

Modélisation multi-niveau

Un cadre théorique pour l'intégration des niveaux d'organisation dans les modèles.
Applications à l'activité spatiale et à la simulation de grandes populations de bactéries.

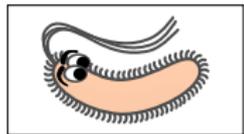
Soutenance de thèse de
Martin POTIER

le 6 juillet 2017
LACL (Créteil, France)



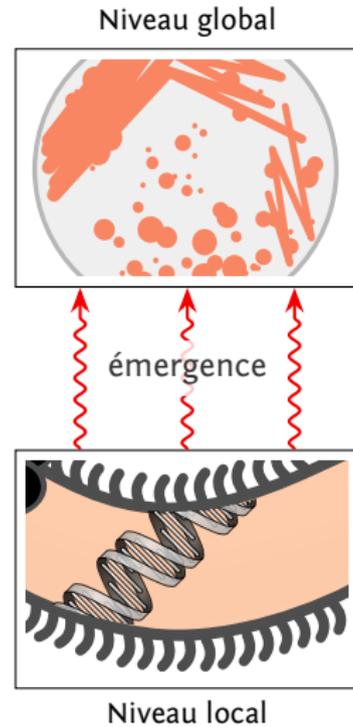
Le projet ANR SynBioTIC (2011–2015)

- ▶ **Biologie synthétique**
 - ▶ Génie génétique
Production d'insuline par **une** bactérie
[Riggs et Itakura, 1978]
 - ▶ **Abstraction**, standardisation, découplage
- ▶ **Projet exploratoire** : « permettre l'exploitation des **propriétés collectives** d'une population bactérienne pour créer des biosystèmes artificiels. »



↑
abstraction

Problématique



Problématique

```
fib 0 = 0
fib 1 = 1
fib n = fib (n-1)
      + fib (n-2)
```



Compilation

```
0110000101100110011000010
11000101100101011011101
10001001100101101010011
010100110110001000000110
1000011010101101101001100
1010101110011100101001
010010000011001010101000
101010000110001001100101
001000000100000011010010
11100101100101011011001
101010111001101100011011
1100101110110110001001100110011000000
0001110011011100101001100000011000110
11001011100100110001000110000000000110
010101101000011001011000010101101011100
000100000011100111011100010110010101
101010111100001100100011101011100010101
00001100100110000101101110011000100000
```



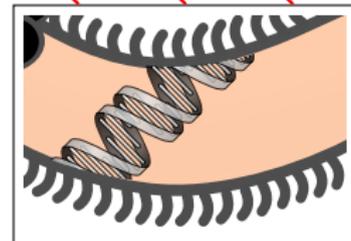
Haut niveau
de description

Niveau global



émergence

Bas niveau
de description



Niveau local

Problématique

```
fib 0 = 0
fib 1 = 1
fib n = fib (n-1)
      + fib (n-2)
```



Compilation

```
0110000101100110011000010
11000110110010111011101
10001001100101101010011
010100110110001000000110
10000110101011011001100
1010101110011100101001
010010000001100101011000
101010000110001001100101
001000000110000011010010
1110010110010110111001
101010111001101100011011
1100101110110110001001100110011000
0001110011011100101001100000011000110
1100101110010011000100011000000000110
01010110100001100110110000101011011100
000100000011100111011100010110010101
101010111100001100100011101011100010101
0000110010011000010110111001101000000
```

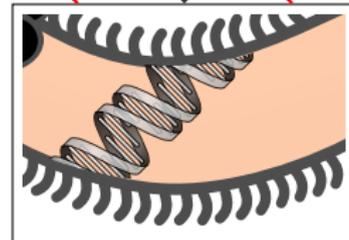


Haut niveau
de description

Niveau global



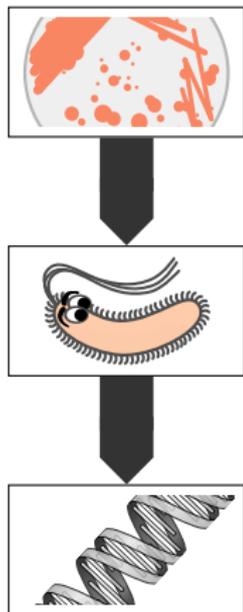
Bas niveau
de description



Niveau local

Le projet ANR SYNBIOTIC (2011–2015)

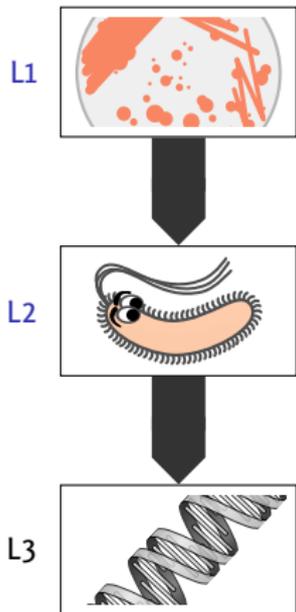
- ▶ Découpe en work-package
 - ▶ WP1 : Études des formes, fourni des exemples
 - ▶ WP2 : Programmation spatiale (L1)
 - ▶ WP3 : Programmation orienté entité (L2)
 - ▶ WP4 : Réseau de régulation génétique (L3)
 - ▶ WP5 : Calculabilité
 - ▶ WP6 : Sûreté, sécurité



Le projet ANR SYNBIOTIC (2011–2015)

► Découpe en work-package

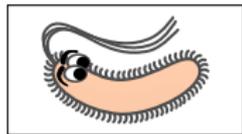
- ▶ WP1 : Études des formes, fourni des exemples
- ▶ WP2 : Programmation spatiale (L1)
- ▶ WP3 : Programmation orienté entité (L2)
- ▶ WP4 : Réseau de régulation génétique (L3)
- ▶ WP5 : Calculabilité
- ▶ WP6 : Sûreté, sécurité



1. Vers la modélisation multi-niveau



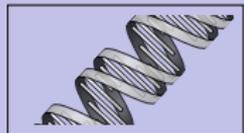
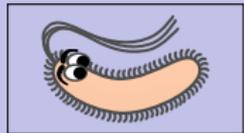
2. Topologie de l'activité



3. Simulateur de colonie de bactéries



-
1. Vers la modélisation multi-niveau
 2. Topologie de l'activité
 3. Simulateur de colonie de bactéries



Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

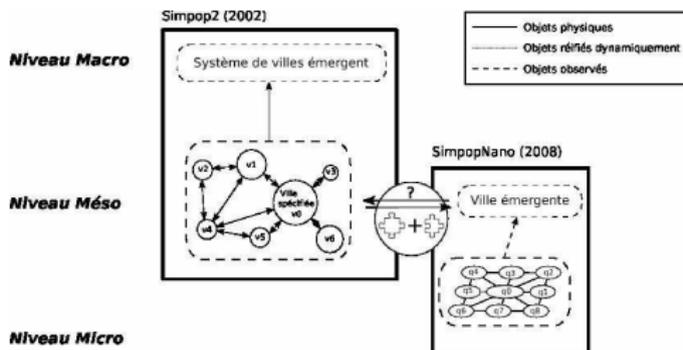
- *Modèle de la croissance des villes*
- *Modèle intégratif d'une cellule*

► Transformation

- Transformation de *modèles UML*
- Raffinement de *modèles*

► Complexification

- Memory Evolutive (Neural) System
- Cellular Non-linear Network



T. Louail "Comparer les morphogénèses urbaines en Europe et aux États-Unis par la simulation à base d'agents - Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale", Thèse, 2010

Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

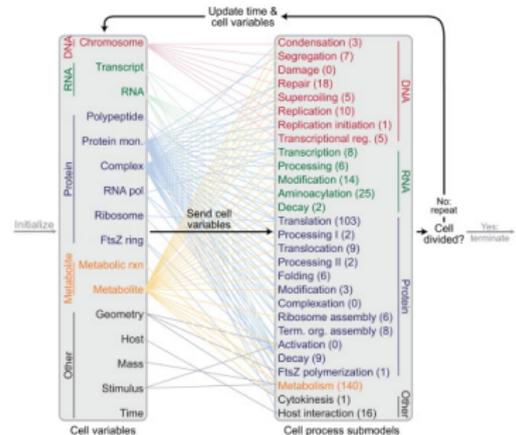
- *Modèle* de la croissance des villes
- *Modèle intégratif d'une cellule*

► Transformation

- Transformation de *modèles* UML
- Raffinement de *modèles*

► Complexification

- Memory Evolutive (Neural) System
- Cellular Non-linear Network



J. R. Karr et al. "A whole-cell computational model predicts phenotype from genotype", Nature, 2012

Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

- *Modèle* de la croissance des villes
- *Modèle* intégratif d'une cellule

► Transformation

- Transformation de *modèles* UML
- Raffinement de *modèles*

► Complexification

- Memory Evolutive (Neural) System
- Cellular Non-linear Network

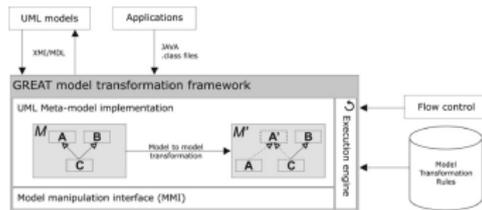


Fig. 1. The GREAT transformation framework.



Fig. 2. Example transformation rule.

A. Christoph et M. M. Müller "GREAT: UML transformation tool for porting middleware applications", Modeling Languages and Applications : 6th International Conference, San Francisco, CA, USA, 2003

Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

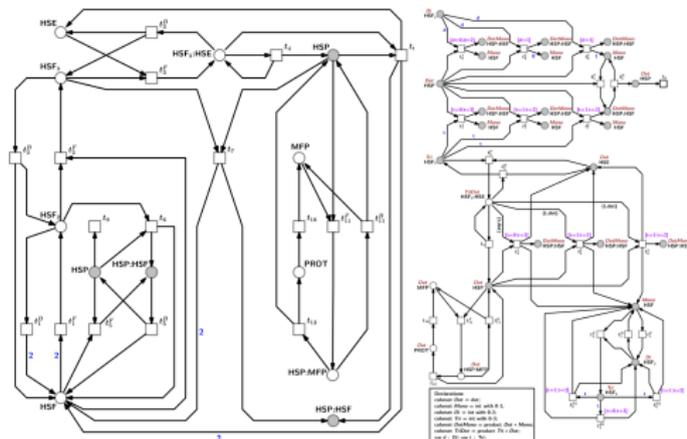
- *Modèle* de la croissance des villes
- *Modèle* intégratif d'une cellule

► Transformation

- Transformation de *modèles* UML
- *Raffinement de modèles*

► Complexification

- Memory Evolutive (Neural) System
- Cellular Non-linear Network



D.-E. Gratie "Refinement of biomodels using Petri nets", TUCS dissertation, 2016

Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

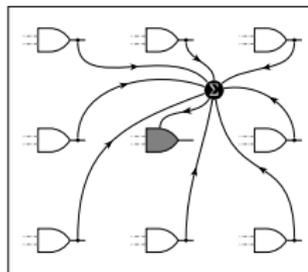
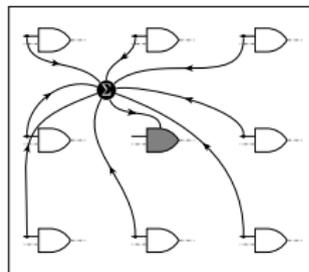
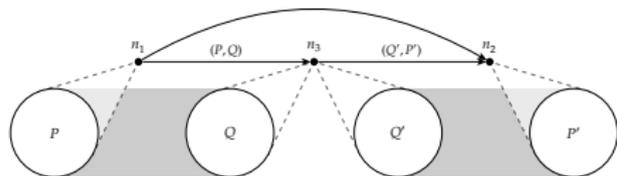
- *Modèle* de la croissance des villes
- *Modèle* intégratif d'une cellule

► Transformation

- Transformation de *modèles* UML
- Raffinement de *modèles*

► Complexification

- **Memory Evolutive (Neural) System**
- **Cellular Non-linear Network**



K. Mainzer et L. O. Chua : "Local activity principle", World Scientific, 2013

Mettre en relation des « modèles »

► Couplage

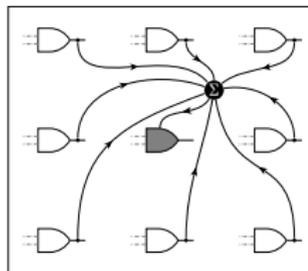
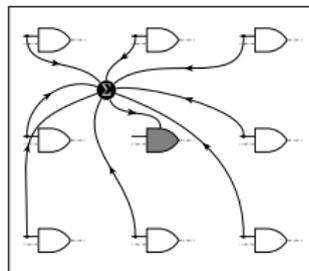
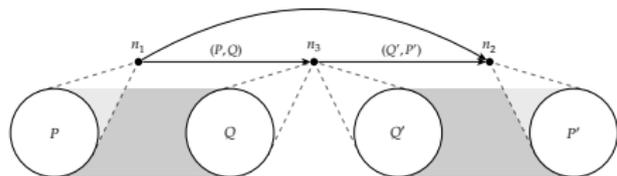
- *Modèle* de la croissance des villes
- *Modèle* intégratif d'une cellule

► Transformation

- Transformation de *modèles* UML
- Raffinement de *modèles*

► Complexification

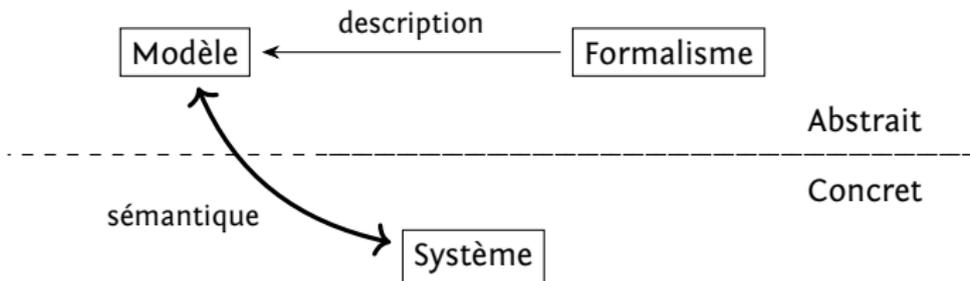
- Memory Evolutive (Neural) System
- Cellular Non-linear Network



