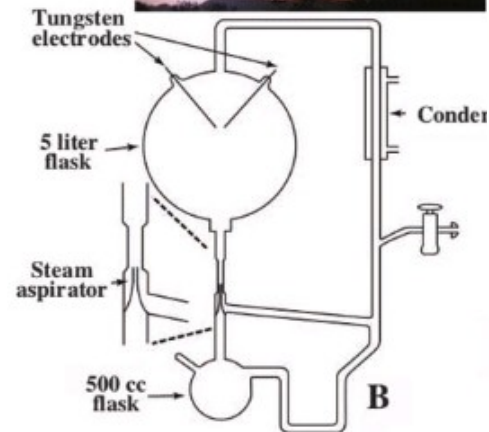
# Soupe prébiotique et émergence

- Aux origines du vivant, des briques élémentaires (acides aminés, acides nucléiques ...) se sont formés
  - **Expérience de Miller**
- On parle souvent de 'soupe' prébiotique
- Dans ces milieux, sont apparus des systèmes autocatalytiques entretenus
  - **Autopoïèse**
- L'autopoïèse a fait l'objet de nombreux travaux de modélisation. On cherche à voir apparaître des systèmes auto-entretenus.
  - **Automates cellulaires (ex: jeu de la Vie, Conway)**

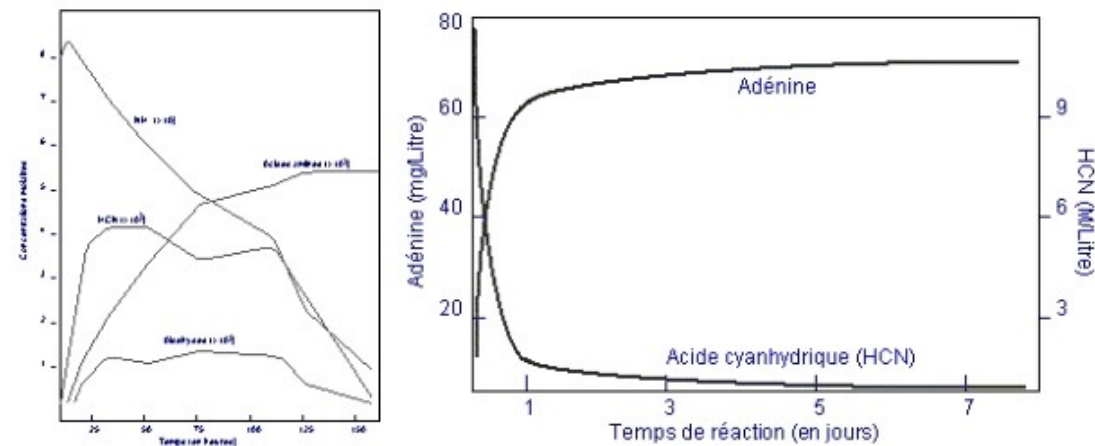
# Soupe prébiotique et émergence



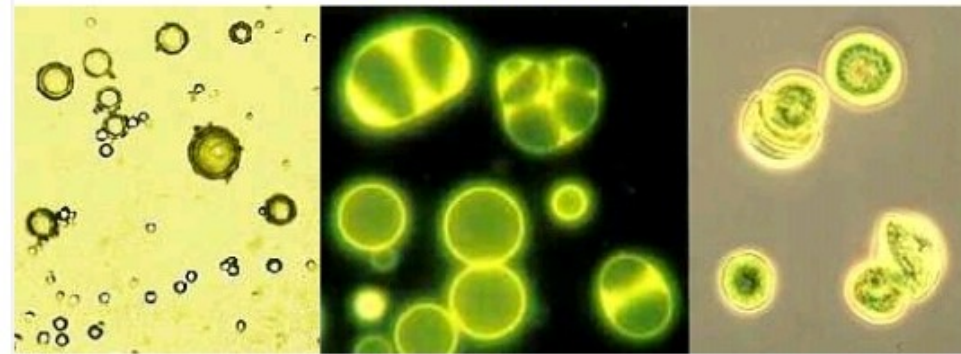
Stanley Miller en 1953 peu après sa thèse de doctorat et dans les années 1990.



## Evolution des concentrations



## De l'inerte au vivant



A gauche les coacervats, des substances colloïdales renfermant un milieu propre et capables de se multiplier. Au centre des vésicules. A droite des cyanobactéries prochloron, une des nombreuses espèces d'algues bleues, les ancêtres des chloroplastes. La différence est que les coacervats sont inertes sur le plan du métabolisme tandis que les algues sont des eubactéries, de la matière vivante auto-organisée. La question est de savoir comment la vie est apparue dans ces dernières ? Documents AG-AZ et RESA.



# Microcosmes et confinement

- Le concept de soupe n'est pas approprié
  - Des systèmes autocatalytiques, proto-biotiques, n'ont pu se maintenir dans des conditions où la diffusion règne
- Il fallait pour 'survivre' que ces systèmes fussent protégés dans des microcosmes → Hétérogénéité spatiale
  - Dans des argiles, à la surface de cristaux ...
  - Dans des membranes
  - Dans des 'motifs de Turing' (Demongeot et al, 2008)
  - Dans des assemblages macromoléculaires (superstructures & compositional ecology) (Hunding et al, 2006 ; Norris et al, 2007)

# Microcosmes et confinement

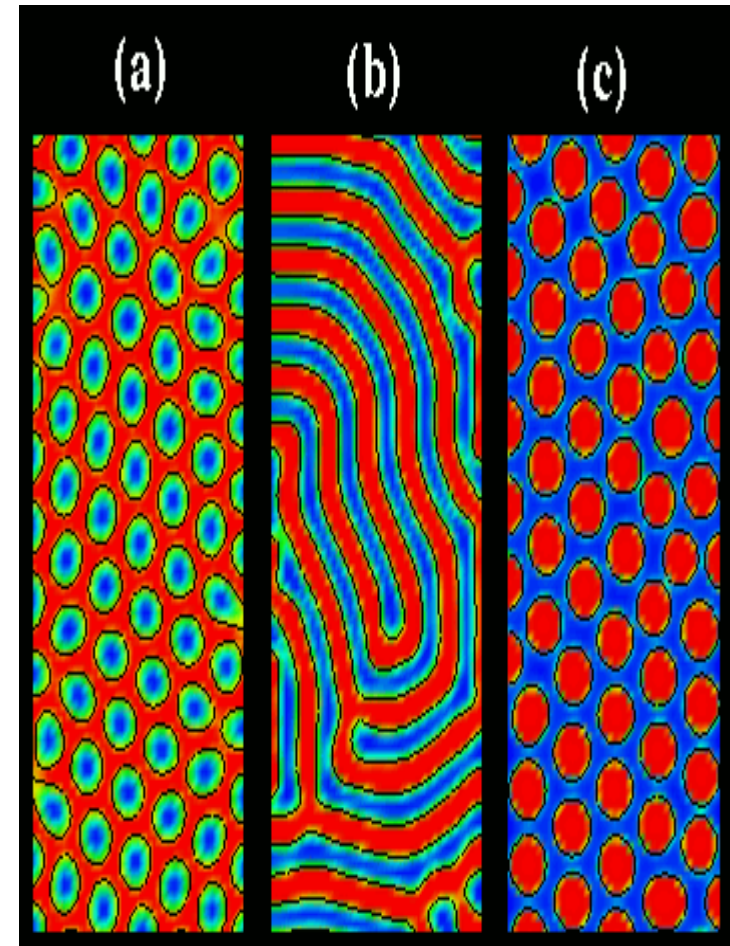
## Le modèle de Turing de réaction-diffusion

- Hypothèse : un milieu vivant au départ homogène et amorphe contient deux substances concurrentes (dont la nature chimique importe peu) :
- un activateur A
  - qui est catalyseur de sa propre formation (autocatalyse)
  - qui diffuse lentement
- un inhibiteur B
  - dont la formation est catalysée par l'activateur
  - qui diffuse rapidement
  - qui ralentit la formation de l'activateur

# Microcosmes et confinement

## Le modèle de Turing de réaction-diffusion

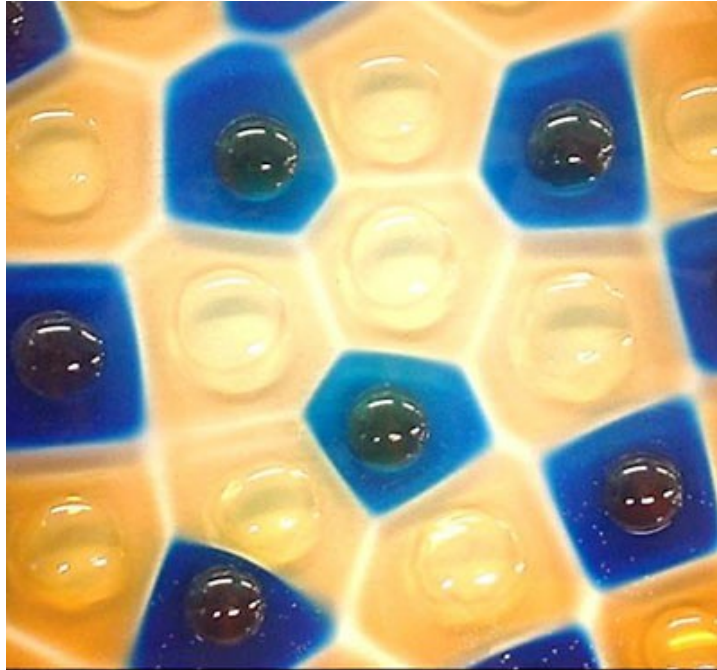
- Un infime excès de l'activateur peut se former à un endroit du milieu sous l'effet des mouvements aléatoires des molécules.
- Les mécanismes d'activation vont entraîner à cet endroit une production supplémentaire de A ainsi qu'une production de B. Un pic d'activateur A et de B va se former.
- L'inhibiteur diffuse plus vite que l'activateur et le pic de B s'étale plus largement que celui de A. Il y aura un déficit en inhibiteur au centre du pic et par contre un excès de celui-ci sur les "ailes" du pic.
- Ceci entraîne une localisation du pic d'activateur dans l'espace. A distance suffisamment grande du premier pic, l'influence de l'inhibiteur faiblit et d'autres pics d'activateur peuvent se former.



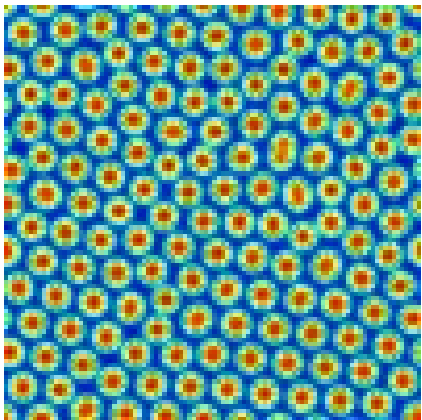
(Courtin et al., 1997)



# Motifs auto-organisés



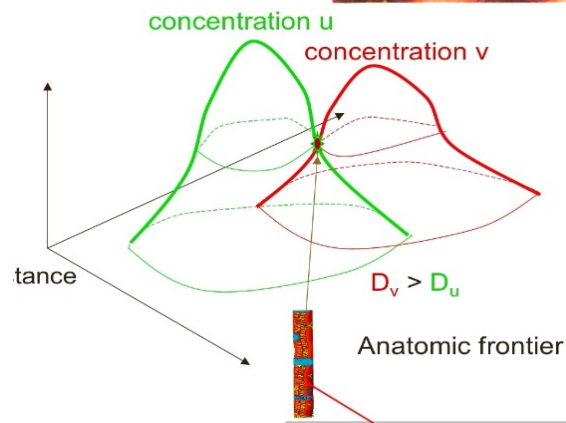
Motifs de Turing  
(Ben Lacy de Costello)



Cellules de convection



Motifs de Liesegang  
(Ben Lacy de Costello)





# Sedimentation + aggregation + réaction + diffusion + ...

10

Pour la Science N°392 - juin 2010 | Réagir à cet article

SYNTHÈSE - OCÉANOGRAPHIE

## Les baleines mortes, sources de vie

Sur les fonds marins, les carcasses des plus grands mammifères, les baleines, donnent naissance à des écosystèmes exceptionnels.

Crispin Little

En 1987, à bord du sous-marin de recherche *Alvin*, des océanographes cartographiaient les fonds marins, pauvres en végétation et en nutriments, du bassin de Santa Catalina au large de la Californie du Sud. Lors de la dernière plongée, le sonar détecta un gros objet sur le fond de la mer. Dans l'obscurité abyssale, à 1 240 mètres de profondeur, les phares de l'*Alvin* révélèrent un squelette de baleine de 20 mètres de long, en partie enterré dans les sédiments.

Il y a un turn-over de la matière très dense au fond des lacs, des mers, dans l'humus des forêts...  
Cela produit des éléments dont se nourrissent les espèces vivant au dessus et au fond (fouissage et bioturbation).



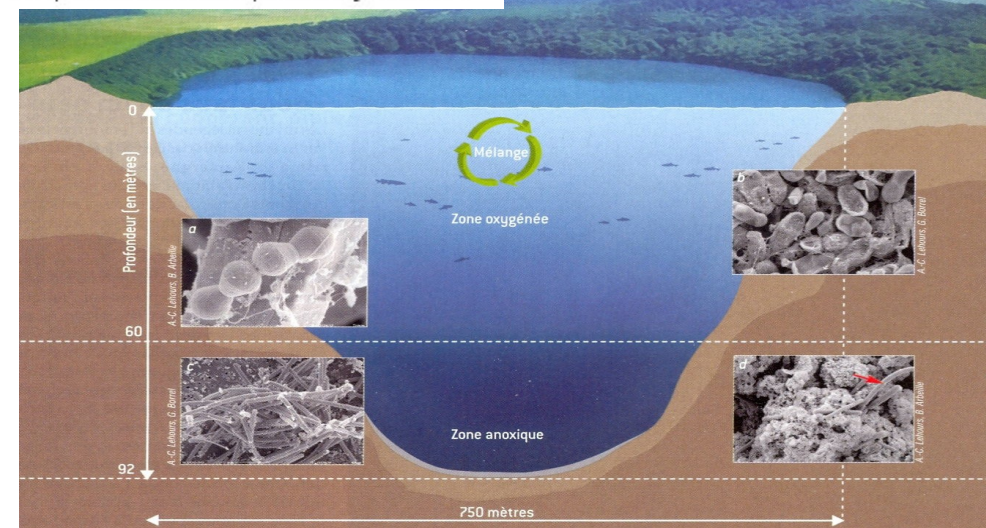
Mbai.

Cette baleine grise de dix mètres de long est échouée à 2 891 mètres de profondeur, dans la baie de Monterey en Californie. Elle procure de la nourriture à toute une communauté animale florissante, comprenant des concombres de mer nécrophages (*Scotoplanes globosa*, rampant au premier plan) et des vers mangeurs d'os (*Osedax rubiplumus*, sur les os). Les photographies formant ce montage ont été prises en 2002 ; certains des os visibles ici sont sans doute complètement décomposés aujourd'hui.

Pour La science, 392  
C. Little, 2010

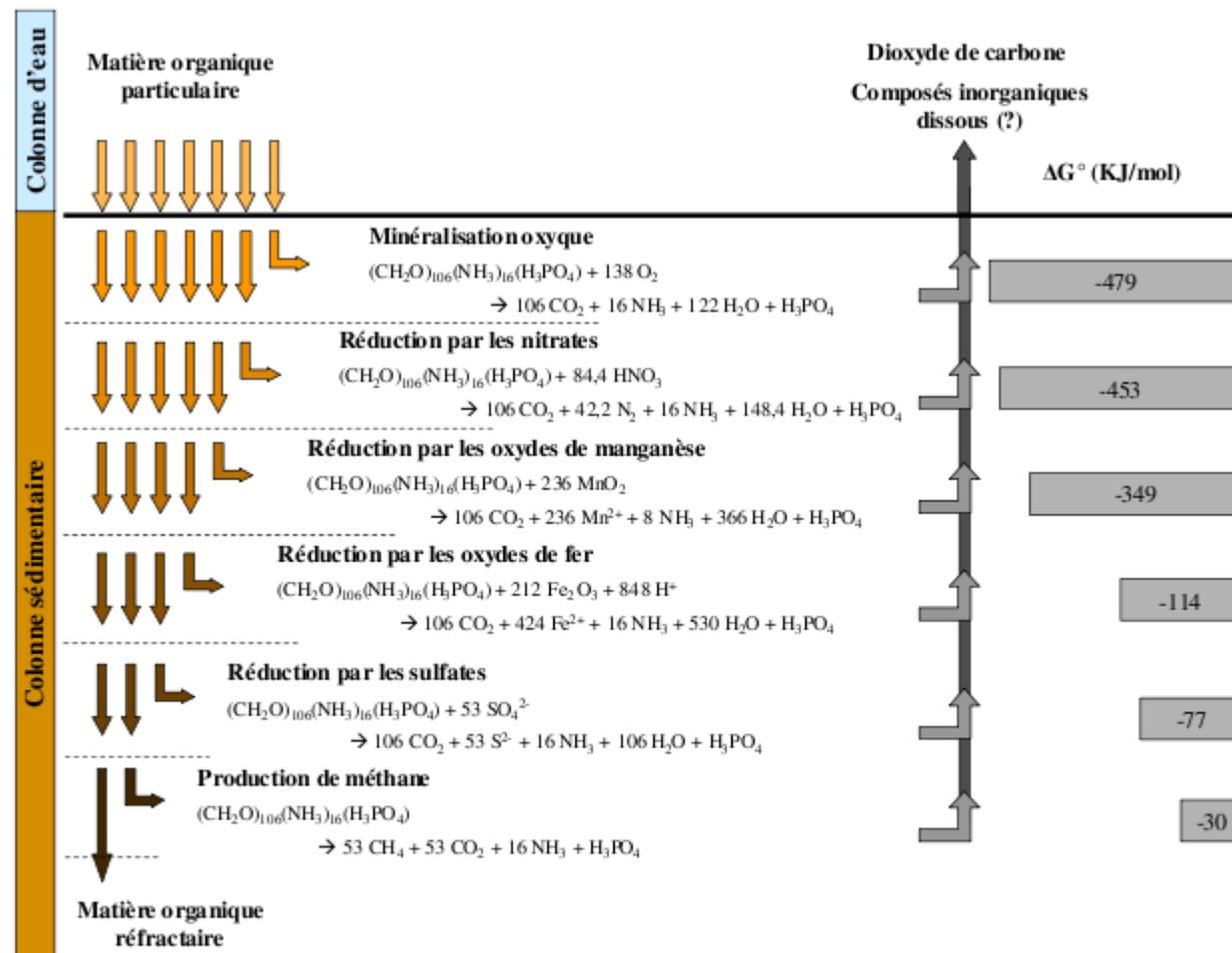
Smith & Baco,  
Oceano Mar. Biol. 2003

Pour La science, 387  
Lehours et al, 2009



LE LAC PAVIN se partage en une zone oxygénée et une zone anoxique, est-à-dire privée d'oxygène. Jusqu'à 60 mètres de profondeur, la matière organique est oxydée par diverses bactéries dont certaines consomment du méthane (a et b). En dessous, d'autres bactéries prennent le relais : des bactéries produisent du méthane à partir de matière organique (c), quand d'autres le dégradent (d, flèche rouge).

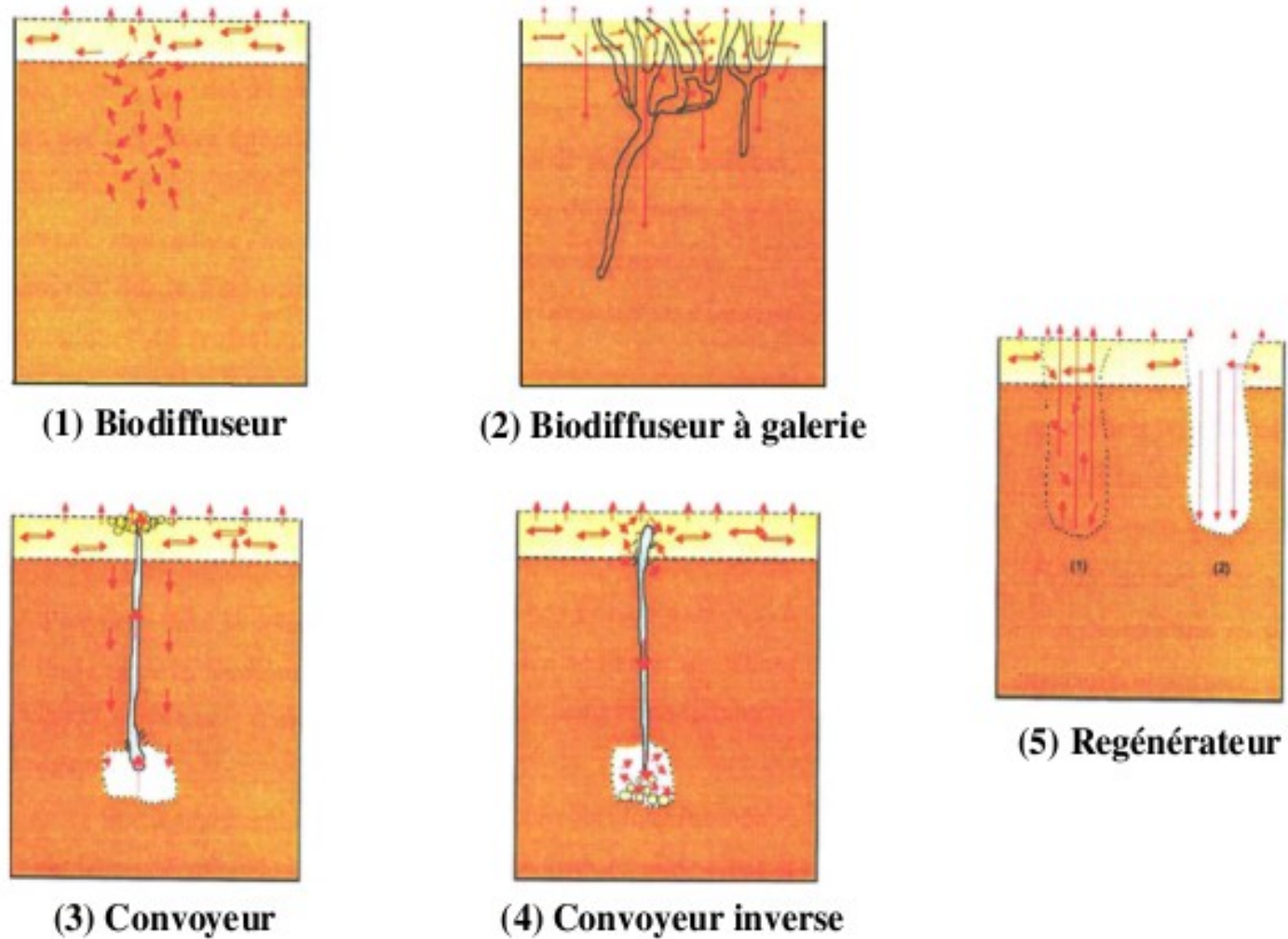
# Turn-over : Boues actives



**Figure 1.** Voies d'oxydation de la matière organique établie selon Froelich *et al.* (1979) dans les sédiments marins (inspiré de Denis, 1999) et calcul de l'énergie libre standard (kjoules) pour une mole de carbone organique (repris de Chaillou, 2003).

# Turn-over : Bioturbation

1  
2



**Figure 3.** Activités bioturbatrices de la macrofaune benthique (d'après François *et al.*, 1997).



# Le jeu de la Vie

- John Conway (Martin Gardner, Mathematical Games. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game « life », Scientific American no 223 (Octobre 1970), p. 120-123)
- Automate cellulaire bidimensionnel dans une grille carrée
  - Une cellule est présente (valeur 1) ou non (valeur 0)
  - Voisinage de Moore (8 cellules voisines)
- Règles :
  - Si une cellule vivante est entourée de 2 ou 3 cellules (vivantes), alors elle vit, sinon elle meurt
  - Si une case vide est entourée de 3 cellules, alors il y a une naissance (apparition d'une nouvelle cellule)



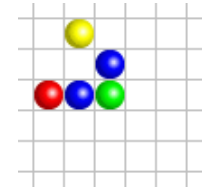
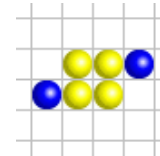
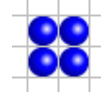
# Le bestiaire du jeu de la Vie

- Creatures cycliques (période  $T \geq 1$ , finie) = attracteurs

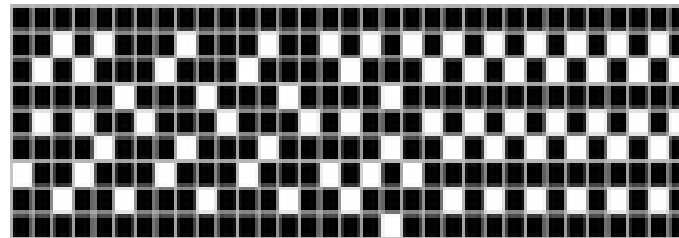
→ Squares ( $T=1$ )

→ Blinkers ( $T=2$ )

→ Gliders ( $T=4$ )