K. Mainzer et L. O. Chua : "Local activity principle", World Scientific, 2013

Cadre **formel unifié**,
«**sémantique**» du système,
abstraction et **multi-niveau**

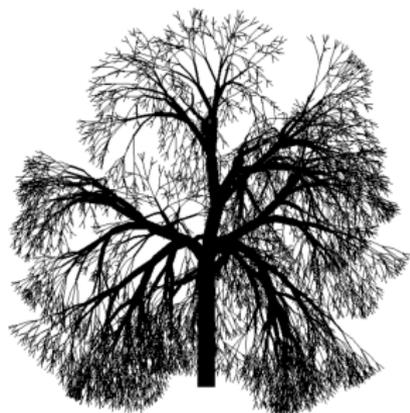
Système, Modèle, Formalisme



- ▶ **Système**
objet d'étude décomposé en parties
- ▶ **Modèle**
vue simplifiée du système (abstraction) dont l'existence est dépendante du système
- ▶ **Formalisme**
langage, support d'expression du modèle

Système, Modèle, Formalisme

- ▶ *L-System* comme **formalisme**
support de la description de la croissance des plantes
- ▶ *L-System* comme **modèle**
modèle de calcul comme λ -calcul, machines de Turing, grammaires de Chomsky, ...
- ▶ *L-System* comme **système**
objet d'étude formel dont un modèle pourrait être les fonctions de croissance



P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer : "The algorithmic beauty of plants (the virtual laboratory)", 1990



G. Rozenberg, A. Salomaa : "The mathematical theory of L-Systems", DAIMI Report Series, 3(33), 1974

$$\begin{array}{l} f(n) = |w_n| \\ \left\{ \begin{array}{l} a \rightarrow ab \\ b \rightarrow b \end{array} \right. \quad f(n) = n + 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} a \rightarrow b \\ b \rightarrow ab \end{array} \right. \quad f(n) = \text{fib}(n) \end{array}$$

Différents types de modèles (formalismes)

- ▶ Cadre minimal commun : la **théorie des ensembles**

$$\mathfrak{M} \rightsquigarrow E_{\mathfrak{M}}$$

Différents types de modèles (formalismes)

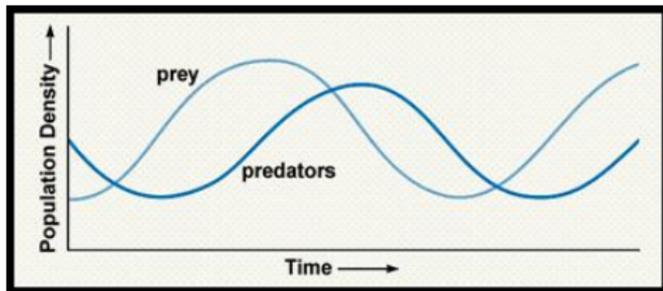
- Cadre minimal commun : la **théorie des ensembles**

$$\mathfrak{M} \rightsquigarrow E_{\mathfrak{M}}$$

- Exemples

Type	Modèle \mathfrak{M}	Ensemble support $E_{\mathfrak{M}}$
Expérimental	$E_{\mathfrak{M}}$	Donné par extension
À observables	$\langle \Sigma_{\mathfrak{M}}, \mathcal{B}_{\mathfrak{M}} \rangle$	$\mathcal{B}_{\mathfrak{M}} \subseteq \Sigma_{\mathfrak{M}}$
Dynamique	$\langle \mathcal{B}_{\mathfrak{M}}, \mathbb{T}_{\mathfrak{M}}, \Phi_{\mathfrak{M}} \rangle$	$\{(x, \delta, \Phi_{\mathfrak{M}}(x, \delta)) \mid x \in \mathcal{B}_{\mathfrak{M}}, \delta \in \mathbb{T}_{\mathfrak{M}}\}$
À base de champs	$\langle \mathcal{S}_{\mathfrak{M}}, \mathbb{V}_{\mathfrak{M}}, f_{\mathfrak{M}} \rangle$	$\{(x, f_{\mathfrak{M}}(x)) \mid x \in \mathcal{S}_{\mathfrak{M}}\}$
Probabiliste	$\langle \mathcal{X}_{\mathfrak{M}}, \mathbb{P}_{\mathfrak{M}} \rangle$	$\{(A, \mathbb{P}_{\mathfrak{M}}(A)) \mid A \in \mathcal{A}_{\mathfrak{M}}\}$

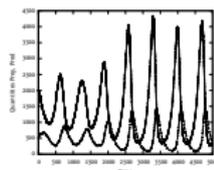
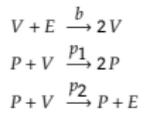
Système proies/prédateurs (système)



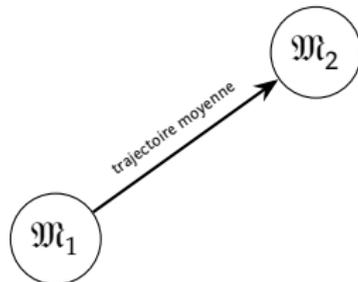
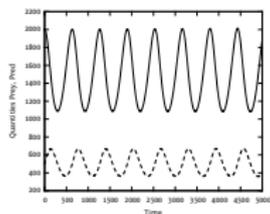
S. S. Mader, Biology 6th edition, 1998

- ▶ Les proies se reproduisent spontanément
- ▶ Les prédateurs meurent spontanément
- ▶ Les prédateurs chassent les proies
 - ▶ Les proies meurent (chassées)
 - ▶ Les prédateurs peuvent se reproduire (efficacité de la chasse)

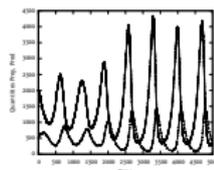
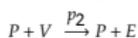
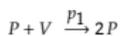
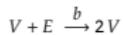
Système proie/prédateurs (modèles)



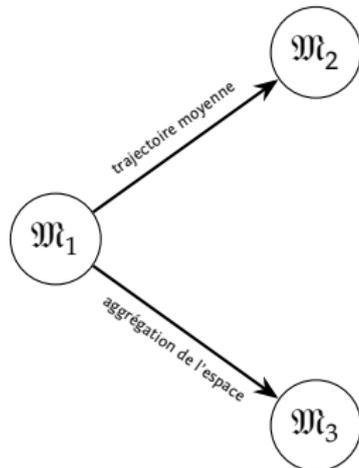
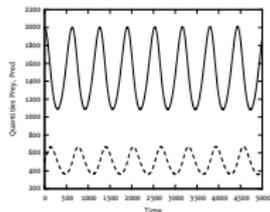
$$\begin{cases}
 \frac{dU_V}{dt} = rU_V \left(1 - \frac{U_V}{K}\right) - gU_P U_V \\
 \frac{dU_P}{dt} = nU_V U_P - \mu U_P
 \end{cases}$$



Système proie/prédateurs (modèles)

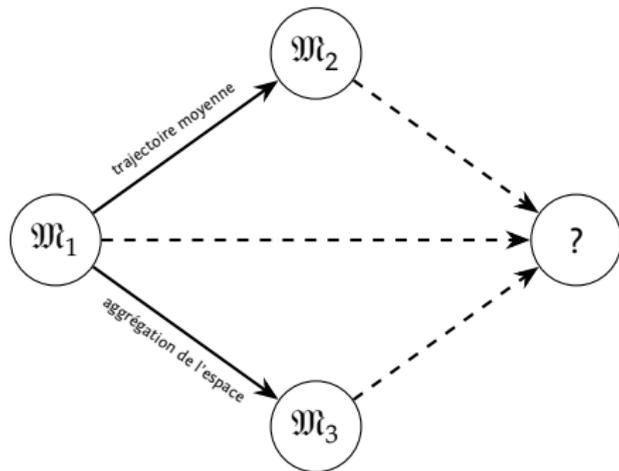


$$\begin{cases} \frac{dU_V}{dt} = rU_V \left(1 - \frac{U_V}{K}\right) - gU_P U_V \\ \frac{dU_P}{dt} = nU_V U_P - \mu U_P \end{cases}$$

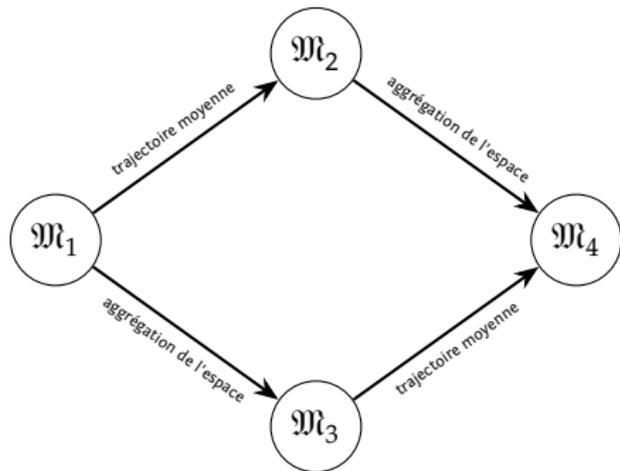


$$\begin{cases} \frac{du_V}{dt} = ru_V \left(1 - \frac{u_V}{K}\right) - gu_P u_V \\ \quad + D_V (\nabla^2 u_V + u_V \nabla^2 u_P - u_P \nabla^2 u_V) \\ \frac{du_P}{dt} = nu_V u_P - \mu u_P \\ \quad + D_P (\nabla^2 u_P + u_P \nabla^2 u_V - u_V \nabla^2 u_P) \end{cases}$$

Système proies/prédateurs (modèles)



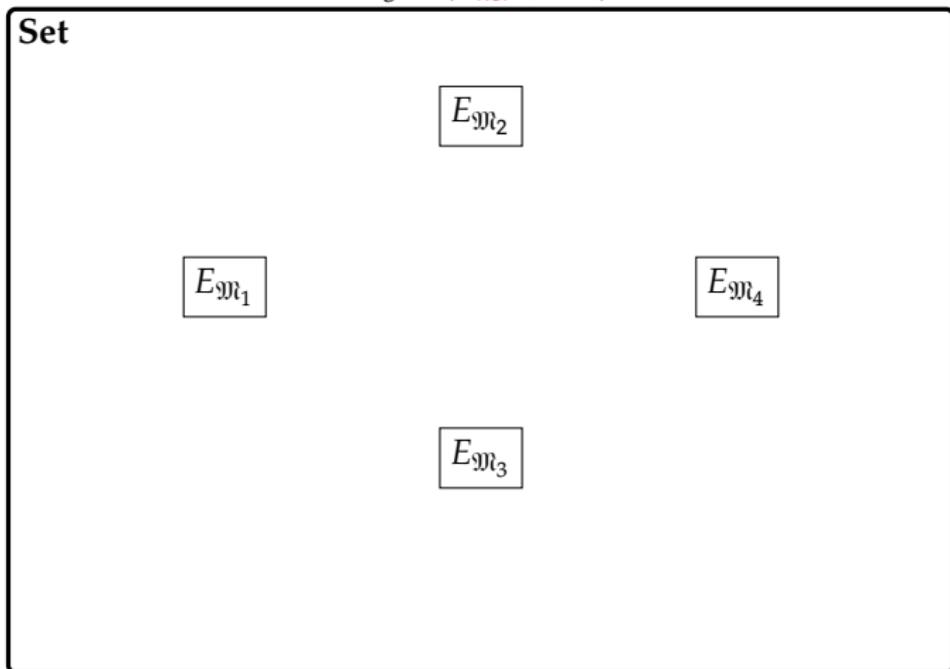
Système proies/prédateurs (modèles)



[Lugo et McKane 2008]

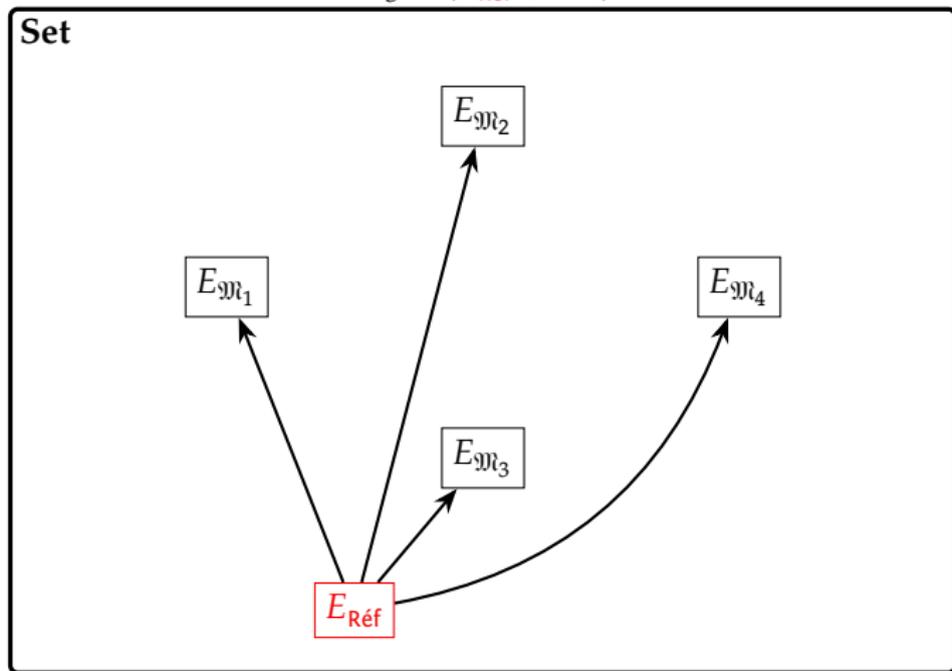
Catégorie des modèles

$$\mathbf{Abs}_S = (E_{\text{Réf}} \downarrow \mathbf{Set})^{\text{op}}$$



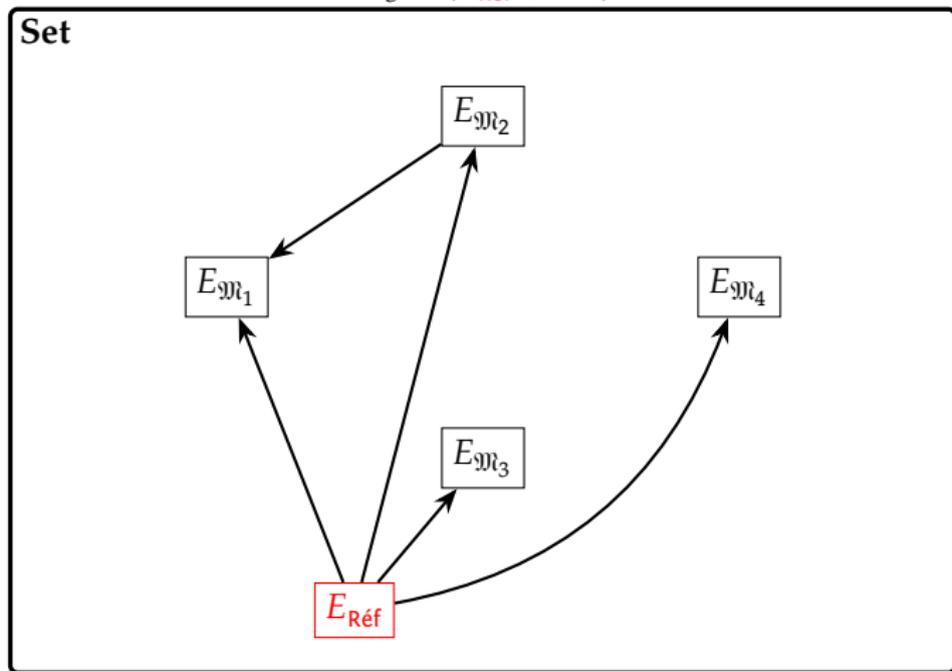
Catégorie des modèles

$$\text{Abs}_S = (E_{\text{Réf}} \downarrow \text{Set})^{\text{op}}$$



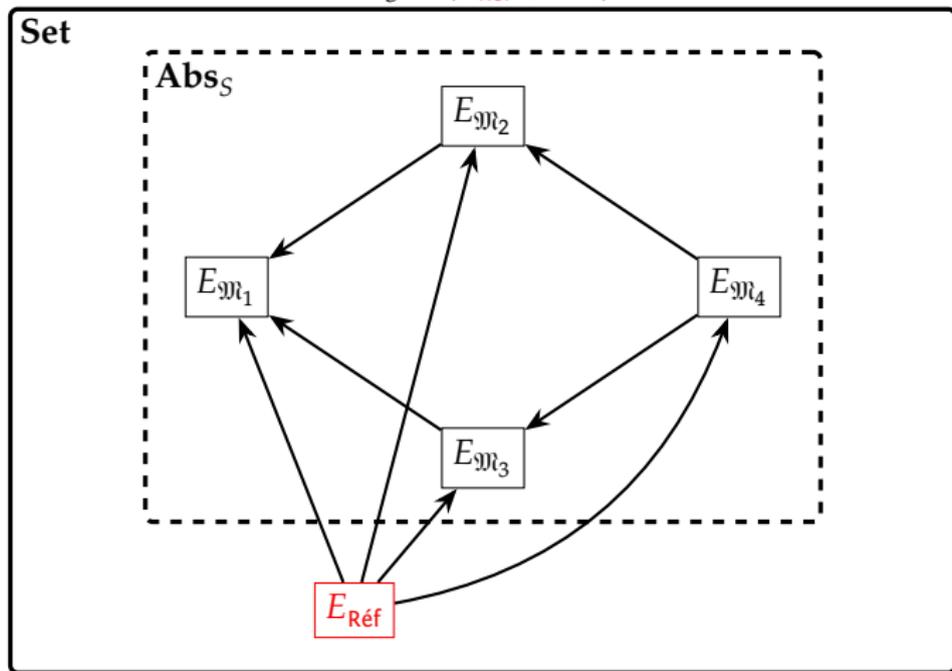
Catégorie des modèles

$$\text{Abs}_S = (E_{\text{Réf}} \downarrow \text{Set})^{\text{op}}$$



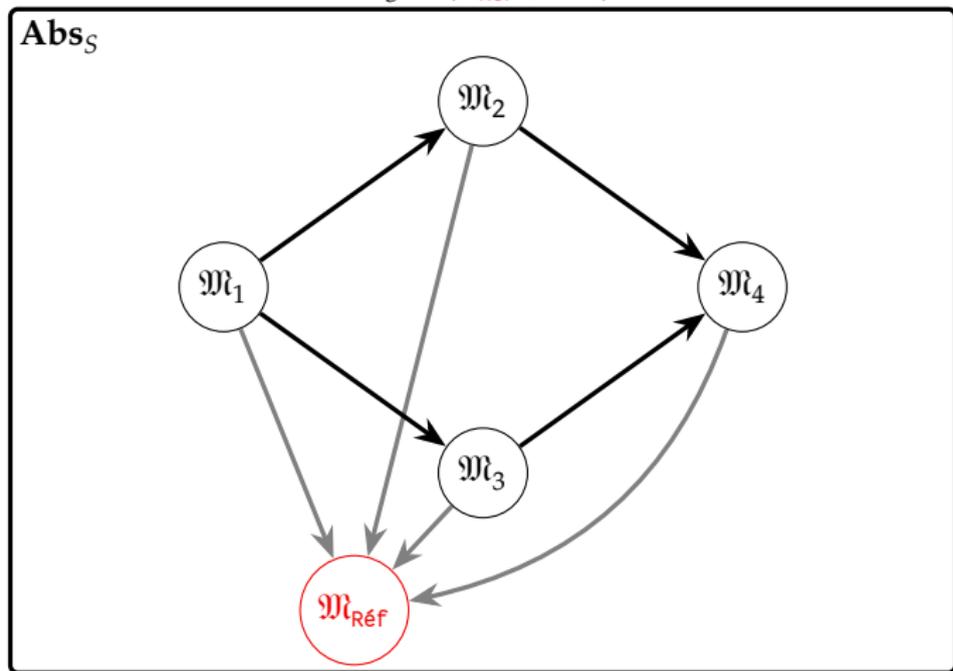
Catégorie des modèles

$$\text{Abs}_S = (E_{\text{Réf}} \downarrow \text{Set})^{\text{op}}$$



Catégorie des modèles

$$\text{Abs}_S = (E_{\text{Réf}} \downarrow \text{Set})^{\text{op}}$$



Conclusion et perspectives

► Contributions

1. Cadre unifié pour approcher la modélisation multi-niveau
2. Identification de formalisme, modèle, système
3. Introduction de \mathbf{Abs}_S

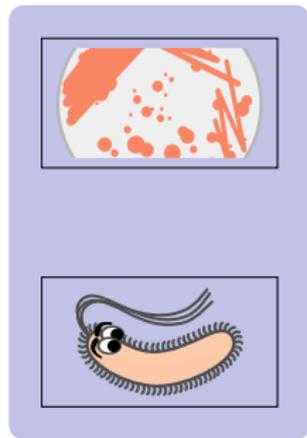
► Perspectives

1. Étude de la catégorie \mathbf{Abs}_S
2. Intégrer les niveaux de description

1. Vers la modélisation multi-niveau

2. Topologie de l'activité

3. Simulateur de colonie de bactéries



Activité spatiale d'un feu de forêt

Définition

*[...] activity is considered as a **measure of the number of events occurring during in a simulation.***

Muzy et al. : "Activity Regions for the Specification of Discrete Event Systems", 2010



National Park Service, Alaska Region - Carrant Creek Fire, Lake Clark NP, 6-26, NPS PhotoUploaded by AlbertHerring, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29598171>

- ▶ **Système:** Feu de forêt
- ▶ **Formalisme:** MGS
- ▶ **Modèles:**
 1. un automate à 3 états
 2. [Karafyllidis et Thanailakis, 1997]

- ▶ **Observation :**
 - ▶ cendres (à gauche)
 - ▶ feu (au milieu)
 - ▶ forêt (à droite)

Activité spatiale d'un feu de forêt

Définition

*[...] activity is considered as a **measure of the number of events occurring during in a simulation.***

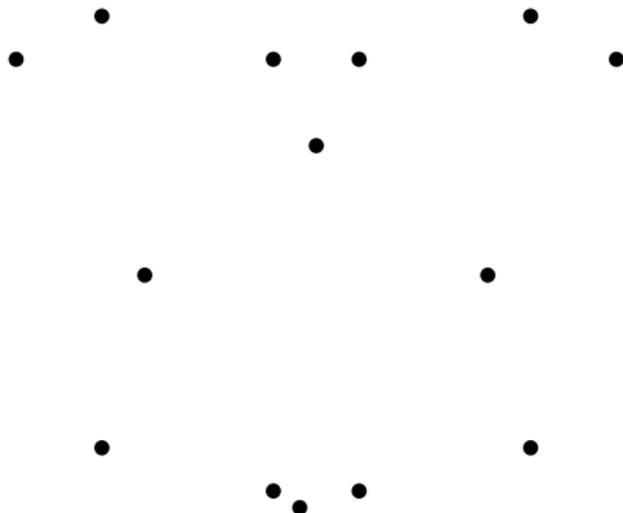
Muzy et al. : "Activity Regions for the Specification of Discrete Event Systems", 2010



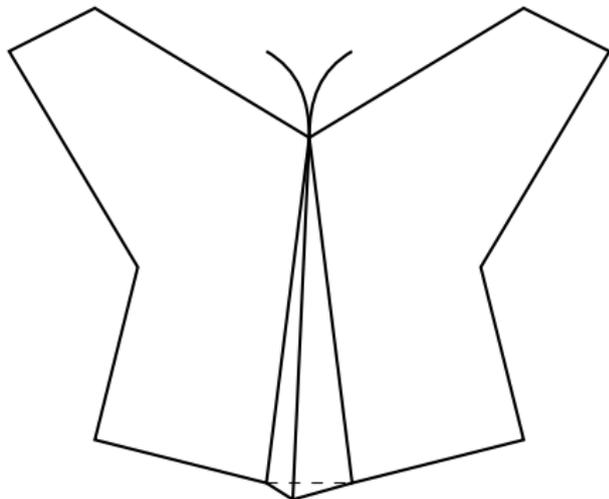
National Park Service, Alaska Region - Carrant Creek Fire, Lake Clark NP, 6-26, NPS PhotoUploaded by AlbertHerring, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29598171>

- ▶ **Système:** Feu de forêt
- ▶ **Formalisme:** MGS
- ▶ **Modèles:**
 1. un automate à 3 états
 2. [Karafyllidis et Thanailakis, 1997]
- ▶ **Observation :**
 - ▶ cendres (à gauche)
 - ▶ feu (au milieu)
 - ▶ forêt (à droite)

- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ **0-cellule**, 1-cellule, 2-cellule, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, **1-cellule**, 2-cellule, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



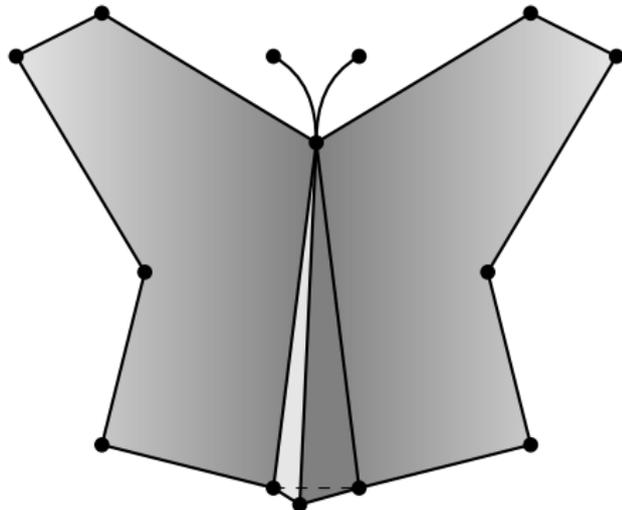
- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, 1-cellule, **2-cellule**, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



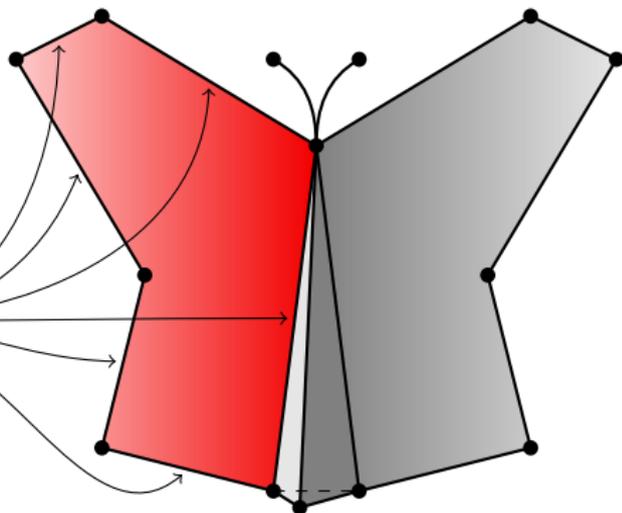
- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, 1-cellule, 2-cellule, **3-cellule**, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



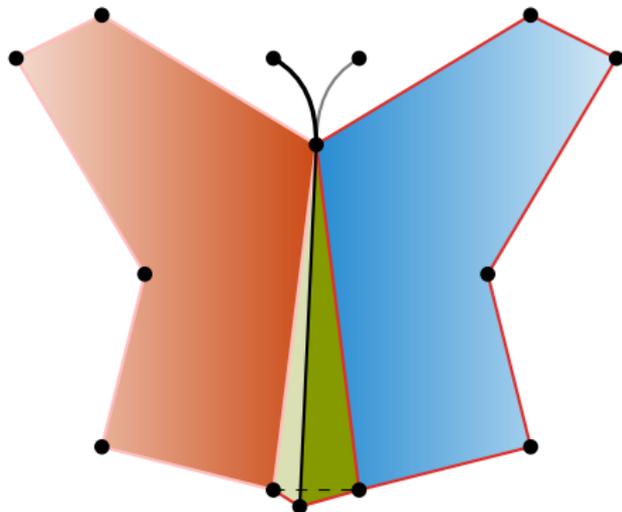
- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, 1-cellule, 2-cellule, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, 1-cellule, 2-cellule, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