- Jardins d'eden (inatteignables depuis un autre état) = points instables

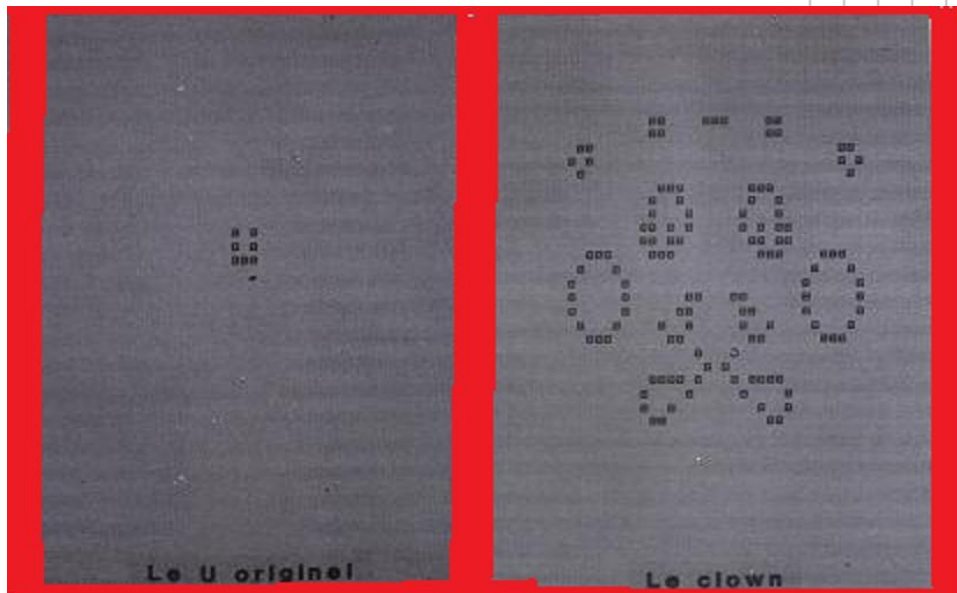
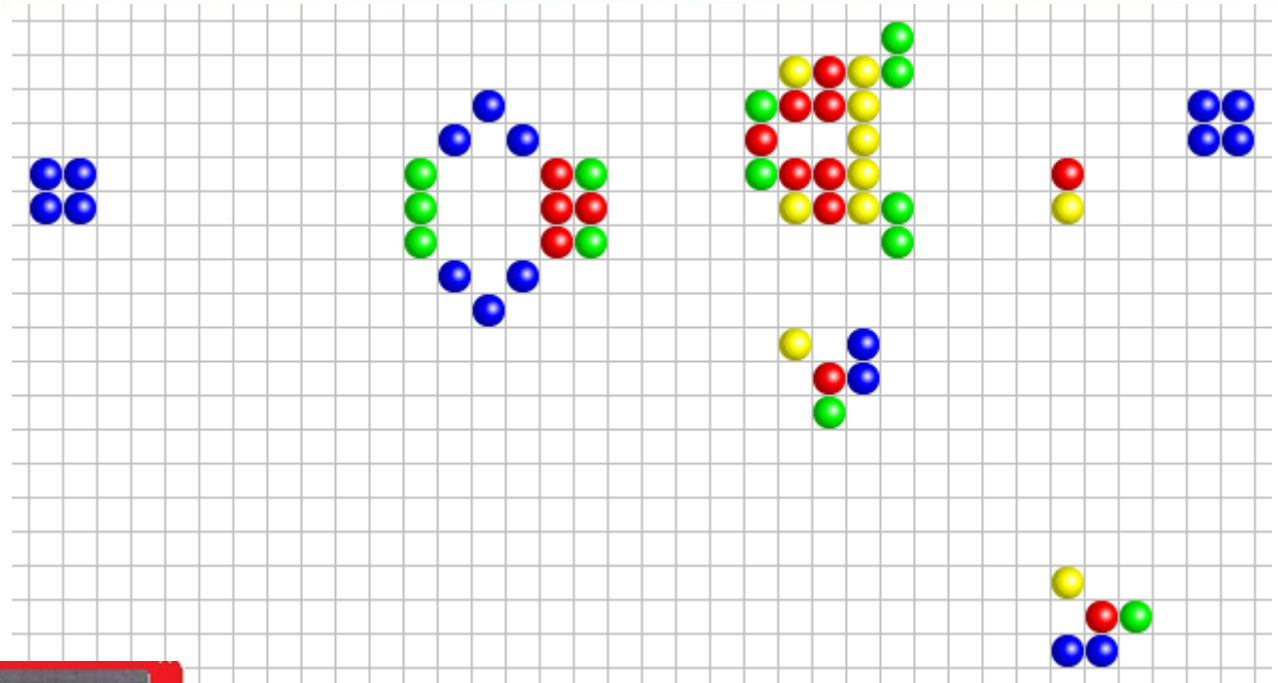


- Transitoires

# Le bestiaire du jeu de la Vie



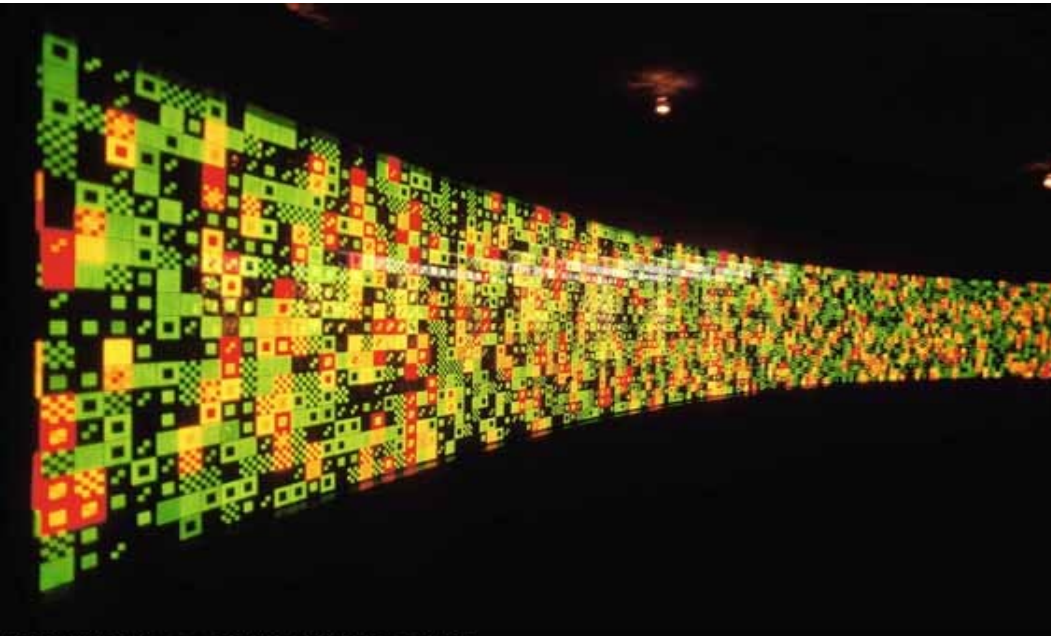
Premier canon découvert



Le clown émerge à l'itération 110 d'une dynamique d'un réseau amorcé à partir d'un U initial de 7 cellules.

# Le jeu de la Vie, un système purement auto-catalytique

- Il n'y a pas d'énergie autre que catalytique dans le jeu de la Vie
  - Le système rejoint vite un état stationnaire peu vivace et riche (diversité)
  - La survie des créatures stationnaires est 'infinie'



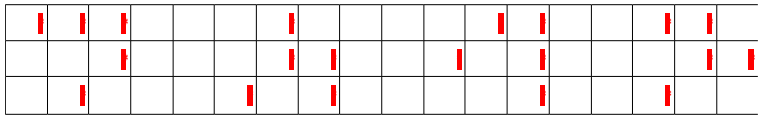
2002©Philippe PLAILLY/EURELIOS  
Cybernetique/ Intelligence artificielle/ Sainte Croix/ Villa Reuge/ Exposition BioWall/ Experience "life"/Auto-réparation moléculaire



2002©Philippe PLAILLY/EURELIOS  
Cybernetique / intelligence artificielle/ Sainte Croix (Suisse) / Villa Reuge/ Petite fille jouant au "loops" (auto replication moléculaire)

# Espèces intéressantes

- Ce sont des espèces qui ont un cycle de longueur comprise entre 1 et  $n$  fini
- Une espèce est l'ensemble des morphologies du cycle
- Chaque morphologie (individu) est un ensemble contigu de cellules vivantes



Ex : Un glider : une espèce de cycle = 4

G1\_UR1 : 5/3/3/0/1/2/5/7

G1\_UR2 : 5/3/3/1/4/5/6/8

G1\_UR3 : 5/3/3/1/2/3/5/8

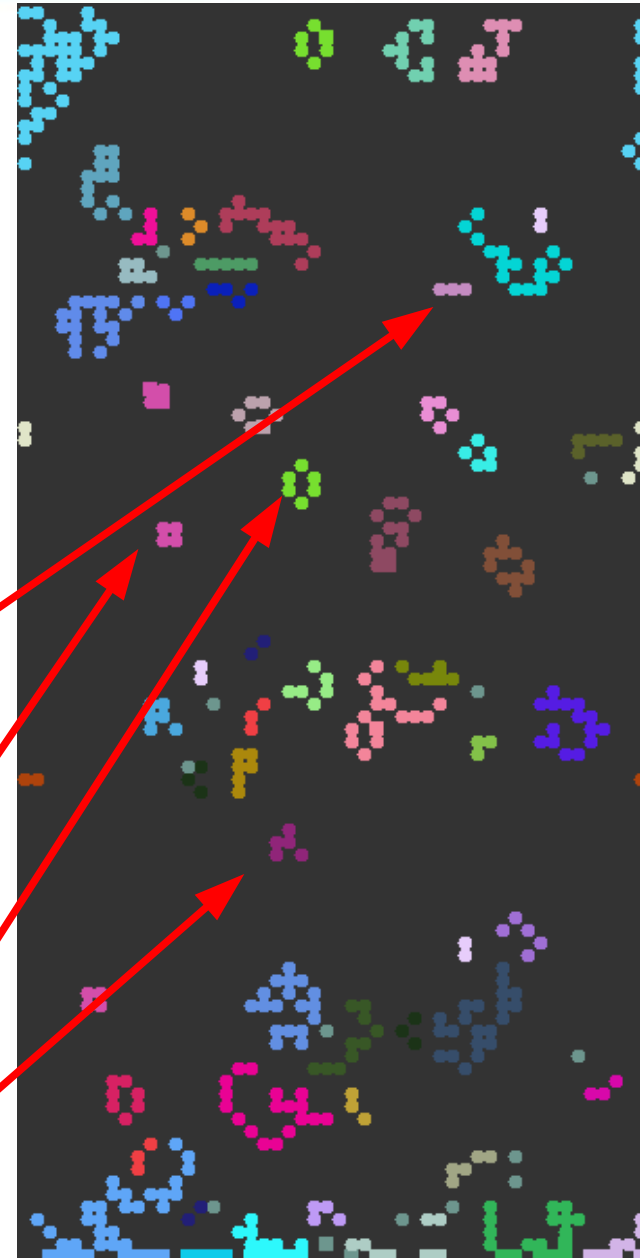
G1\_UR4 : 5/3/3/0/1/4/5/6

SSTG2\_V: 6/3/4/1/3/5/6/8/10

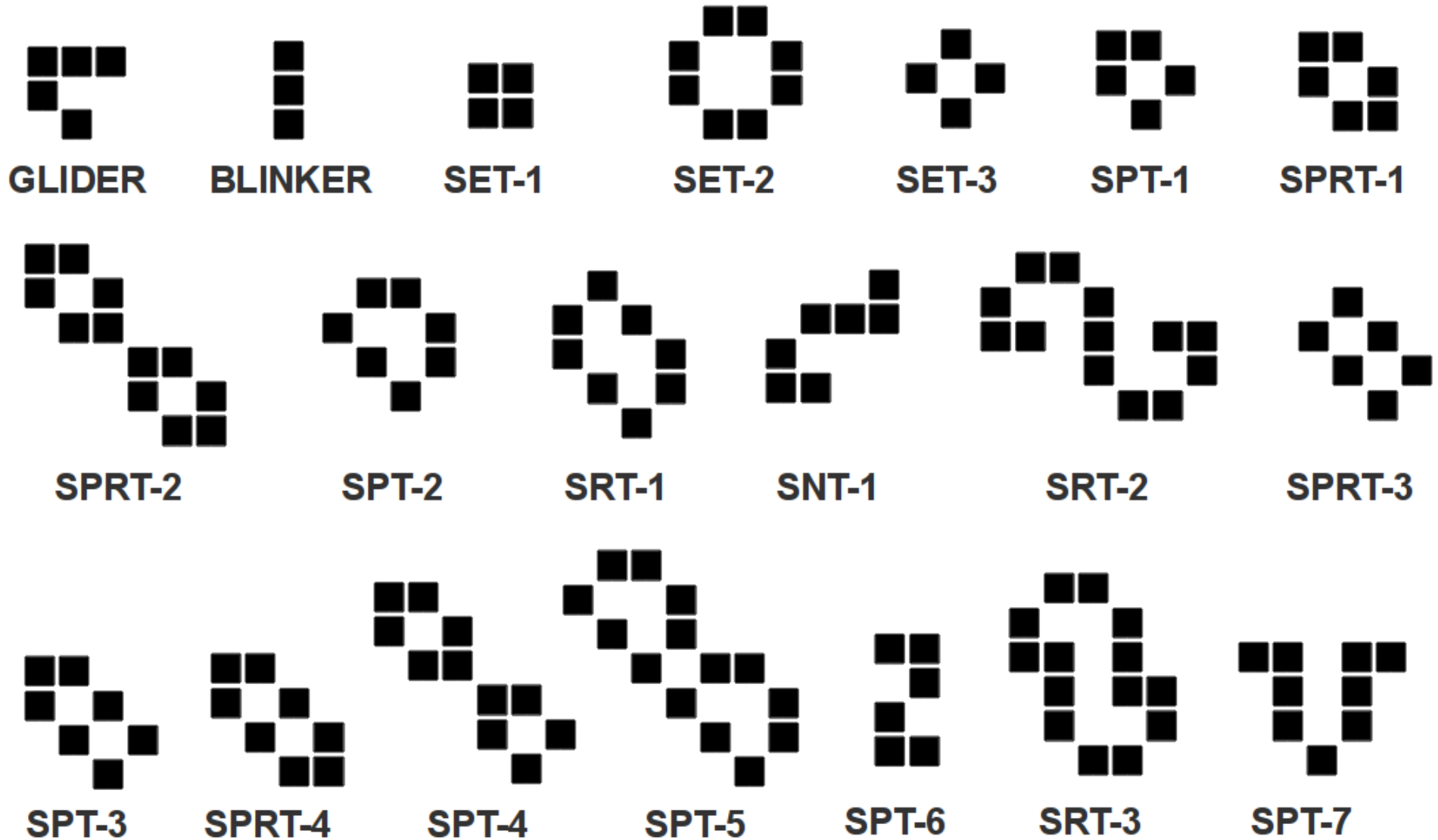
Blinker

Square

Glider

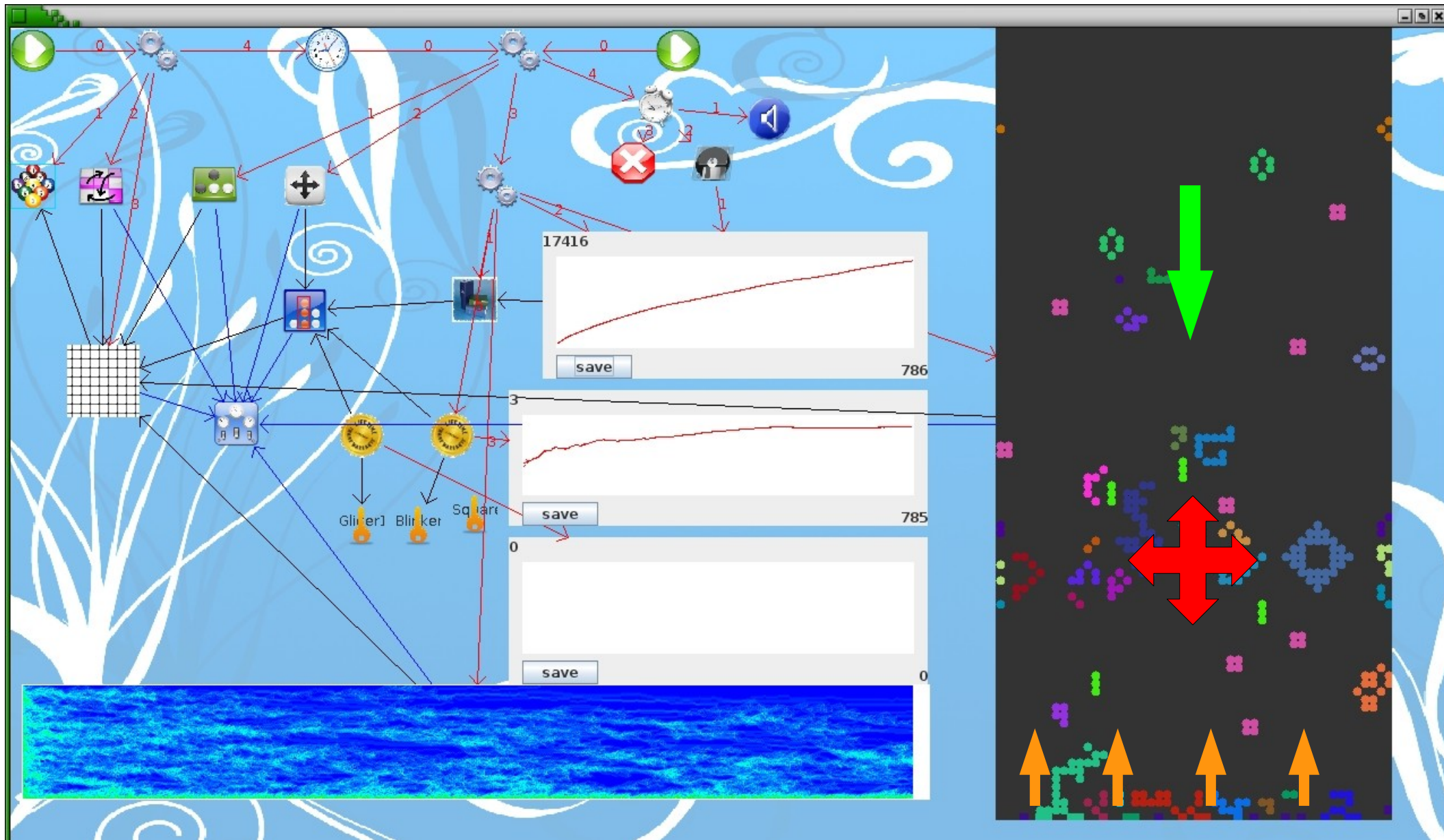


# Espèces intéressantes

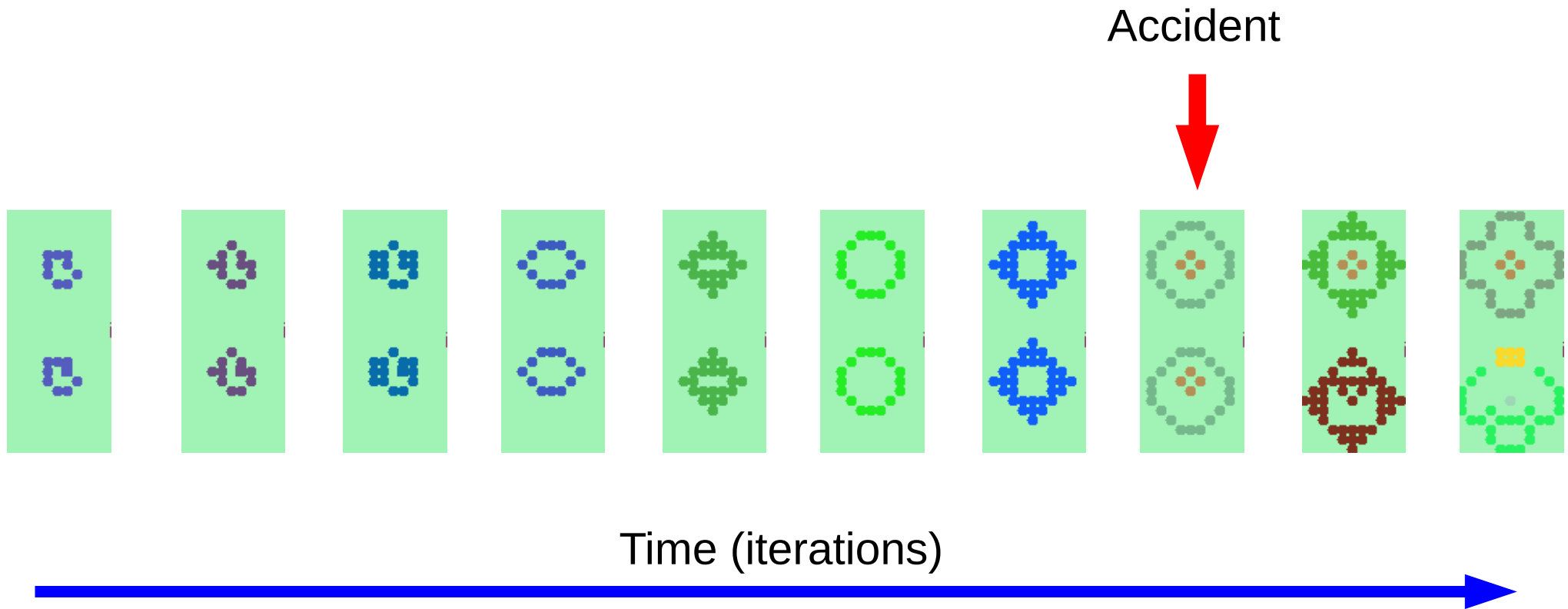




# Ajouter de la gravitation et de l'agitation thermique dans le jeu de la Vie



# Ajouter de la gravitation et de l'agitation thermique dans le jeu de la Vie



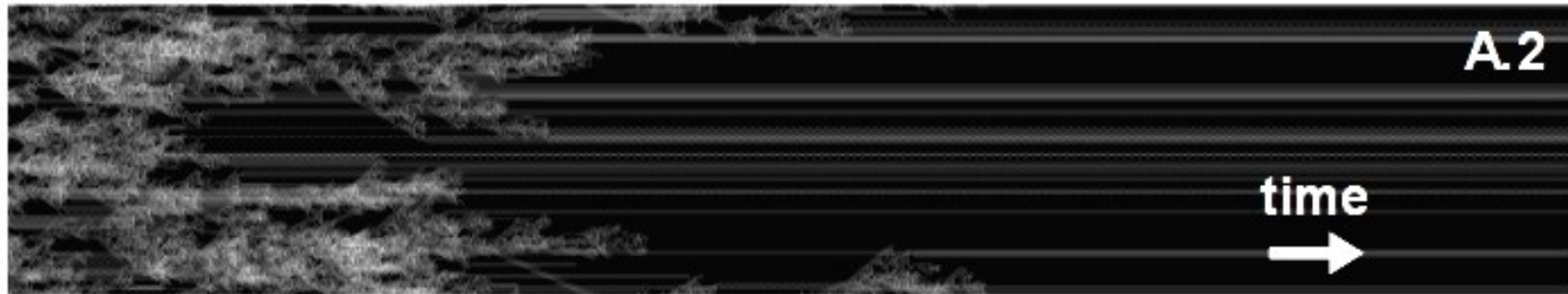
L'heure où on se fait une simu

# Demos



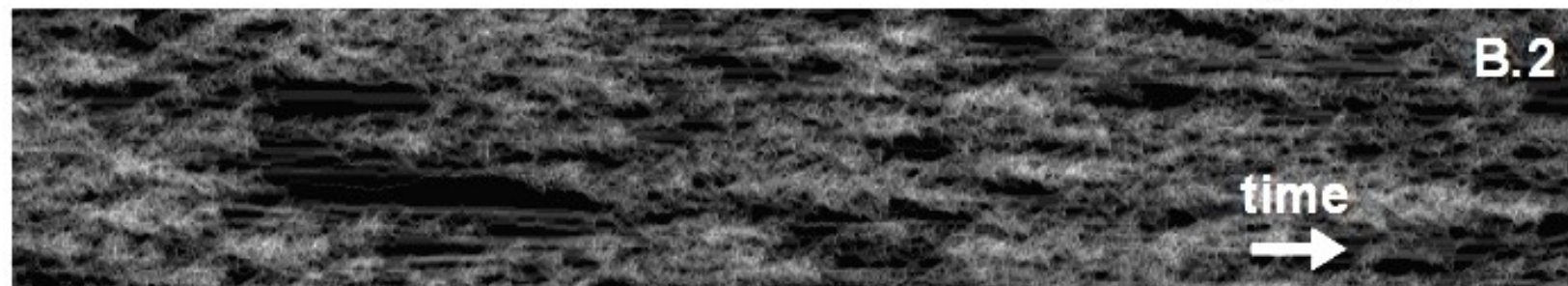
# Le jeu de la Vie est bien triste. Sous agitation, il est chaotique.