- ▶ Une collection de **cellules topologiques**
 - ▶ 0-cellule, 1-cellule, 2-cellule, 3-cellule, etc.
- ▶ Liées par une **relation d'incidence**
 - ▶ $\text{face}(s_1) = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$
- ▶ Les cellules sont **étiquetées** avec des valeurs arbitraires



Formalisme MGS

- ▶ Fonctions définies **par cas** sur les collections
chaque cas détermine une **sous-collection**
- ▶ Relation de réécriture : **réécriture topologique**

```
trans evol = {  
  pattern_1 => expression_1  
  ...  
  pattern_n => expression_n  
}
```

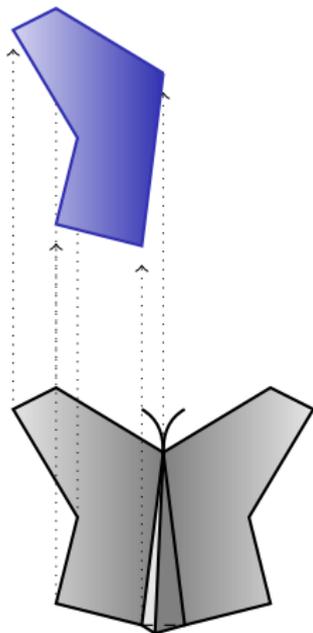
```
trans evol = {  
  pattern_1 => expression_1  
  ...  
  pattern_n => expression_n  
}
```



Collection topologique



Collection topologique

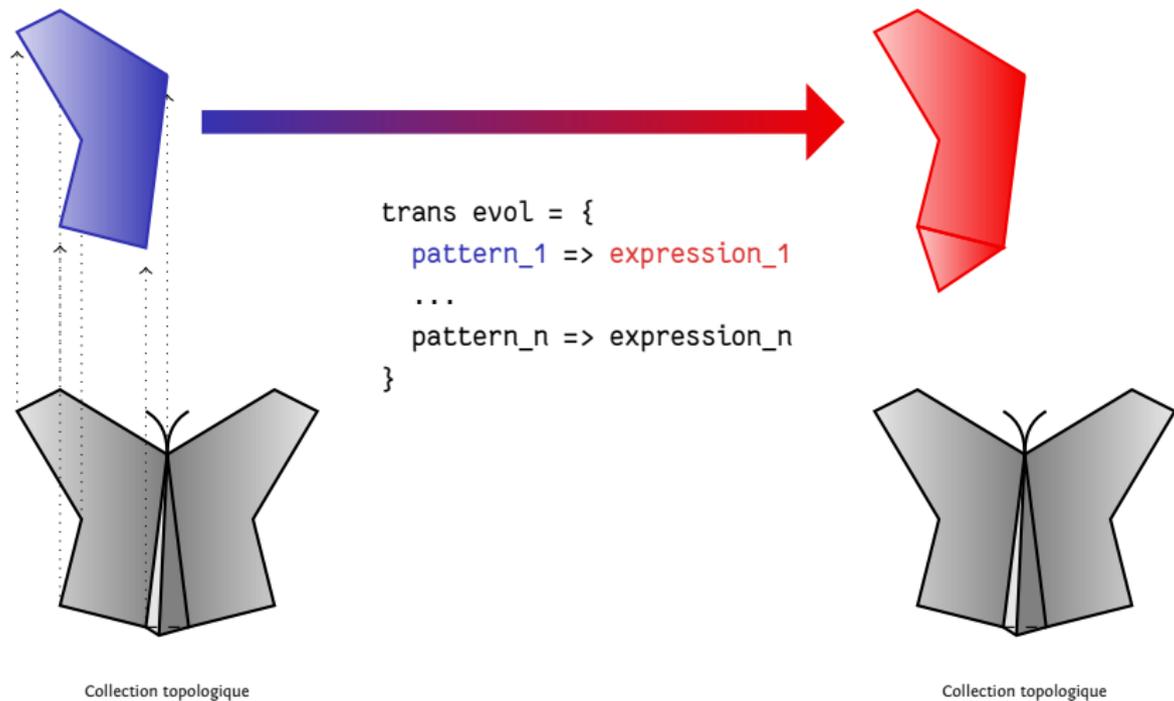


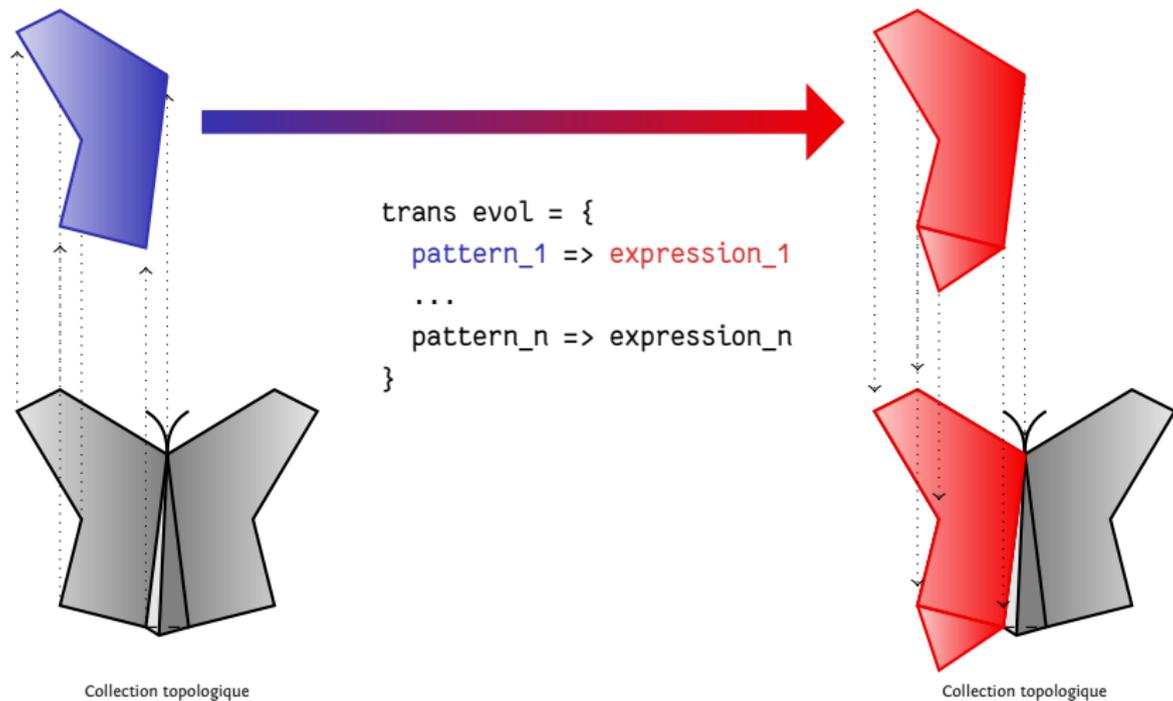
Collection topologique

```
trans evol = {  
  pattern_1 => expression_1  
  ...  
  pattern_n => expression_n  
}
```



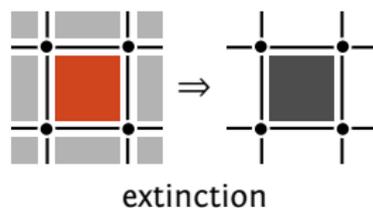
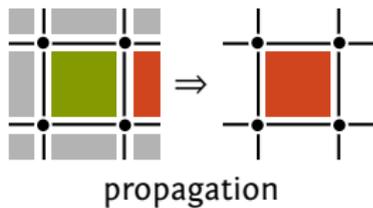
Collection topologique





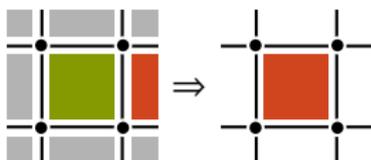
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque

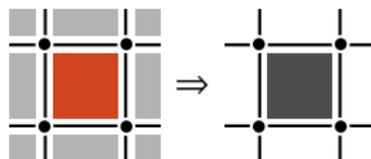


Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque

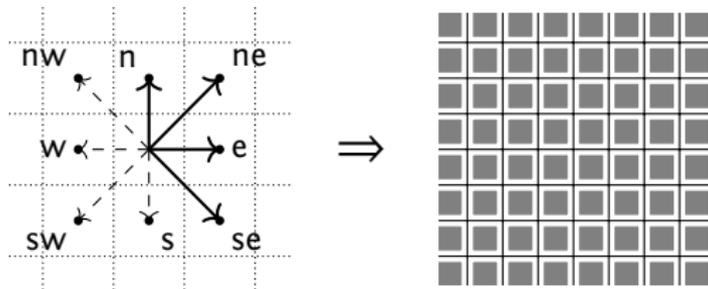


propagation



extinction

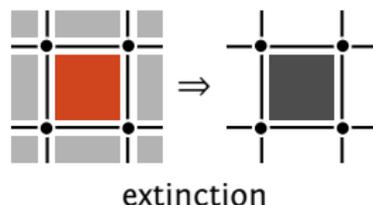
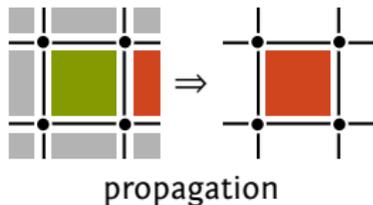
► Topologie des interactions



Deux cellules **sont voisines** si le feu peut se propager de l'une à l'autre

Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



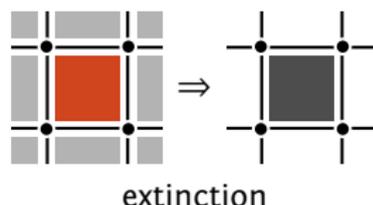
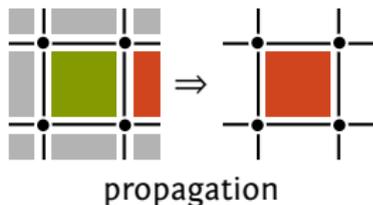
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```

$$C^{i+1} = T(C^i)$$

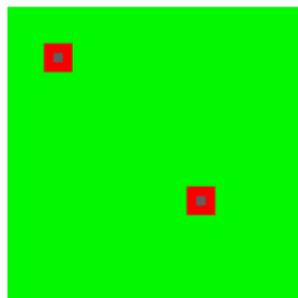
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



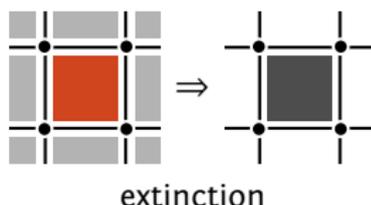
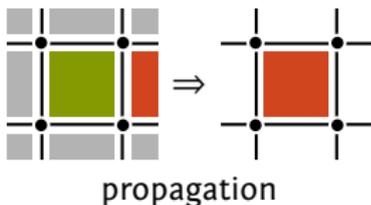
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



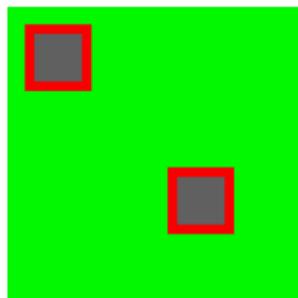
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



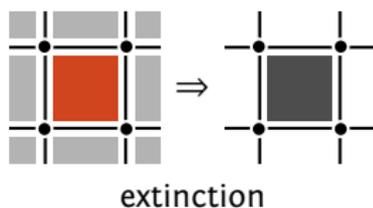
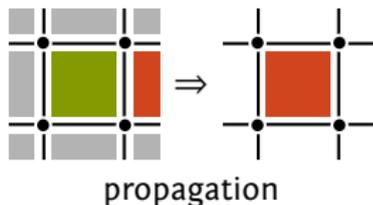
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



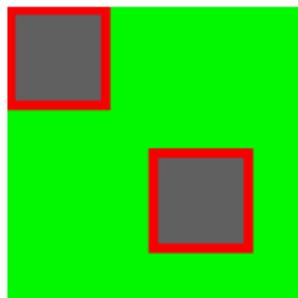
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



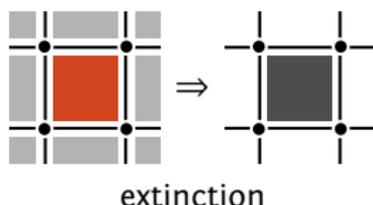
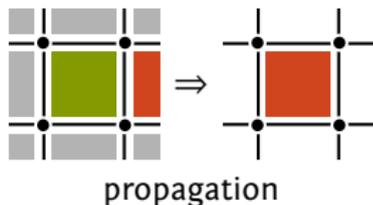
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



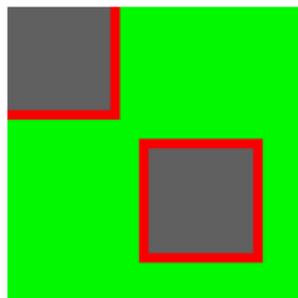
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



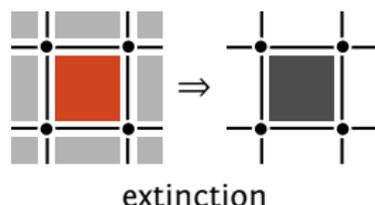
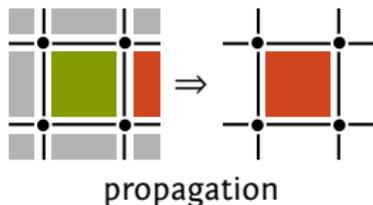
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