22

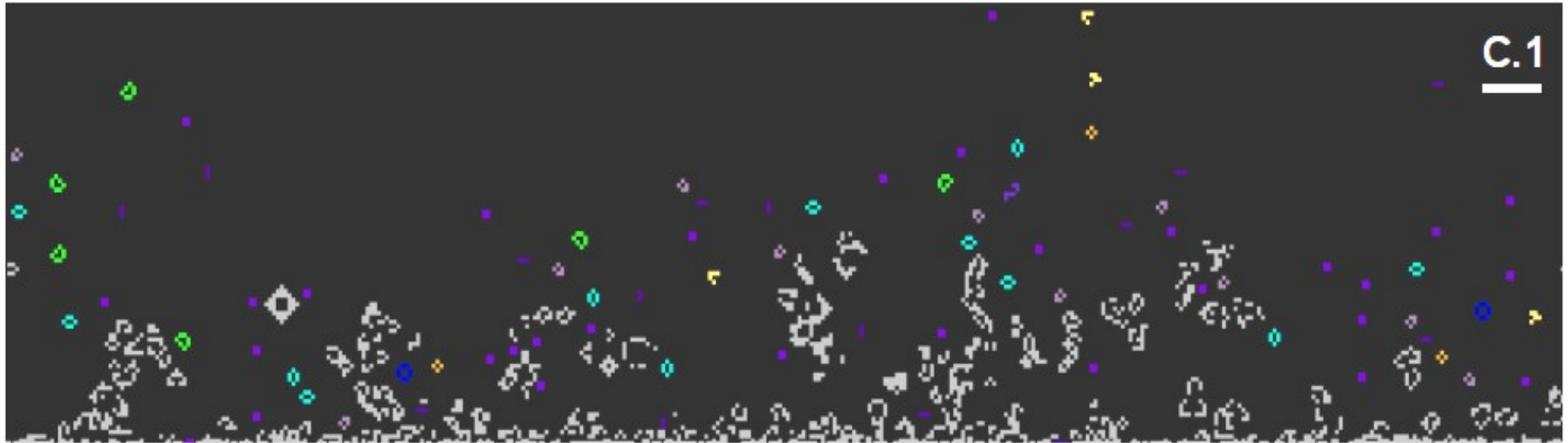


(A) Conway's Game of Life : a pure auto-catalytic process that reaches the asymptotic very fast → life is boring

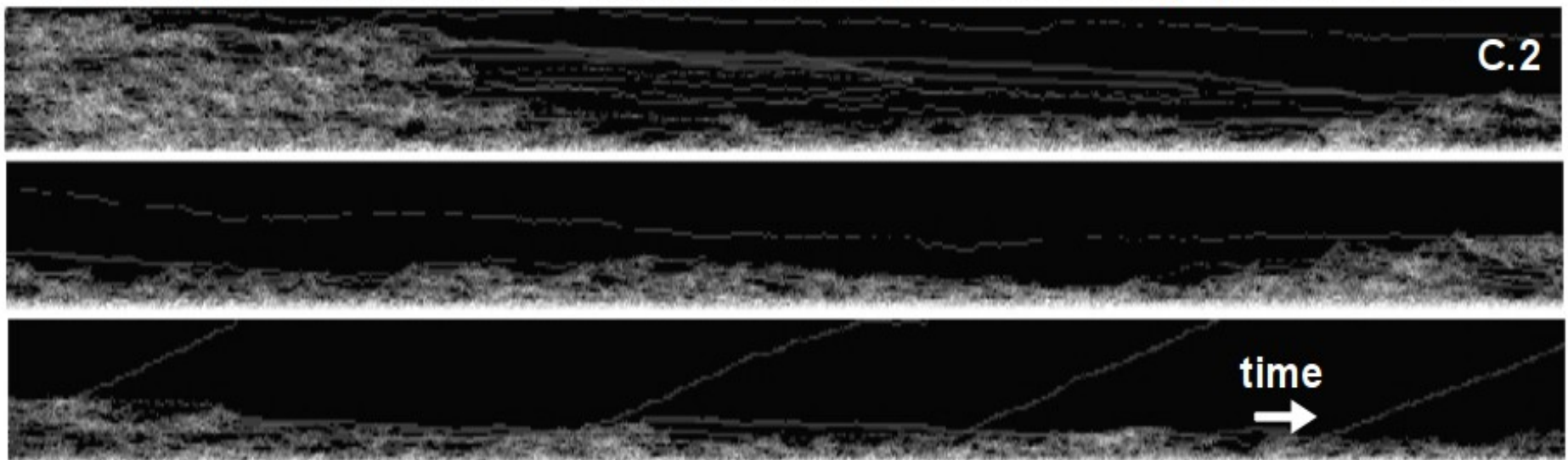
(B) The Game of Life after addition of thermal noise (agitation) → life is very rich ... too much rich and so temporary !



# Avec une force de rappel, il est intéressant



(C) In the Game of Life including gravity and agitation, burst of rich life (at the edge of Chaos) occur sometimes in a diluted milieu where interesting species live in.





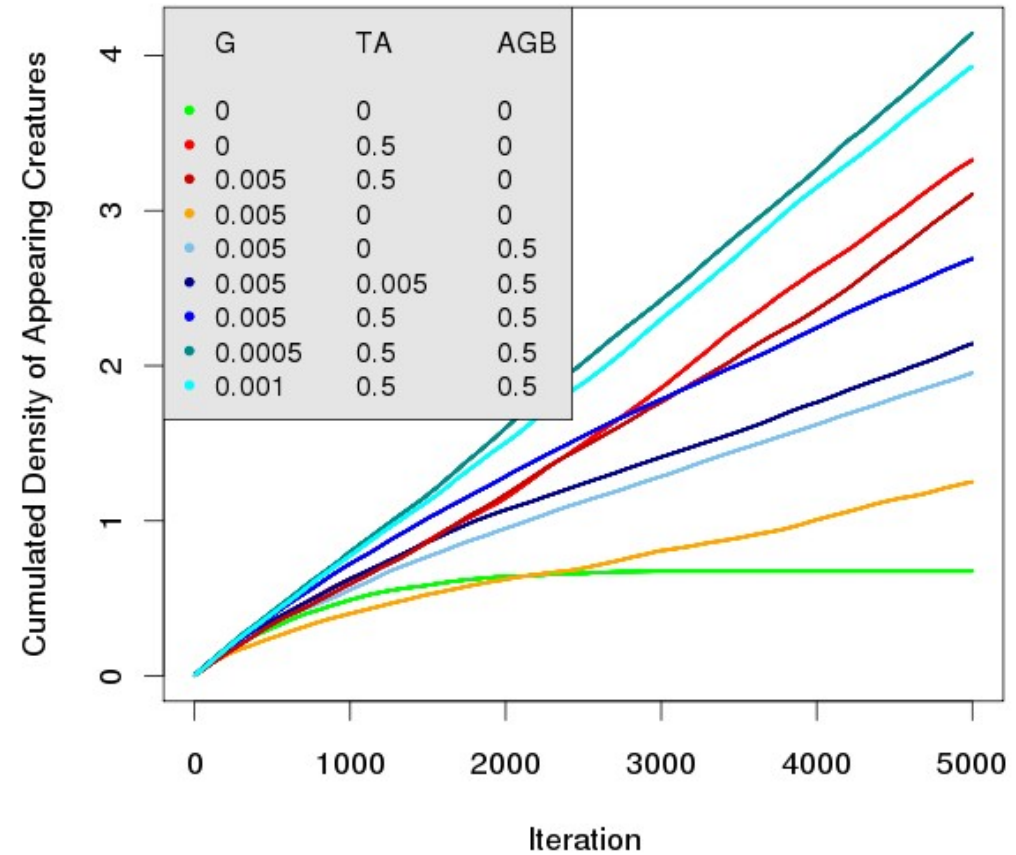
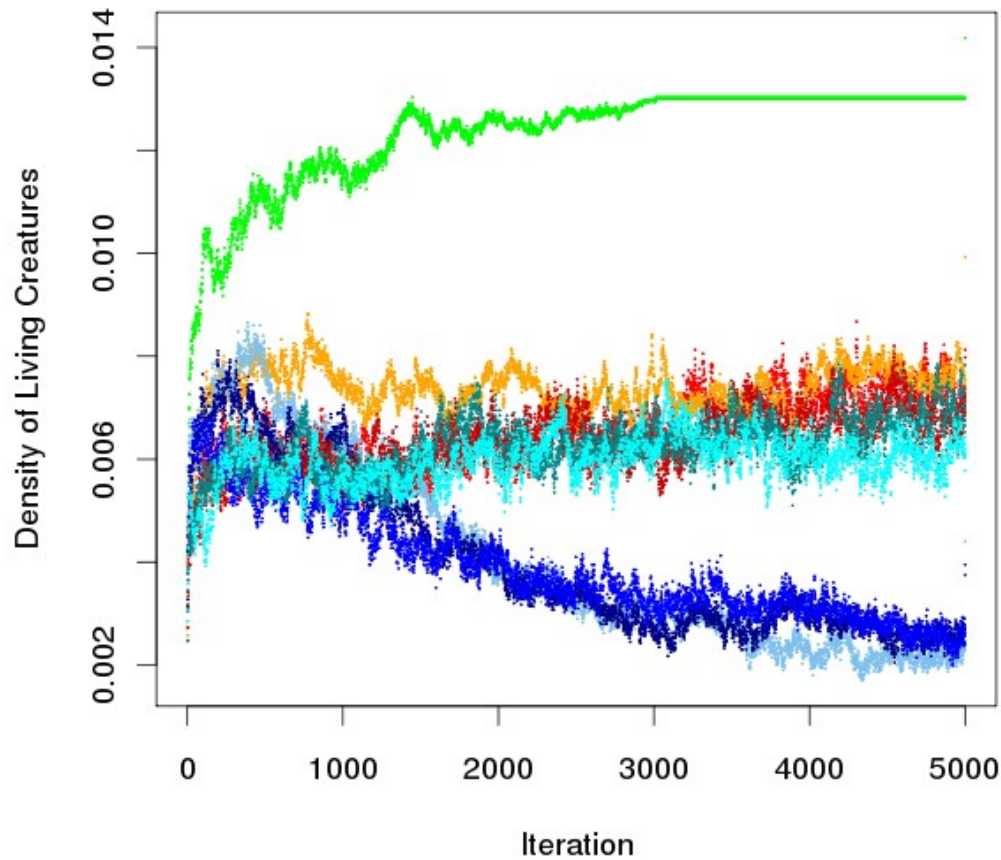
# Cinétiques et survie

- 6 simulations en 400x100 sur 30000 iterations par condition
- On enregistre la date de naissance et de mort de chaque créature ayant vécu

Instance	Birth	Death	ID	Name	G	TA	B	Age	log_Age
1	363	470	0	SSTG5	0	0	0	108	4.68213122712422
2	476	476	0	SSTG5	0	0	0	1	0
3	0	145	1	SETG1	0	0	0	146	4.98360662170834
4	1177	1179	1	SETG1	0	0	0	3	1.09861228866811
5	292	358	1	SETG1	0	0	0	67	4.20469261939097
6	794	875	1	SETG1	0	0	0	82	4.40671924726425
7	0	1685	1	SETG1	0	0	0	1686	7.4301141385618
8	0	0	1	SETG1	0	0	0	1	0
9	11	52	1	SETG1	0	0	0	42	3.73766961828337
...									
359262	8270	8270	4	Glider1	0	0.5	0	1	0
359263	8270	8299	4	Glider1	0	0.5	0	30	3.40119738166216
359264	8273	8298	4	Glider1	0	0.5	0	26	3.25809653802148
359265	8274	8274	4	Glider1	0	0.5	0	1	0
359266	8277	8277	4	Glider1	0	0.5	0	1	0
359267	8277	8277	4	Glider1	0	0.5	0	1	0
359268	8283	8283	4	Glider1	0	0.5	0	1	0
359269	8283	8284	4	Glider1	0	0.5	0	2	0.693147180559945

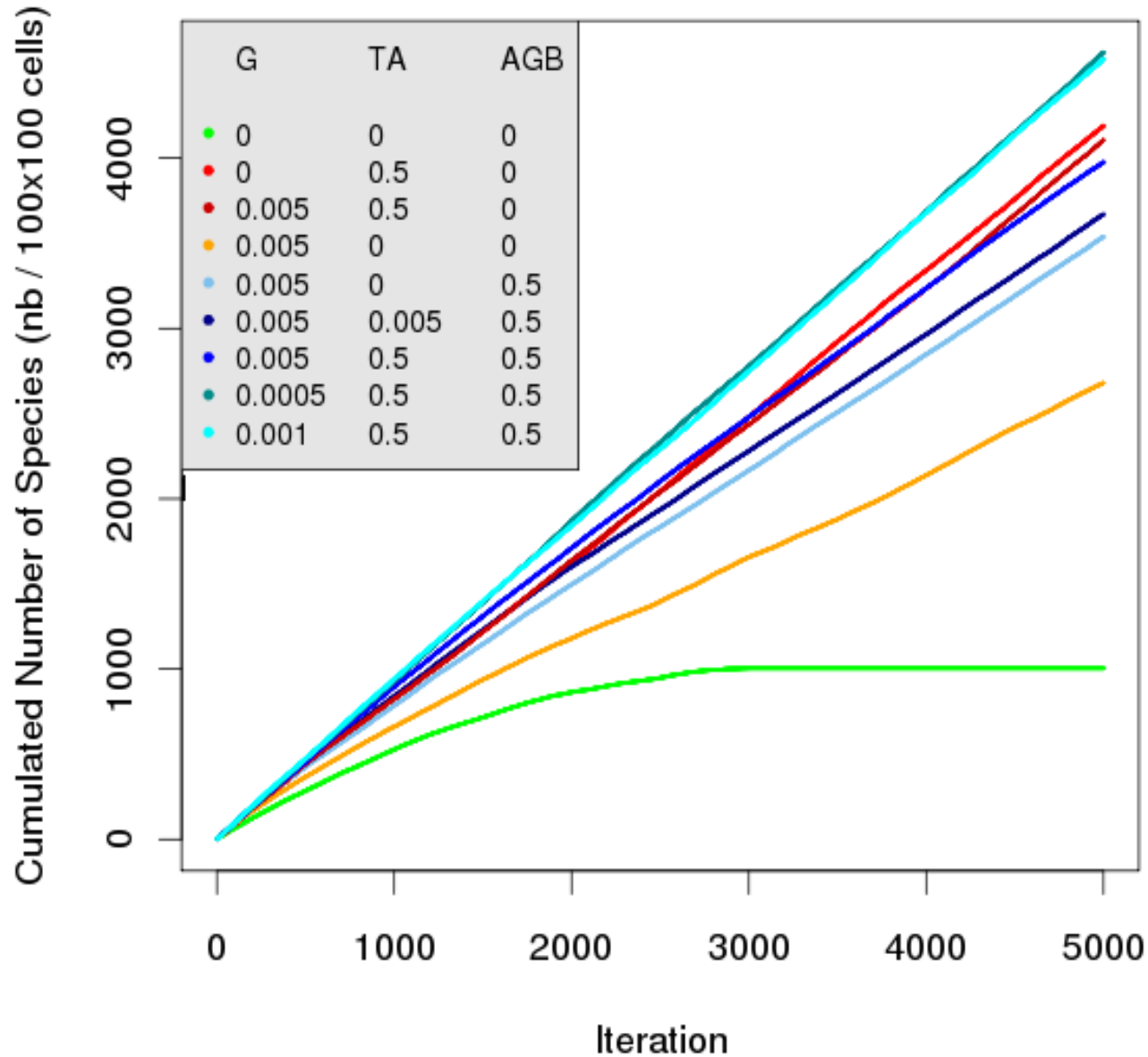
...

# Cinétique de la population d'espèces<sup>25</sup> intéressantes



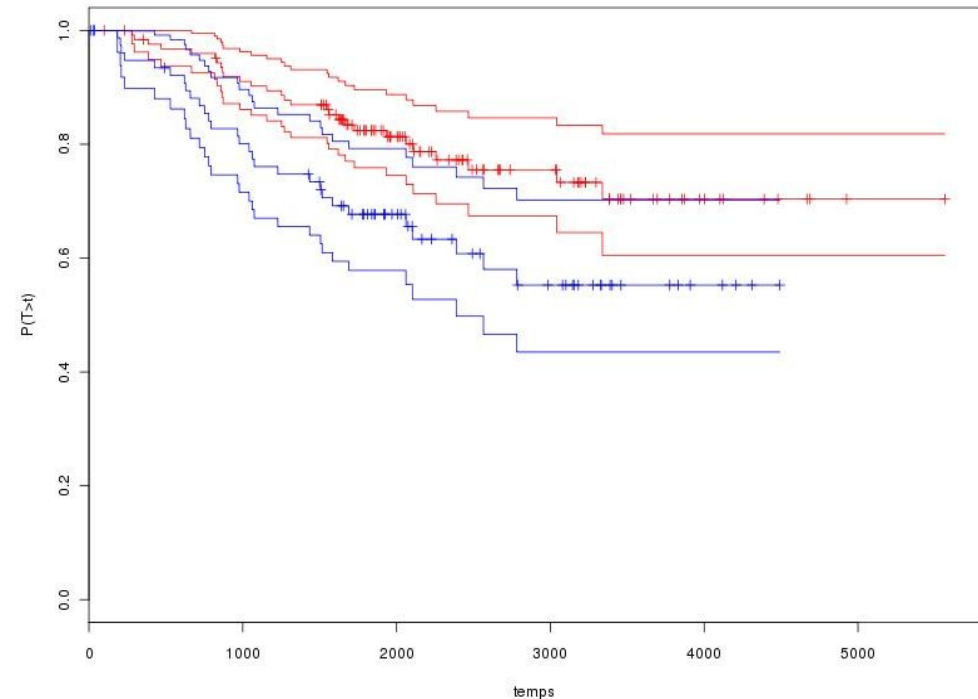
# Cinétique du nombre d'espèces intéressantes

26



# Analyse de survie

- Methode statistique utilisée en épidémiologie : cancer, mortalité infantile ...
- Génère, à partir de données d'une population, une courbe donnant la probabilité de survie d'un individu en fonction d'une variable (souvent le temps).

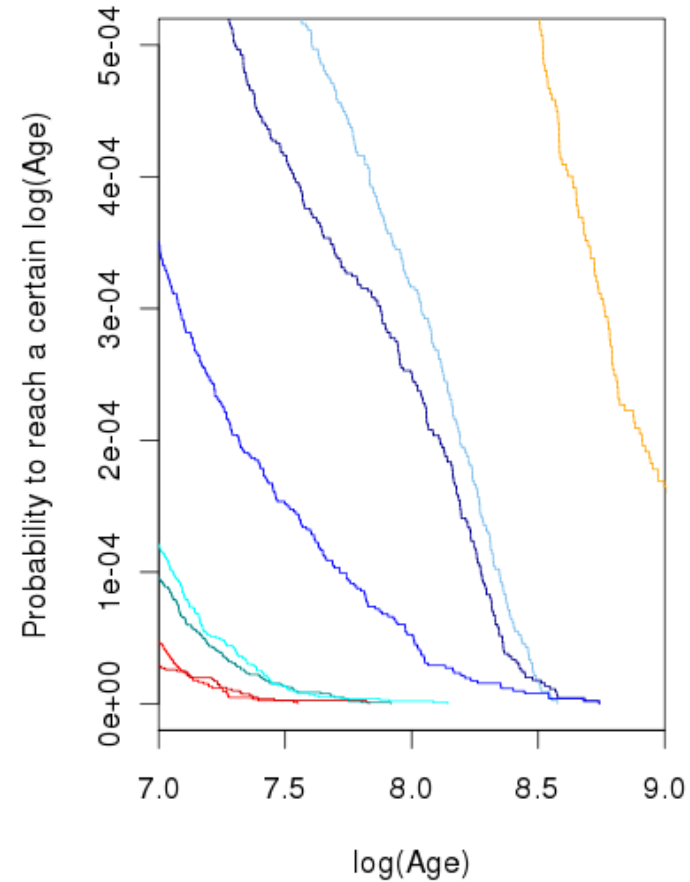
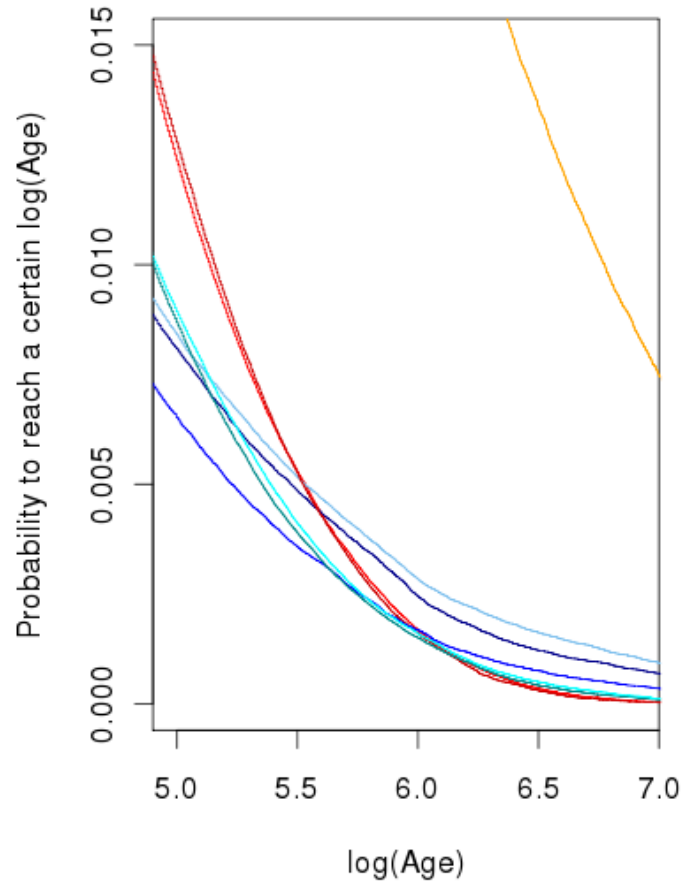
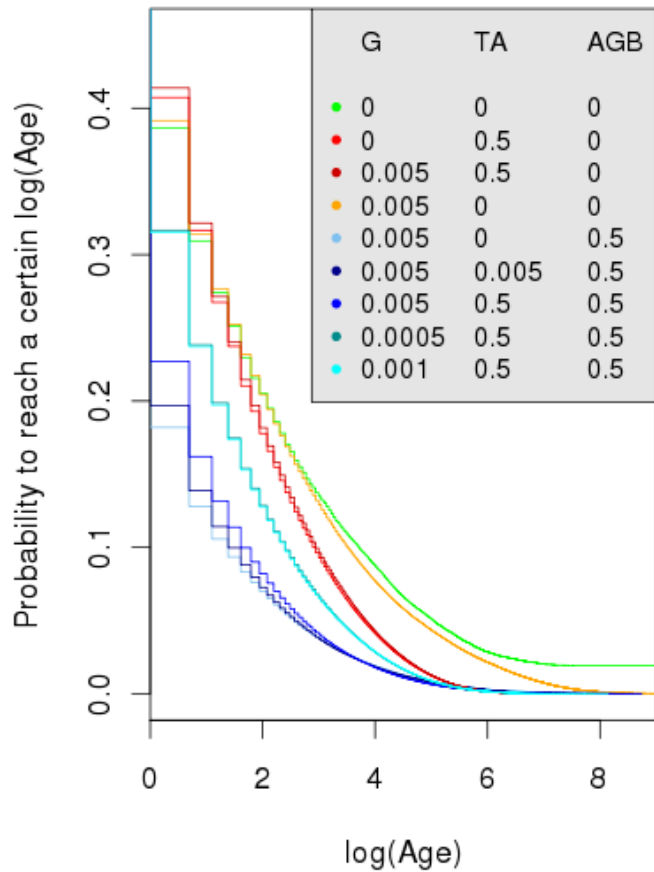


# Analyse de survie

- Fonction de survie  $S(t) = \Pr(T > t)$
- Kaplan-Meyer estimator 
$$\hat{S}(t) = \prod_{t_i \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$
- On construit la courbe à partir du nombre de vivants  $n_i$  et du nombre de morts  $d_i$
- Dans notre étude, on prend les évènements 'Atteindre le log de l'age  $x$ '