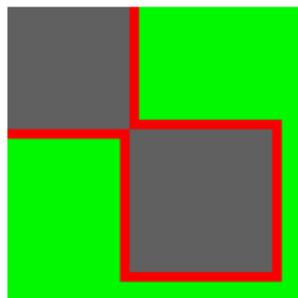
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



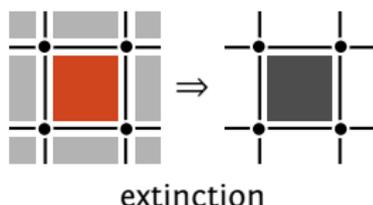
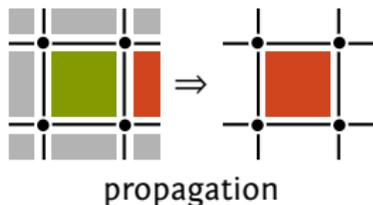
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



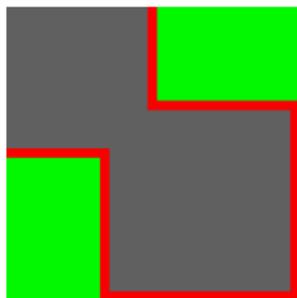
Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque



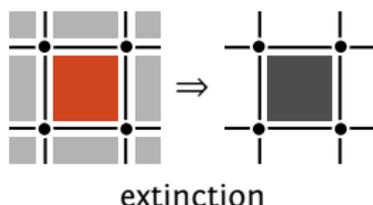
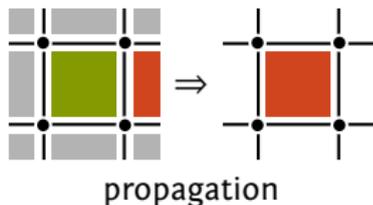
- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```



Modèle 1 : un automate à 3 états

- forêt
- feu
- cendre
- quelconque

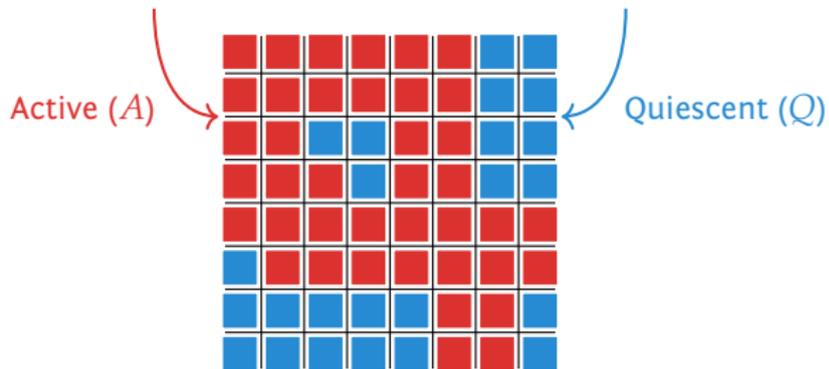
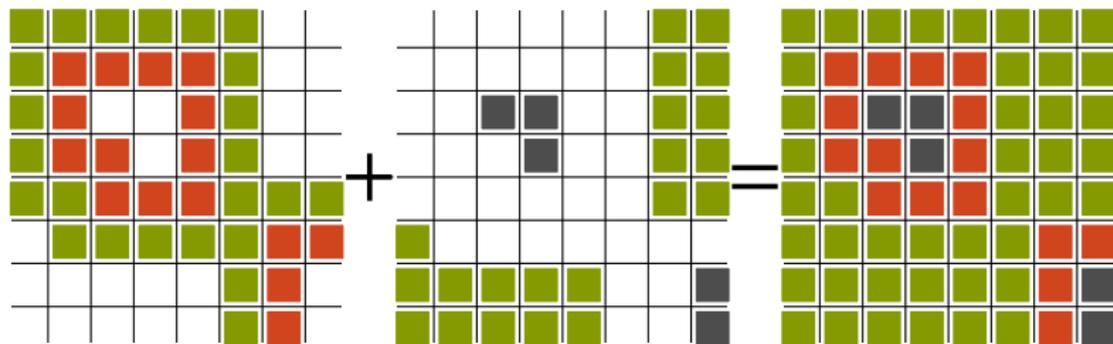


- ▶ Topologie des interactions
- ▶ Lois d'évolution

```
trans T = {  
  'Forest / neighboursMember('Fire) => 'Fire;  
  'Fire => 'Ash;  
}
```

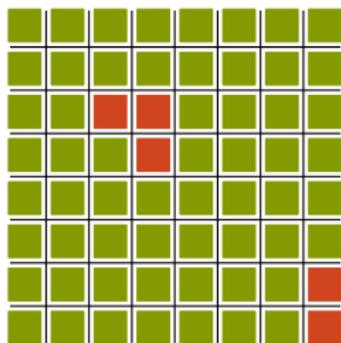


Localiser l'activité

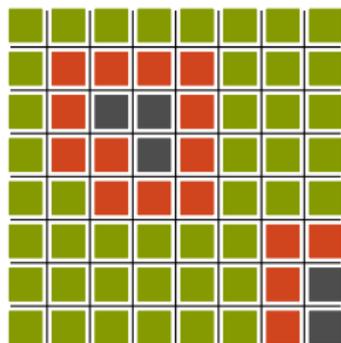


Simulations MGS et sous-collection active

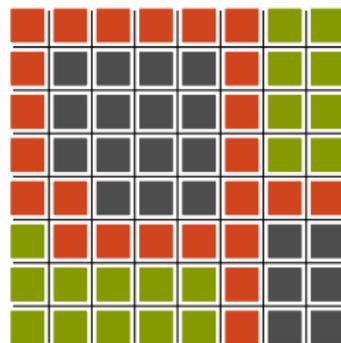
▶ Trajectoires dans MGS



C^0



$C^1 = T(C^0)$



$C^2 = T(C^1) = T^2(C^0)$

▶ Décomposition de l'activité et trajectoires

- ▶ Sous-collection active A_i et sous-collection quiescente Q_i
- ▶ Décomposition de la relation d'évolution

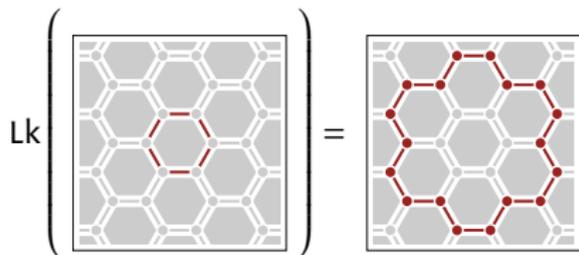
$$A^{i+1} + Q^{i+1} = T(A^i + Q^i)$$

Relation entre A^{i+1}, Q^{i+1} et A^i, Q^i

$$A^{i+1} + Q^{i+1} = T(A^i + Q^i)$$

► Sous-collection **frontière** F^i

1. **Propriété** $T(A^i + Q^i) = T(A^i \mid Q^i) + Q^i$
2. **Propriété** $|A^{i+1}| \subseteq |A^i + F^i|$
3. **Propriété** $|Q^i - F^i| \subseteq |Q^{i+1}|$
4. **Définition** $F^i = \text{Lk}(A^i)$
5. **Remarque** $T(A^i \mid Q^i) = T(A^i \mid F^i)$
6. **Résultat** $C^{i+1} = T(A^i \mid F^i) + F^i + (Q^i - F^i)$

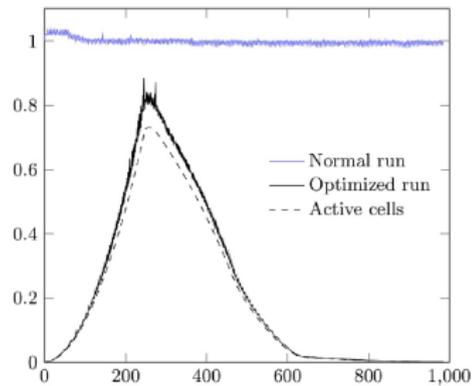
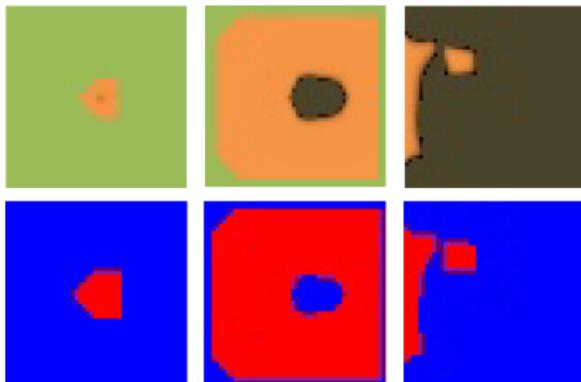
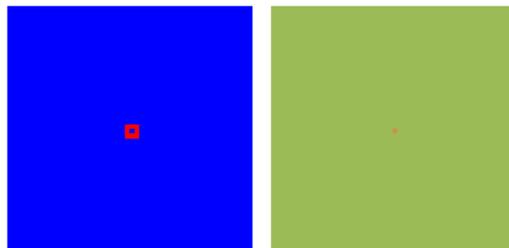


$$\begin{cases} A^0 = \text{PatMatch}_T(C^0) \\ A^{i+1} = \text{PatMatch}_T[T(A^i \mid \text{Lk}(A^i)) + \text{Lk}(A^i)] \end{cases}$$

Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

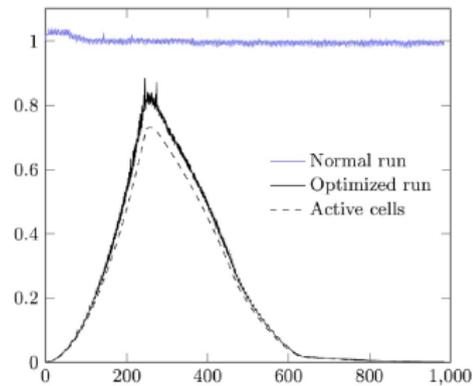
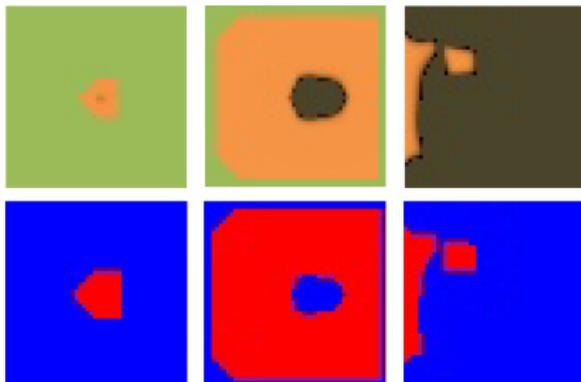
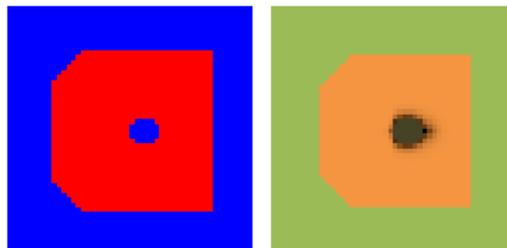
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

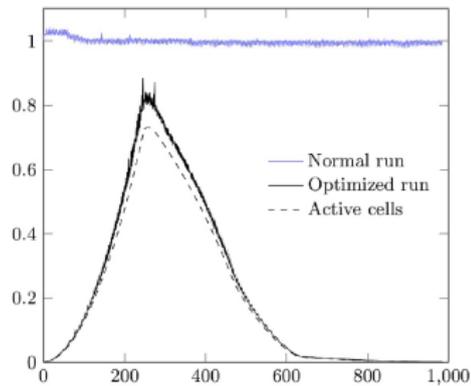
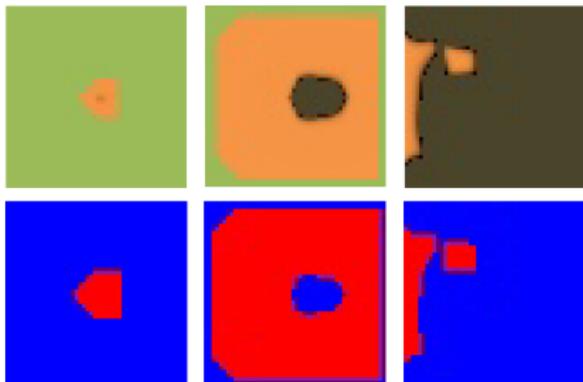
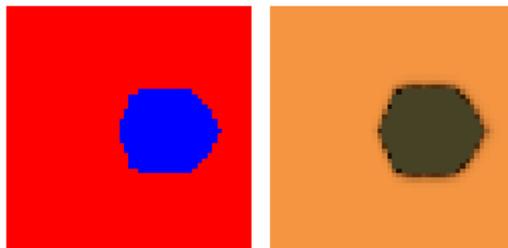
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

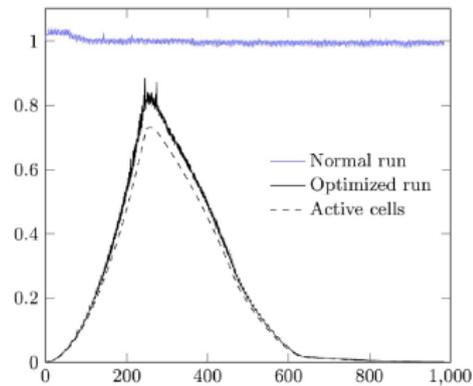
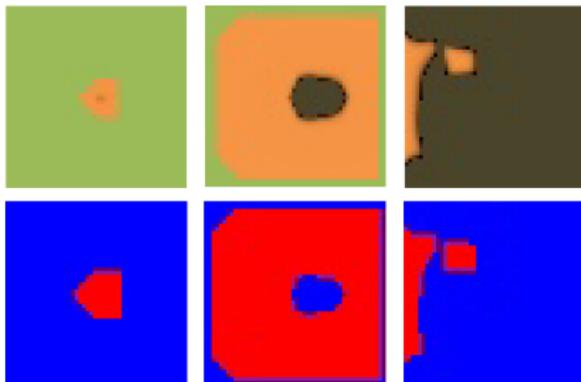
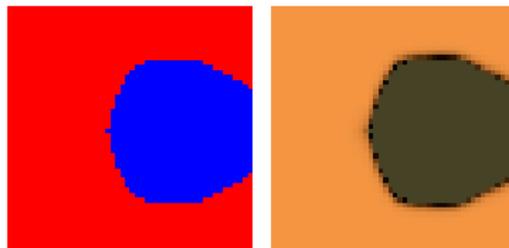
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