# Analyse de survie des espèces intéressantes

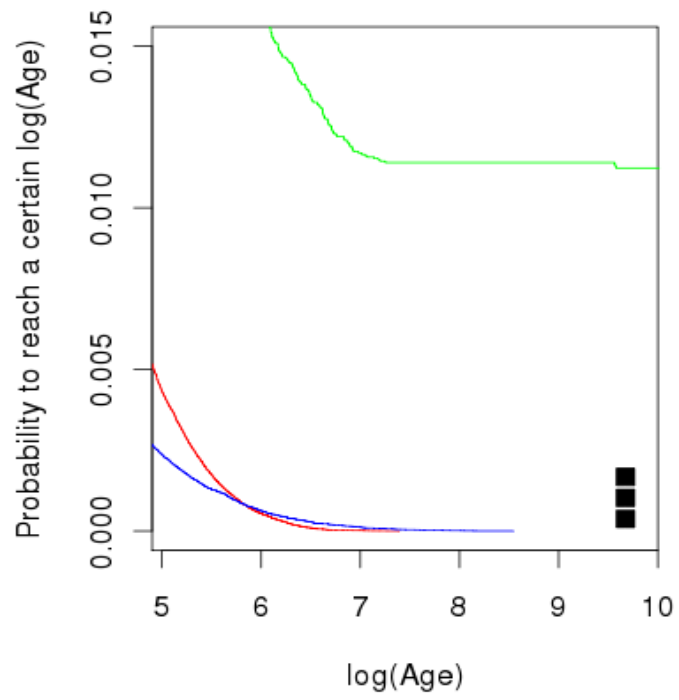


# Analyse de survie des espèces intéressantes et fréquentes

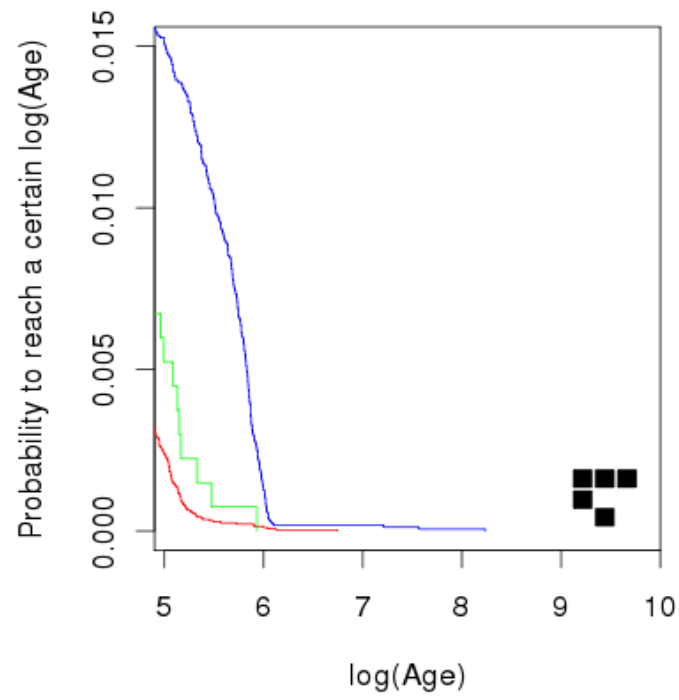
30

Slide d'après

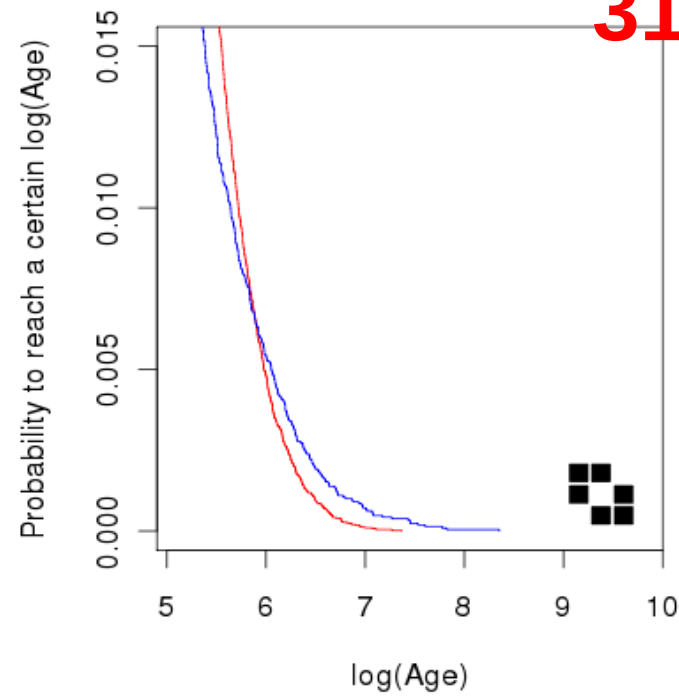
**Blinker**



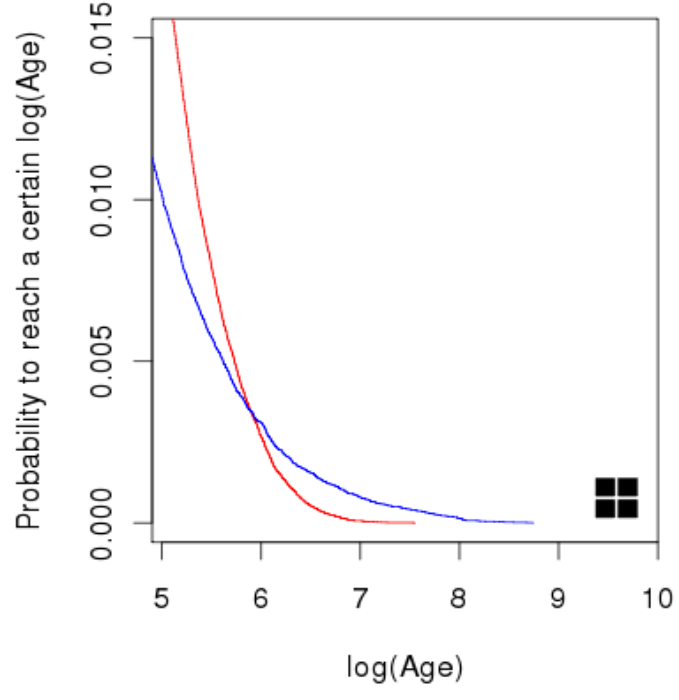
**Glider**



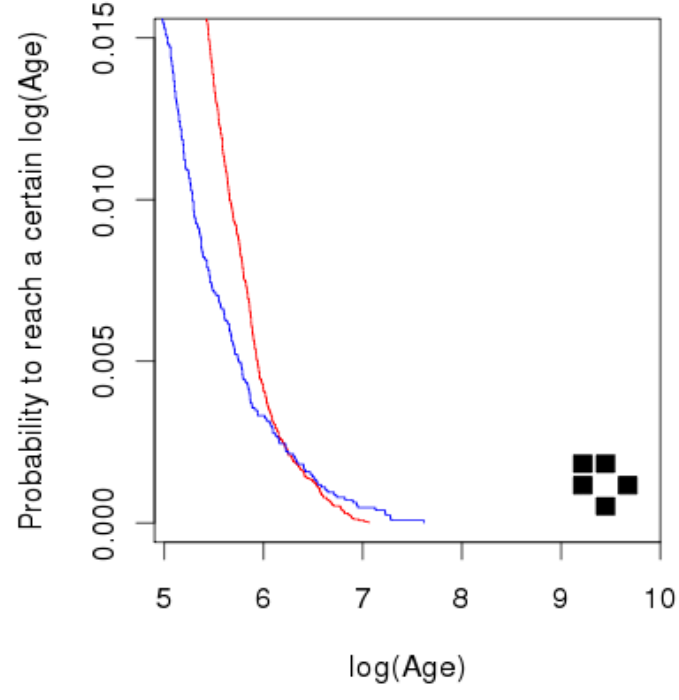
**SPT-1**



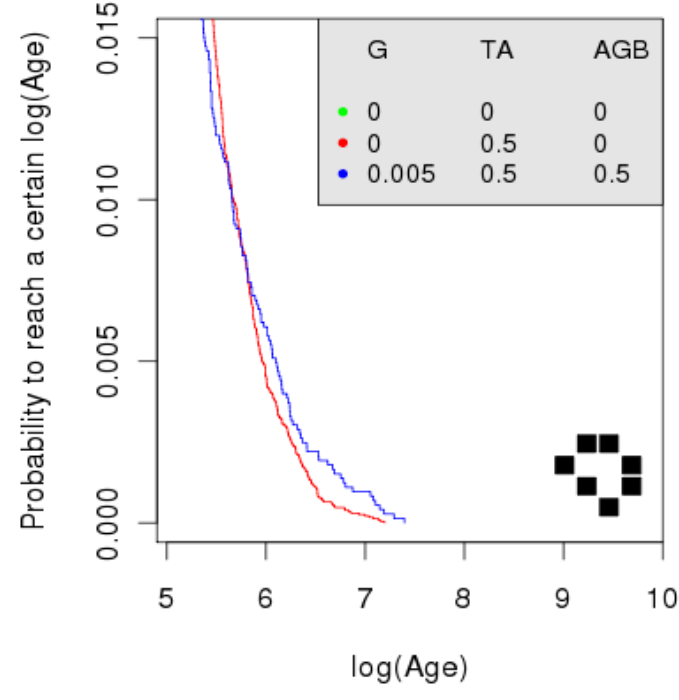
**SET-1**



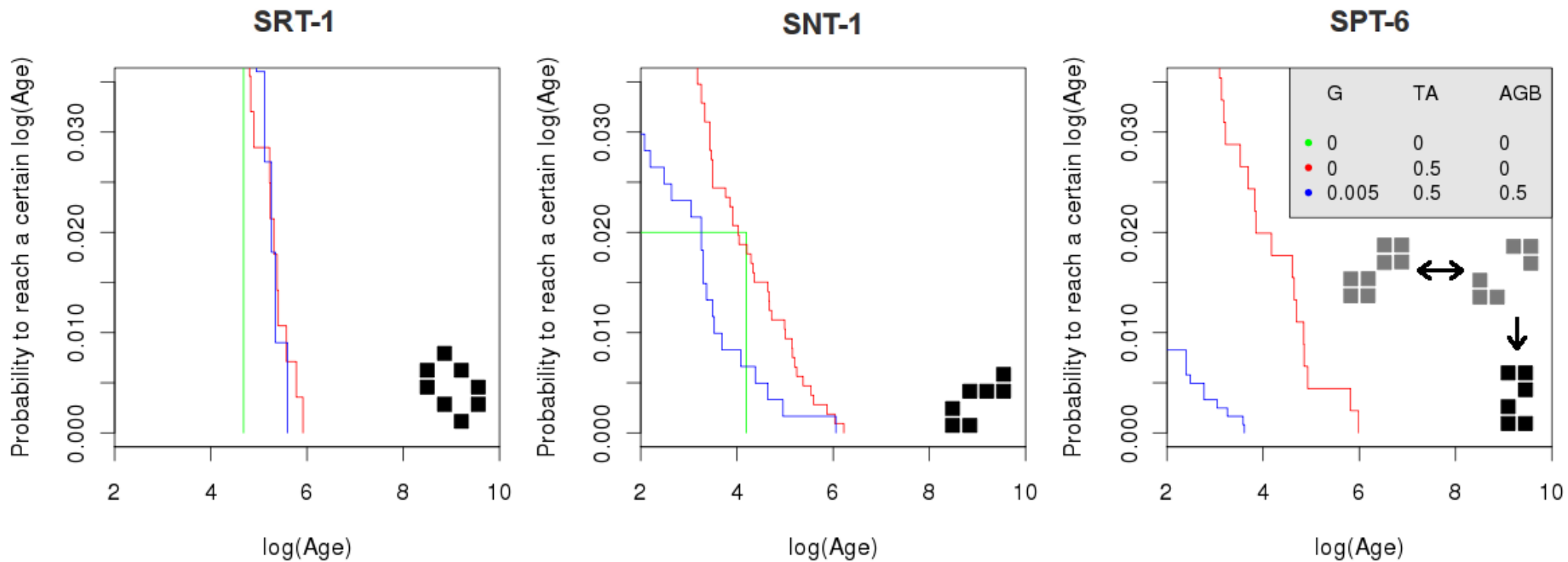
**SPT-1**



**SPT-2**



# Analyse de survie des espèces intéressantes et rares



# Biodiversité, vivacité et entropie

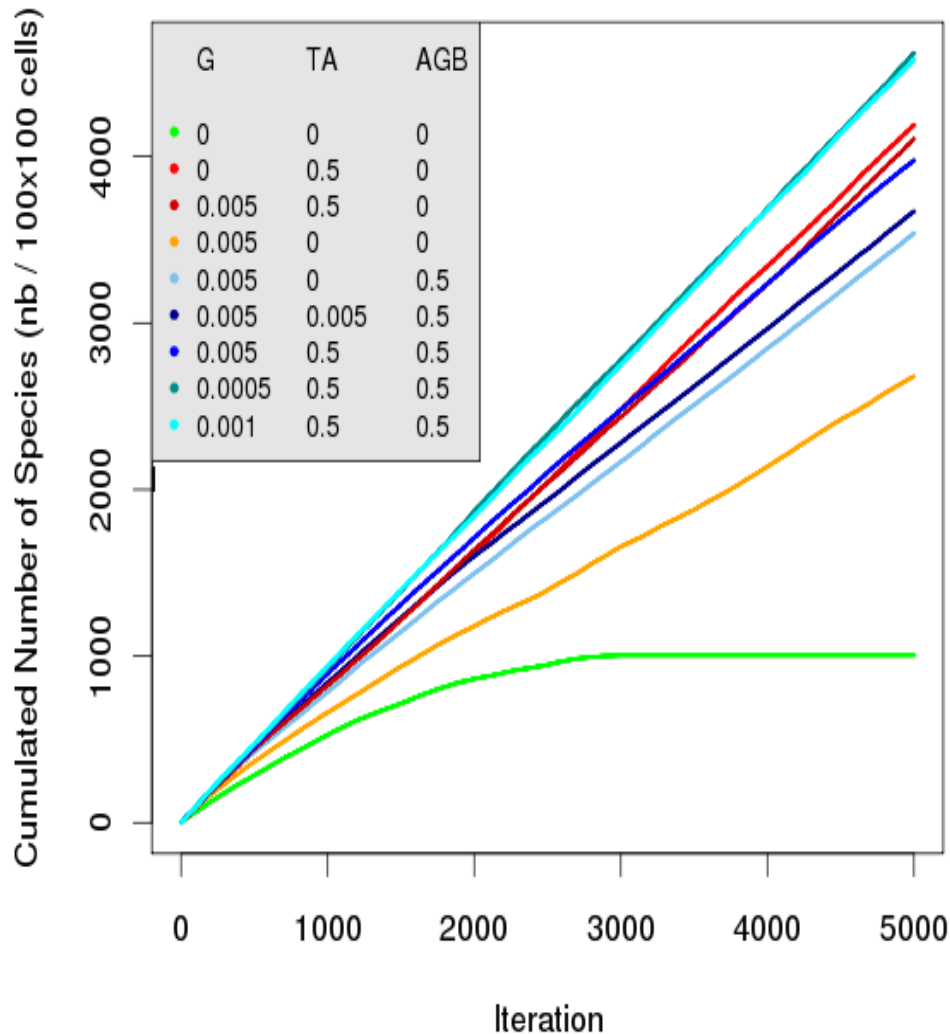
- On veut un indicateur prenant en compte à la fois la biodiversité (nombre d'espèces) et la vivacité (nombre de représentants par espèce).
- On détermine la 'masse' de tous les individus par espèces à chaque instant.
- On détermine aussi la masse restante dans le système (l'environnement incluant les transitoires est une espèce avec un seul représentant).
- On ramène l'ensemble à des fréquences  $v$  et on calcule l'entropie du système (densité  $D$ ) au temps  $t$  en fonction des conditions  $\alpha$  comme :

$$H(D_{\alpha}(t)) = \sum_{i=1}^{N_E} v_i \log(v_i) \quad \text{index de biodiversité de Shannon}$$