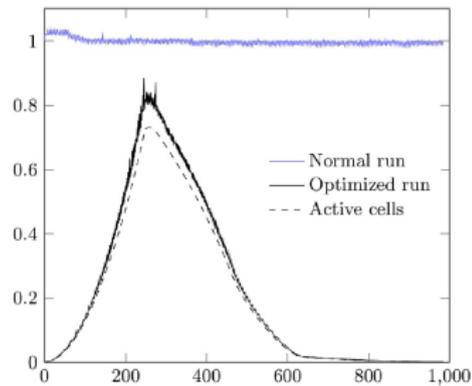
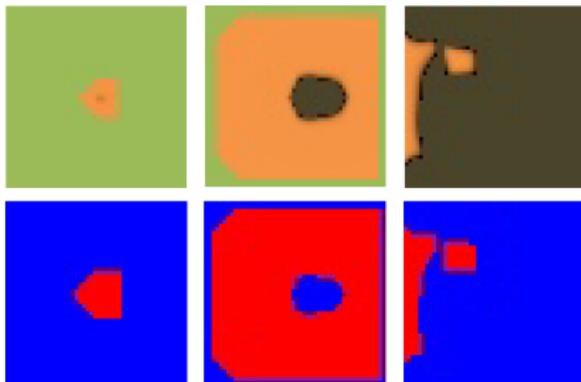
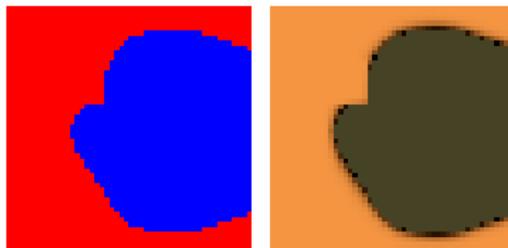
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

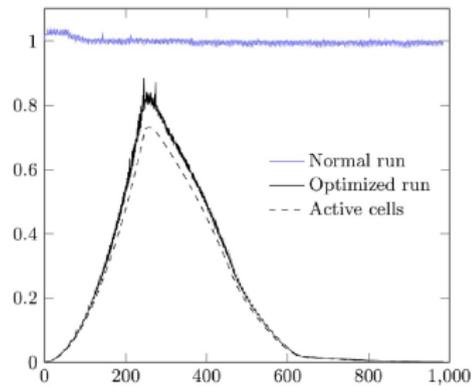
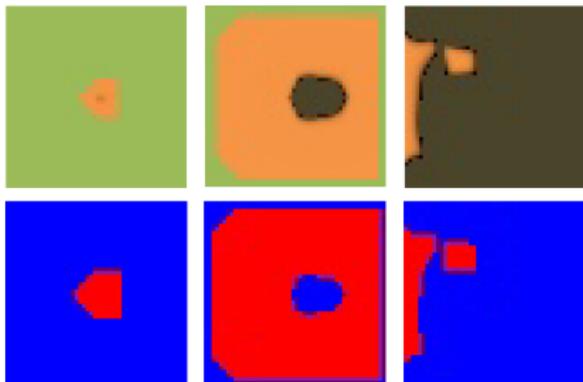
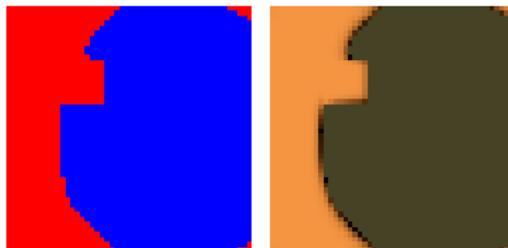
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

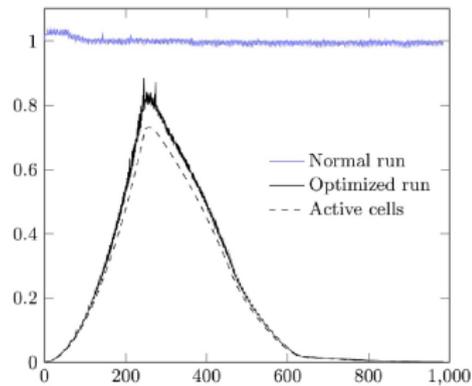
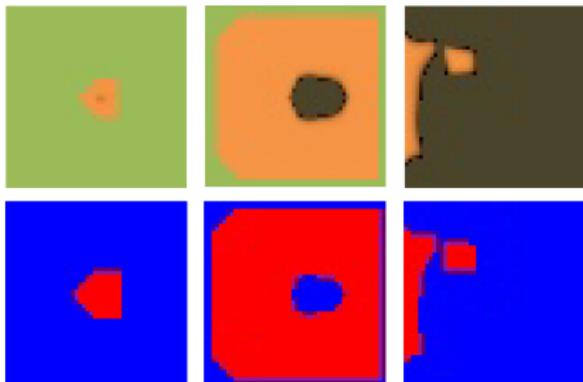
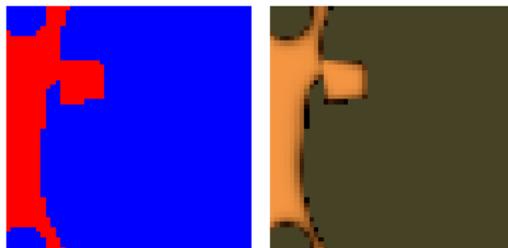
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

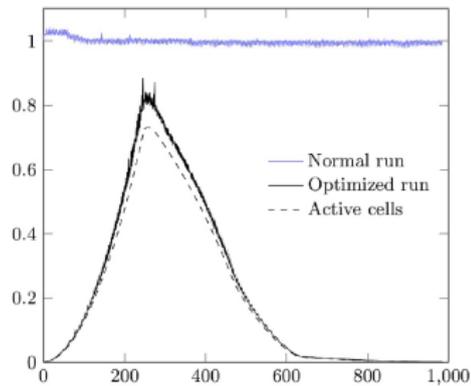
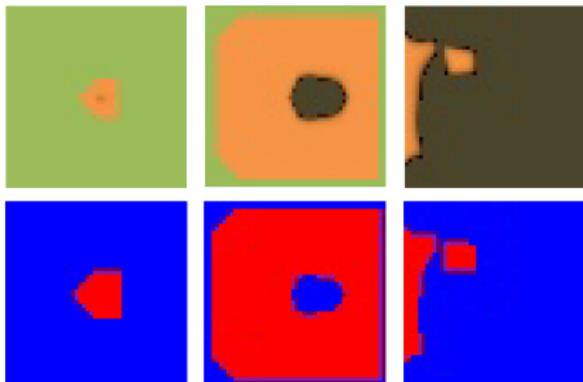
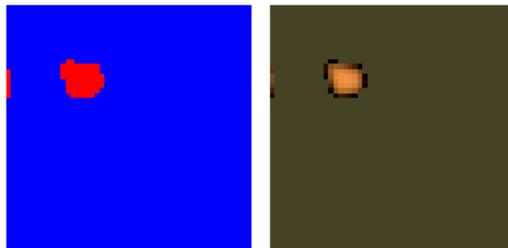
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

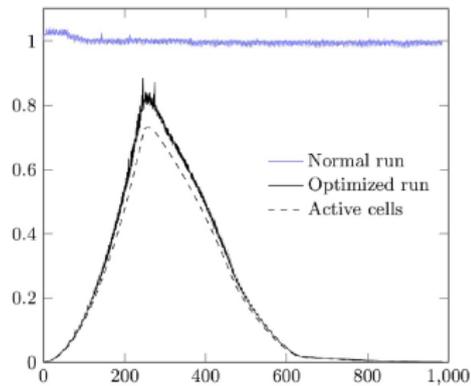
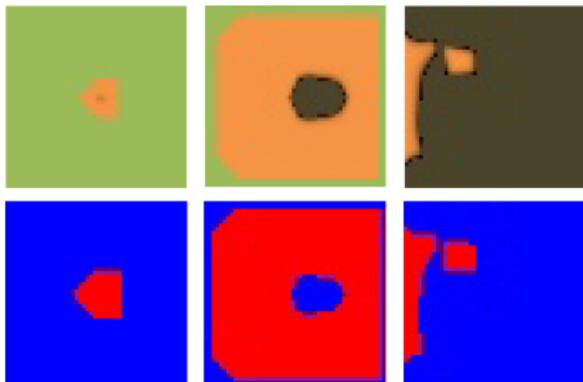
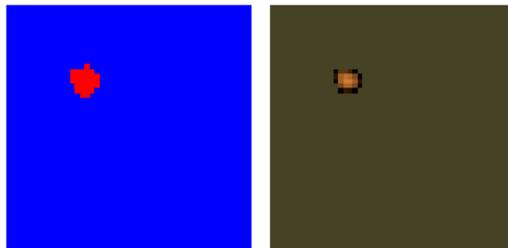
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

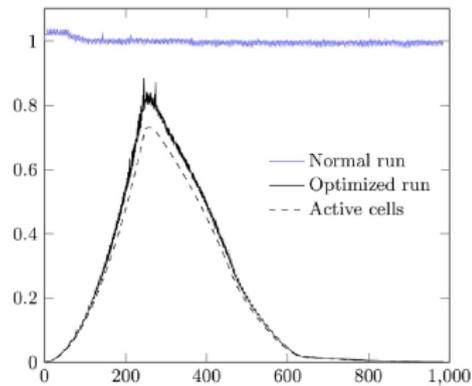
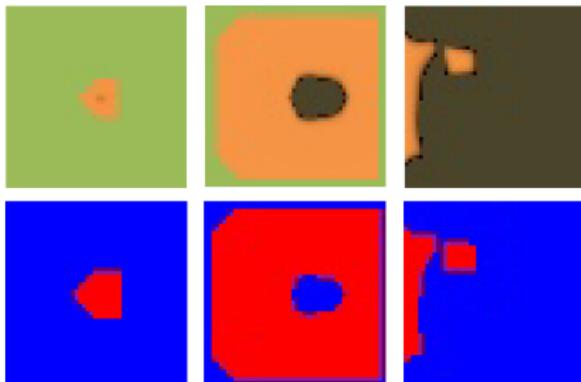
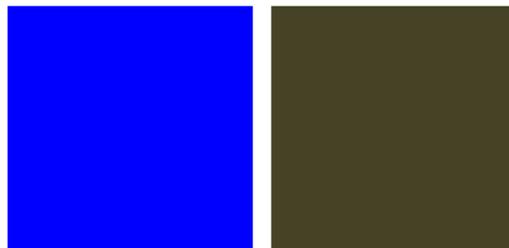
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (feu de forêt)

Exemple : application au feu de forêt

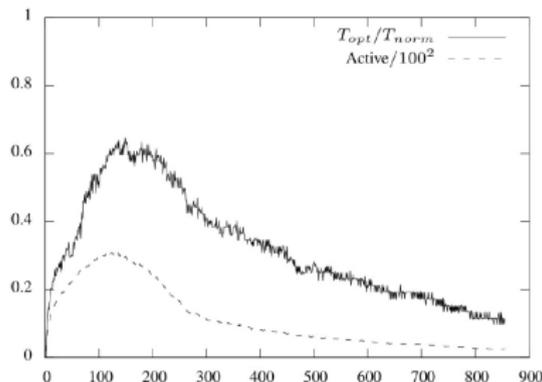
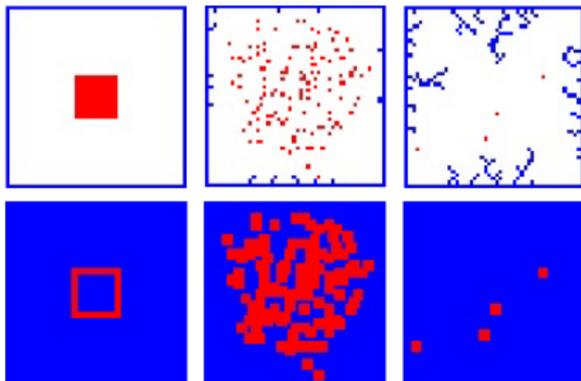
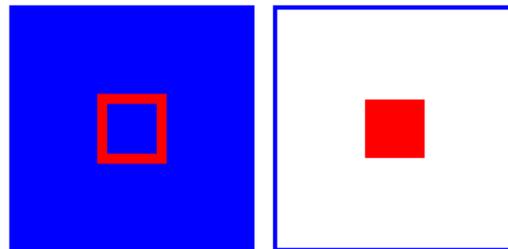
- ▶ Mise en évidence du **front de propagation**
- ▶ Speedup **important** (linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par agrégation

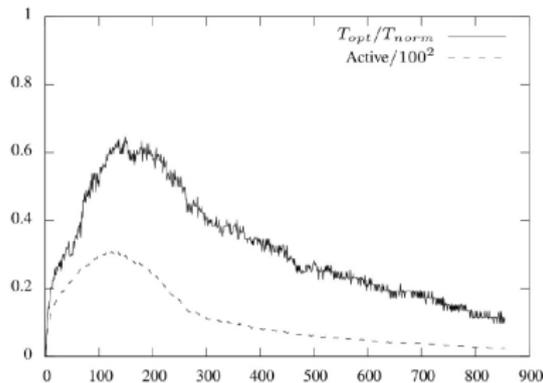
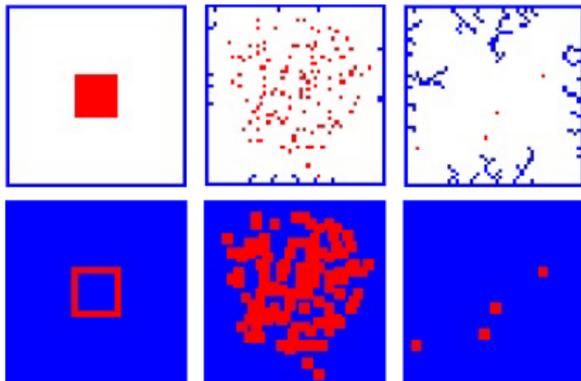
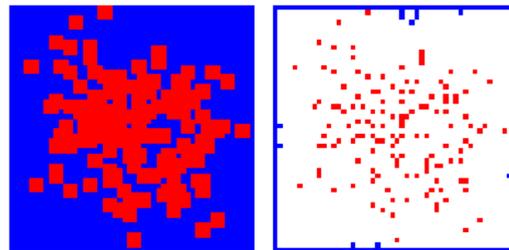
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