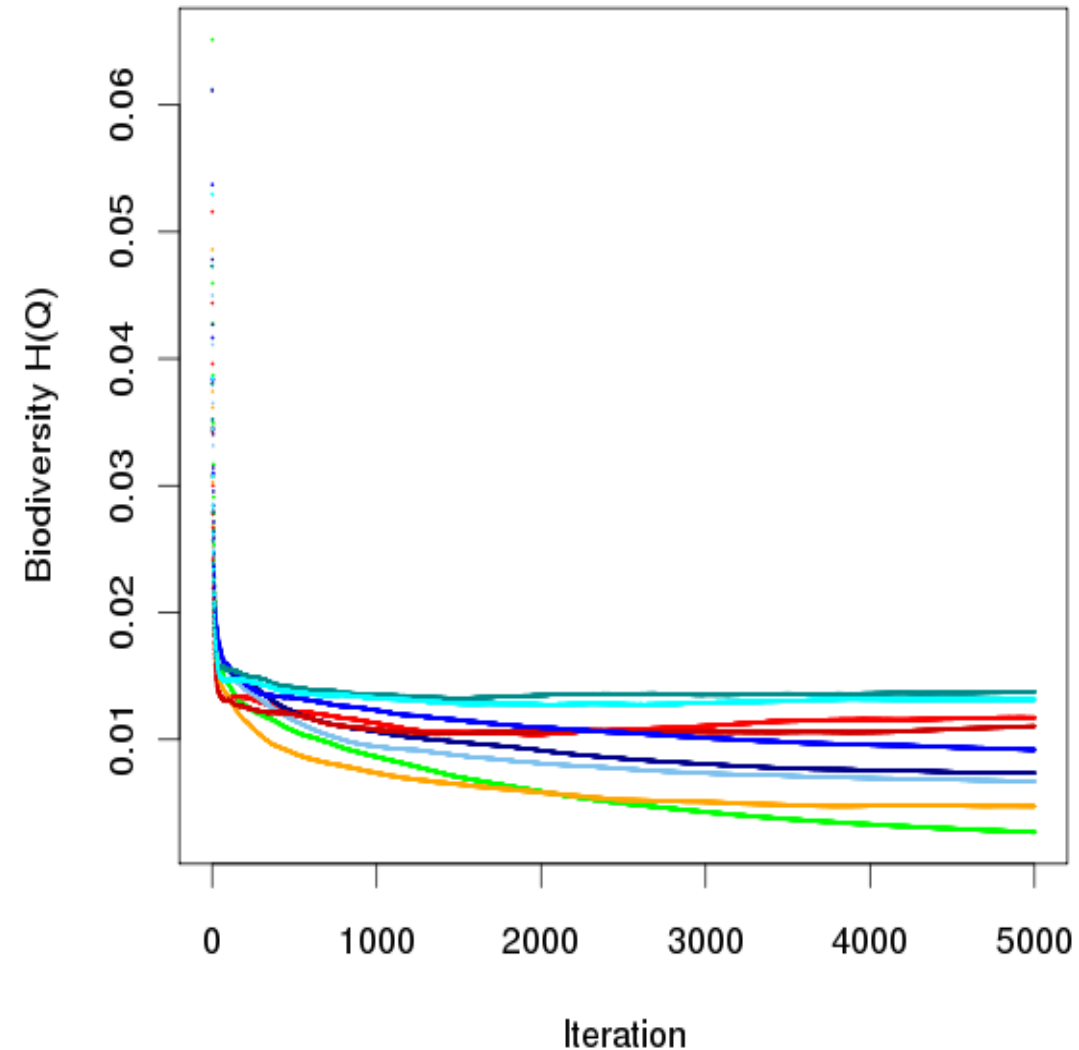


# Biodiversité, vivacité et entropie

Nombre d'espèces cumulé



Entropie → Biodiversité et Vivacité



# Discussion

- Agitation : On augmente la diversité du système en espèces intéressantes (gliders, blinkers, squares et autres statiques)
- Sedimentation : La représentativité de ces espèces augmente aussi
- Leur durée de vie augmente : ces espèces vivent au dessus de la boue active. Elles s'échappent dans l'océan dilué ...
- Avec l'ajout de sédimentation et d'énergie sous forme d'agitation thermique et de chaleur au sol, on sélectionne des comportements plus riches et organisés
- Les collisions rendent possibles de rejoindre des jardins d'Eden
- L'index de biodiversité de Shannon ne rend pas bien compte de la présence d'espèces sous représentées.

# La suite

- « Travailler » l'index de biodiversité pour qu'il prenne mieux en compte les espèces sous-représentées → Entropie moyenne des courbes de survie des espèces.
- Estimer le gain pour l'écosystème (survie) de l'apport d'une nouvelle espèce.
- Application a un système typogénétique
  - On veut voir se former des motifs de Turing ou des ondes de composition
  - Si aggrégation et formation de macro-structures → sédimentation et formation d'une écologie de type benthique
- Application à un écosystème de vie artificielle avec génotype et phénotype

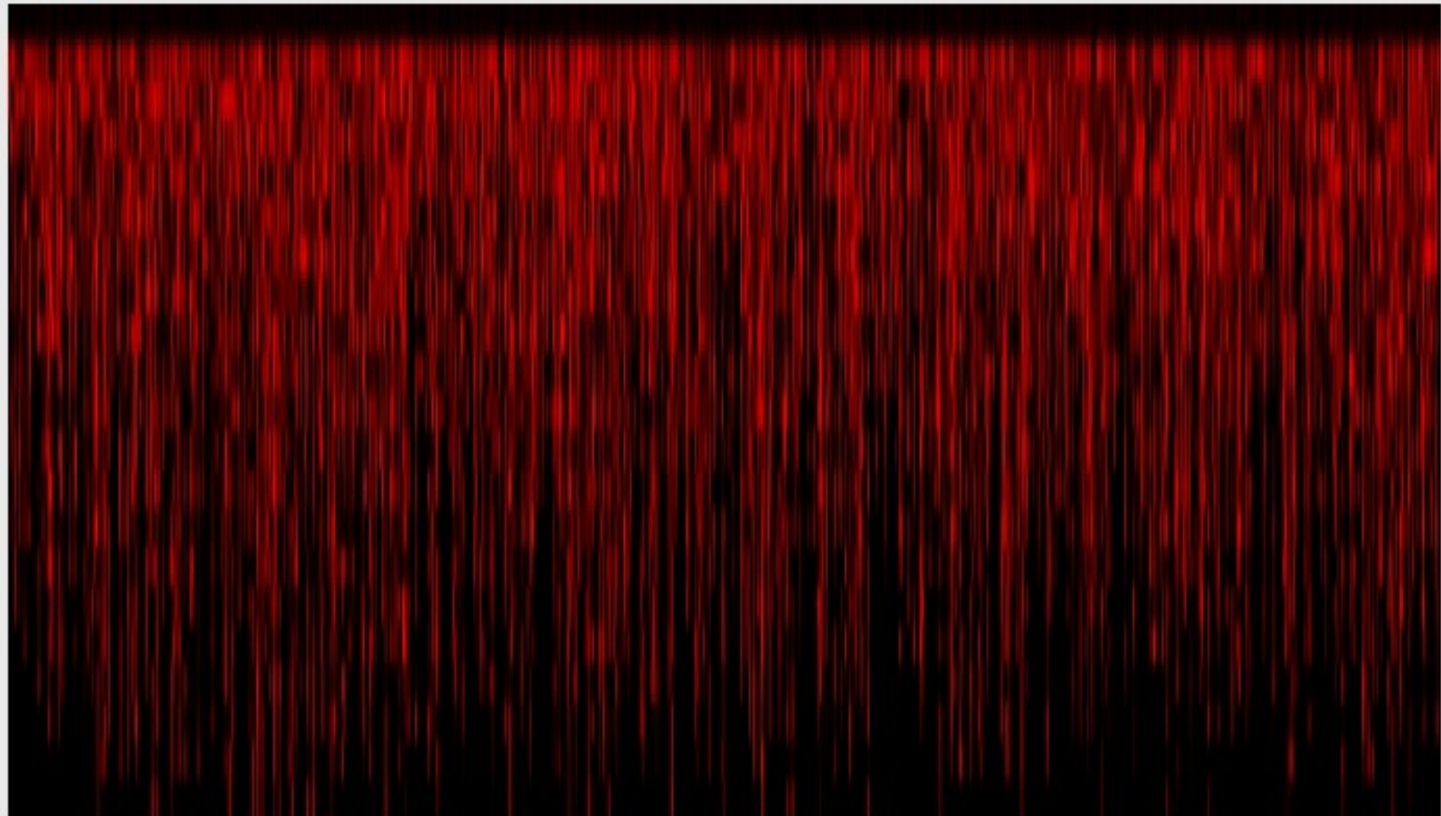
# GEcoBioDyn - MatrixStudio

- OpenCL → GPU computing (speed factor >  $10^6$  !!!)
  - Réalisation avec MatrixStudio  
([http://www.matrixstudio.org/Matrix\\_Studio/Home/Home.html](http://www.matrixstudio.org/Matrix_Studio/Home/Home.html))
- L'environnement est conservatif en masse. Il contient créatures et matière diffuse.
- Les créatures ont :
  - Une masse comprise entre 2 masses critiques
    - ♦ Division et mort conditionnée par la masse
  - Un génome codant pour des organes
    - ♦ 1 gène = 1 octet / Génomes de tailles variables
    - ♦ Sujets à mutations et recombinaisons
  - Organes positionnés autour de la créature
    - ♦ Senseurs (de créatures, de matière)
    - ♦ Effecteurs (Manger, Bouger, ...)
- ♦ Tous processus probabilistes (efficacité des senseurs, des effecteurs, de la prédation, division, mort ...)



Matrices Schedule Kernels Libraries

- Positions
- Masses
- GenomeMasses
- GenomeOrganes
- Rendu
- Matter1
- Matter2
- Alea
- Angles
- Env
- SensorMasses
- SensorMatter1
- SensorMatter2
- MaskShift
- Debug



Console Properties

```
Compilation started at 13:52:46
OpenCL execution on GPU.
Number of openCL devices found: 2
Number of matrices: 15
Creating kernel: BiodynKernel... OK.
Creating kernel: OtherKernel... OK.
Compilation finished at 13:52:46
Compilation successful.
```

**Génomes (en colonnes) de 1000 créatures.**  
Les génomes contiennent ici au maximum 20 gènes codant soit pour un senseur, soit pour un effecteur.





Matrices Schedule Kernels Libraries

- Positions
- Masses
- GenomeMasses
- GenomeOrganes
- Rendu
- Matter1
- Matter2
- Alea
- Angles
- Env
- SensorMasses
- SensorMatter1
- SensorMatter2
- MaskShift
- Debug

+  
-  
✎

**Prédateurs ...**

**Sédiment  
(créatures peu performantes)**



Console Properties

```
Compilation started at 13:52:46
OpenCL execution on GPU.
Number of openCL devices found: 2
Number of matrices: 15
Creating kernel: BiodynKernel... OK.
Creating kernel: OtherKernel... OK.
Compilation finished at 13:52:46
Compilation successful.
```

**Capture d'une simulation avec 1000 créatures.**  
La couleur des créatures reflète leurs performances. Les créatures les 'moins' évoluées sont en rouge ; les 'plus' évoluées en gris.

# GEcoBioDyn - MatrixStudio

- Au départ, les génomes sont tirés au hasard.
- Des créatures chassent pour survivre
- D'autres se multiplient vite
- On assiste à des spécialisations
  
- Les nageurs vivent dans l'espace dilué mais doivent chasser
- Les 'crabes' sédimentent et le plancton surnage
  
- On veut faire la même étude de survie / biodiversité