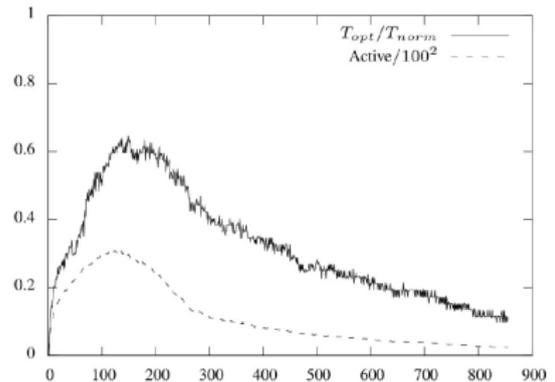
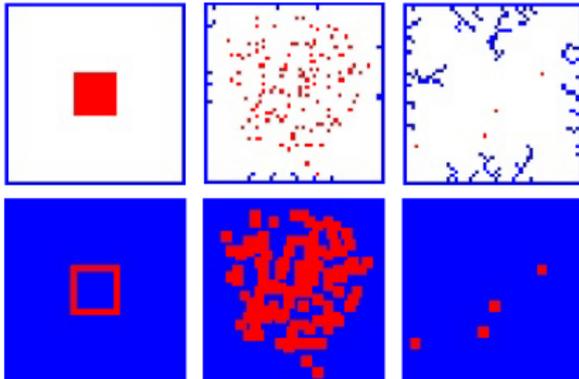
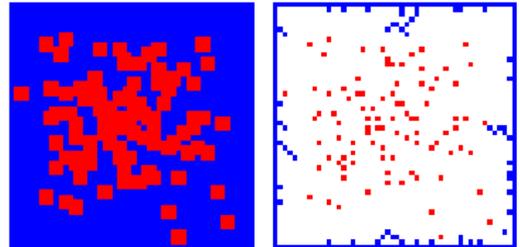
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

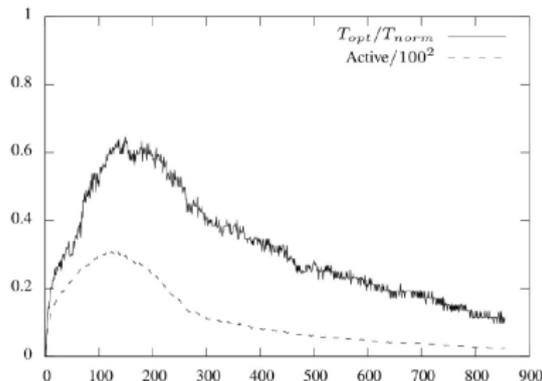
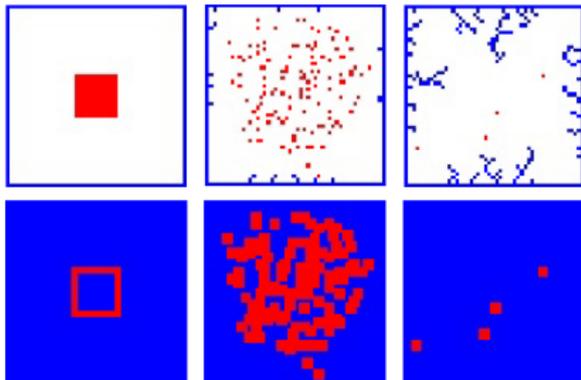
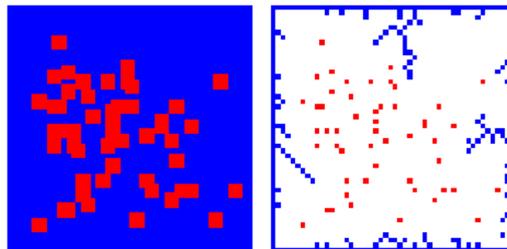
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par agrégation

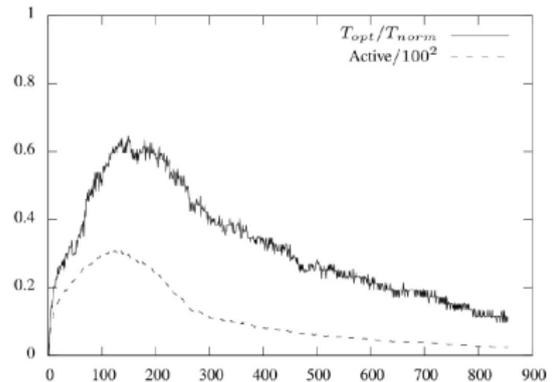
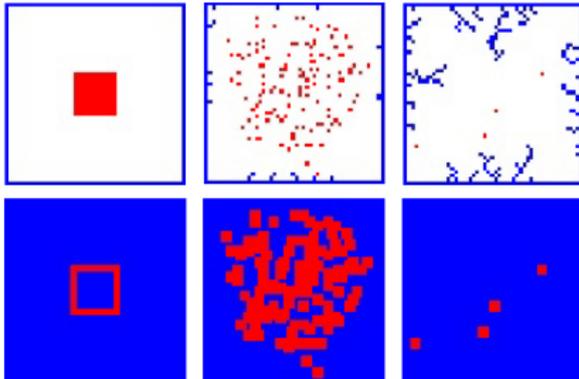
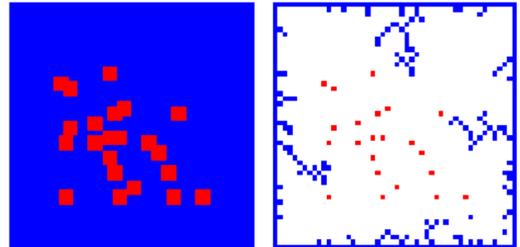
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

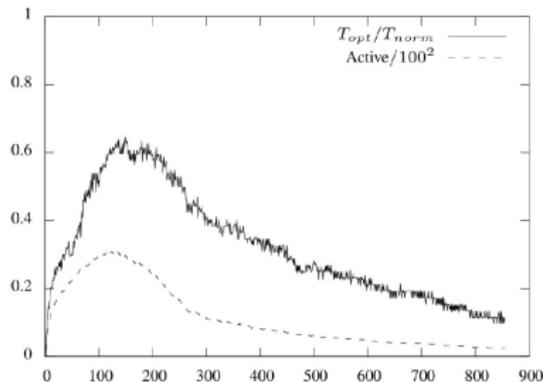
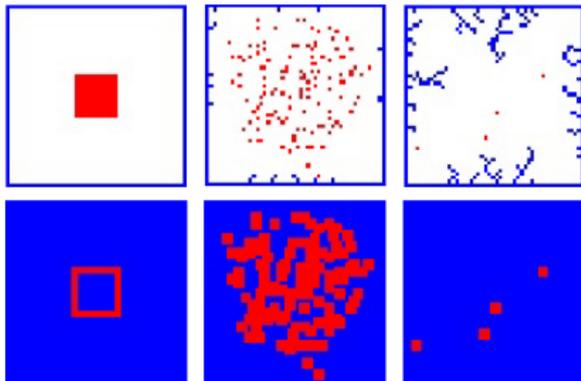
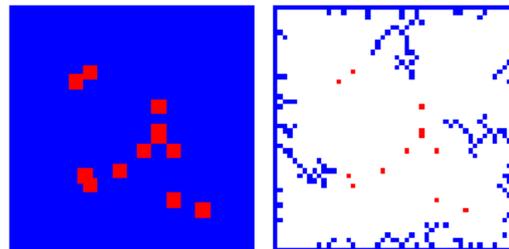
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

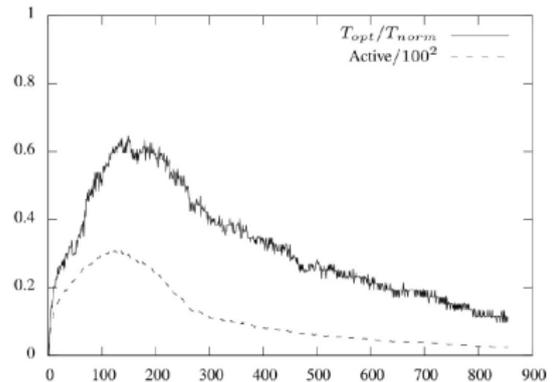
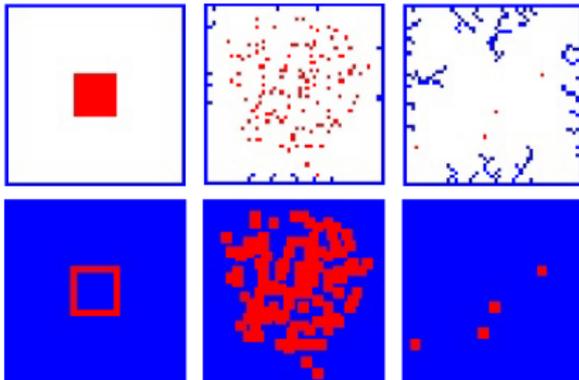
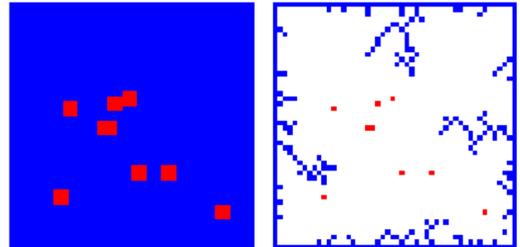
- ▶ Mise en évidence de la **population des cellules mobiles**
- ▶ Speedup **moins important** (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

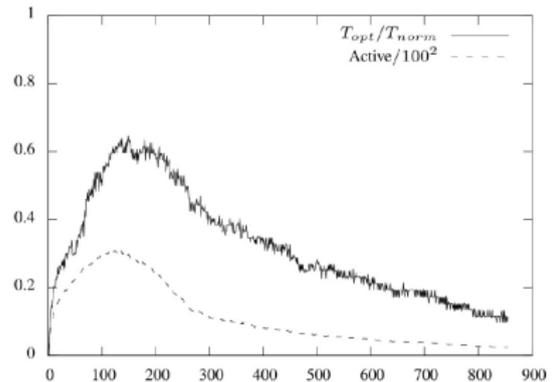
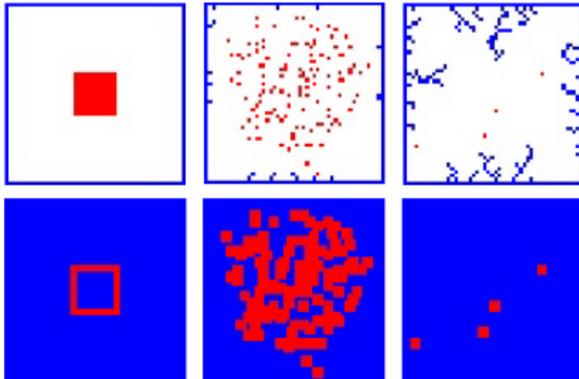
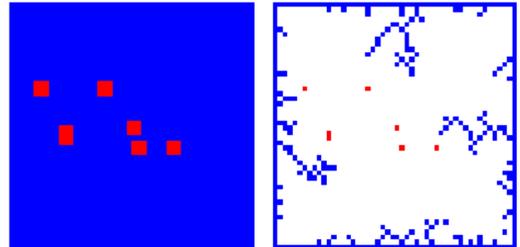
- ▶ Mise en évidence de la **population des cellules mobiles**
- ▶ Speedup **moins important** (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par agrégation

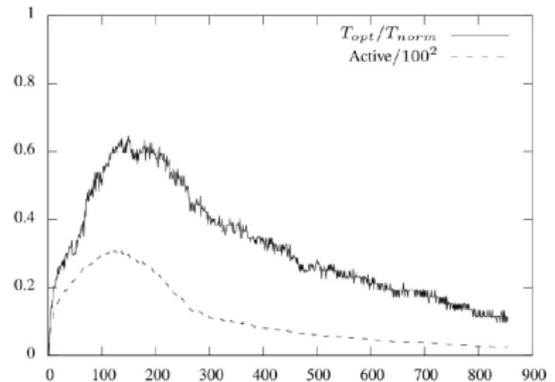
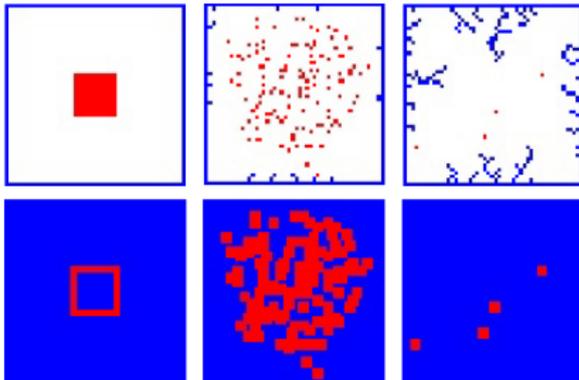
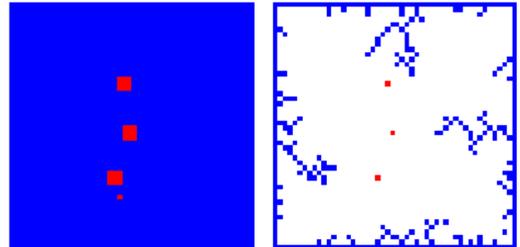
- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par aggrégation

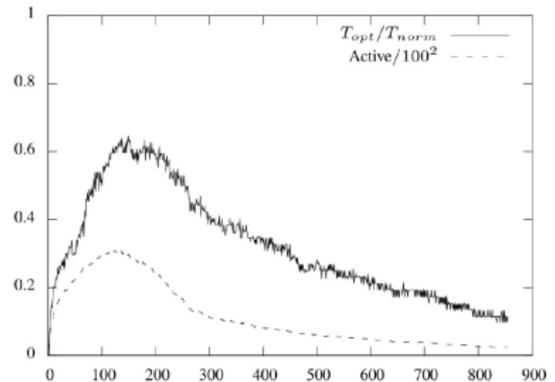
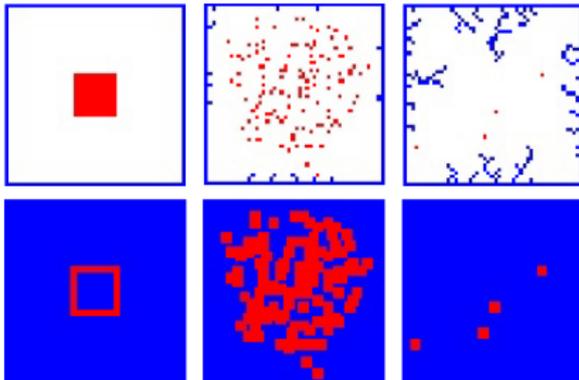
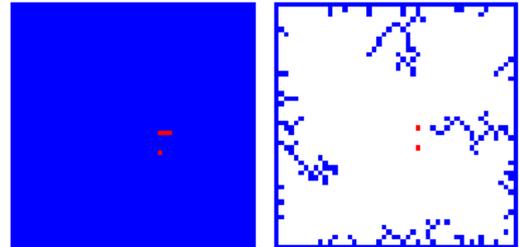
- ▶ Mise en évidence de la **population des cellules mobiles**
- ▶ Speedup **moins important** (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



Résultats préliminaires (DLA)

Exemple : diffusion limitée par agrégation

- ▶ Mise en évidence de la population des cellules mobiles
- ▶ Speedup moins important (bien que toujours linéaire en la quantité de cellules actives)



► Conclusion

1. Spatialisation de l'activité à partir des interactions
2. Caractérisation topologique de la progression de l'activité
3. Algorithme générique de suivi du front d'activité
4. Optimisation fondée sur l'activité

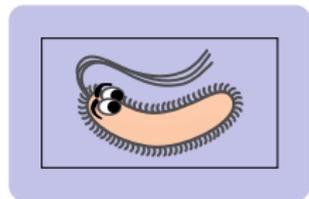
► Perspectives

1. Ajouter le support de l'activité à MGS
2. Raffiner la zone active en sous-régions
3. Réifier le bord de la zone active
4. Décrire un modèle multi-niveau de la propagation du feu de forêt

1. Vers la modélisation multi-niveau

2. Topologie de l'activité

3. Simulateur de colonie de bactéries



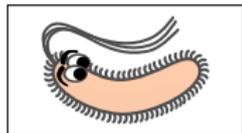
► Motivations

- Assister le travail du programmeur (L1, L2)
- Observer la morphogenèse à partir de la spécification d'un comportement local



► Objectifs

- Simulation raisonnable de grandes populations (10^5 individus)
- Simulation réaliste

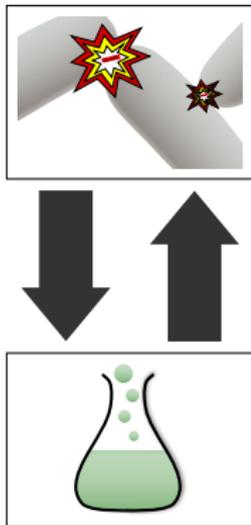


► Utilisation du parallélisme

- Nécessaire pour accélérer les calculs
- Largement disponible (Multi-cœur, GPU)



- ▶ **Moteur chimique**
comportement du support sur lequel évoluent les bactéries
- ▶ **Moteur physique**
comportement mécanique des bactéries
- ▶ **Moteur comportemental**
couplage entre morphogènes et bactéries



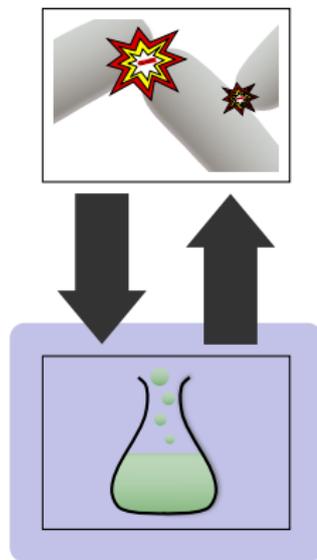
► Modèle

- Réaction-Diffusion-Évaporation à la Turing
- EDP couplées

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial t} = \vec{\chi}(\vec{\varphi}) + \vec{D} \cdot \nabla^2 \vec{\varphi} - \vec{E} \cdot \vec{\varphi}$$

► Simulation

- Discrétisation de type différences finies sur un automate cellulaire 2D
- Algorithme Propagation Parallèle à la Margolus (PPM)
 - Simuler un automate cellulaire sur un support SIMD
 - Faire correspondre la segmentation de l'espace aux processus
 - Éviter les accès concurrents à la même zone mémoire



Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées

	$v_{B,2}$	$v_{B,1}$	$v_{A,3}$	$v_{A,2}$
	$v_{B,3}$	B	A	$v_{A,1}$
	$v_{C,1}$	C	D	$v_{D,3}$
	$v_{C,2}$	$v_{C,3}$	$v_{D,1}$	$v_{D,2}$

- ▶ Simulation

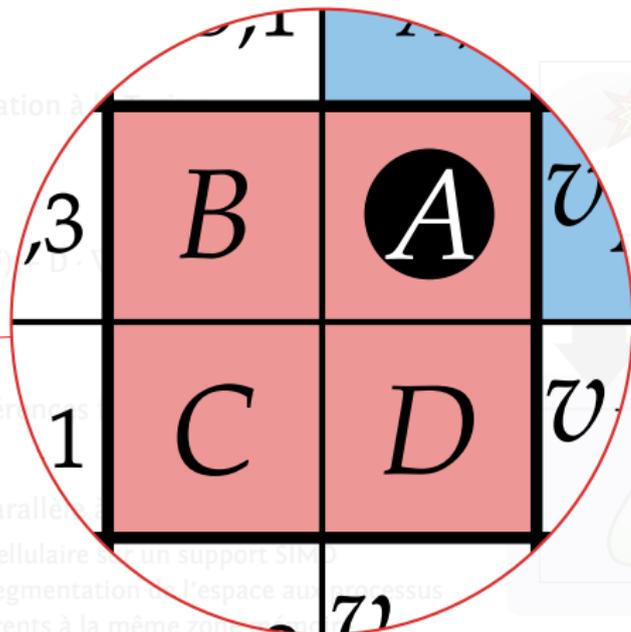
- ▶ Méthode aux différences

- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire sur un support SIMD

- ▶ Faire correspondre la segmentation de l'espace aux processus

- ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone



Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées

$v_{B,2}$	$v_{B,1}$	$v_{A,3}$	$v_{A,2}$	
$v_{B,3}$	B	A	$v_{A,1}$	
$v_{C,1}$	C	D	$v_{D,3}$	
$v_{C,2}$	$v_{C,3}$	$v_{D,1}$	$v_{D,2}$	

- ▶ Simulation

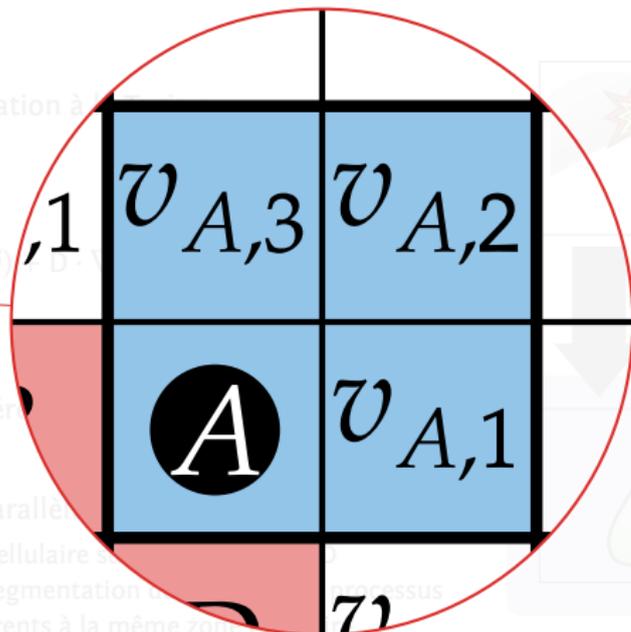
- ▶ Type différent

- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire

- ▶ Faire correspondre la segmentation

- ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone

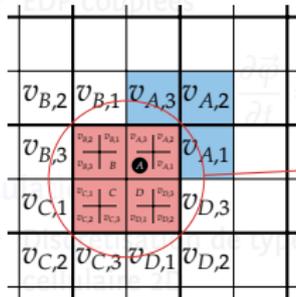


Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées



- ▶ Simulation

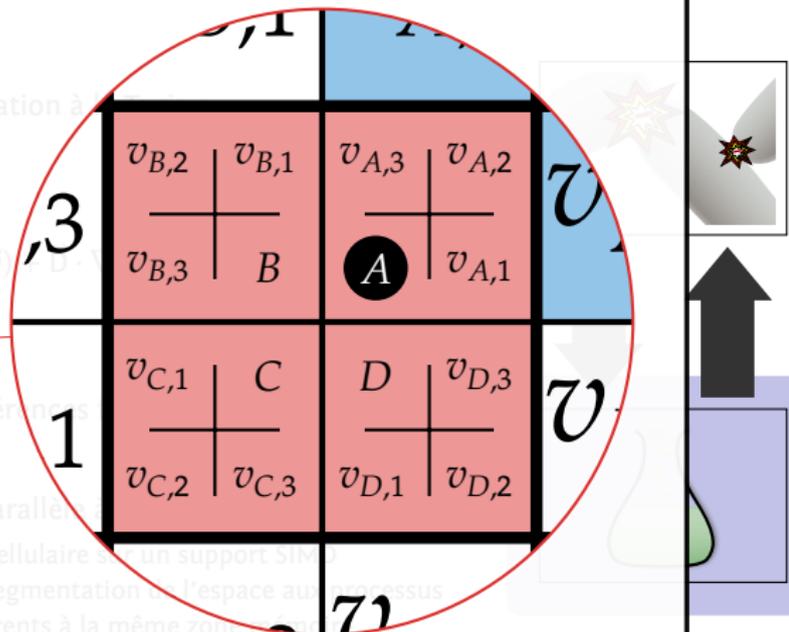
- ▶ Type différentiel

- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire sur un support SIMD

- ▶ Faire correspondre la segmentation de l'espace aux processus

- ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone

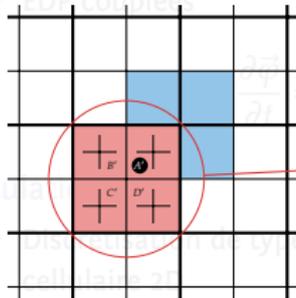


Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées



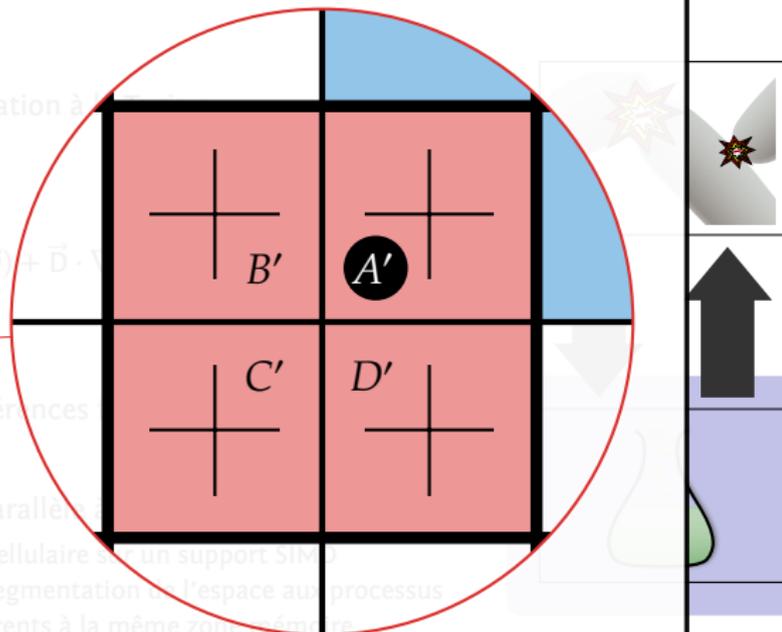
- ▶ Simulation

- ▶ Méthode aux différences

- cellulaires 2D

- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire sur un support SIMD
 - ▶ Faire correspondre la segmentation de l'espace aux processus
 - ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone mémoire

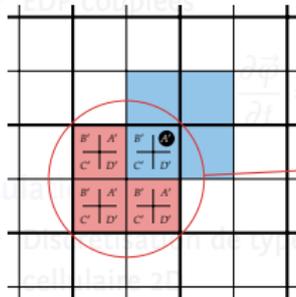


Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées



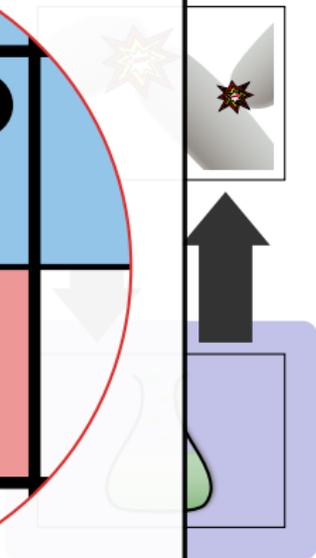
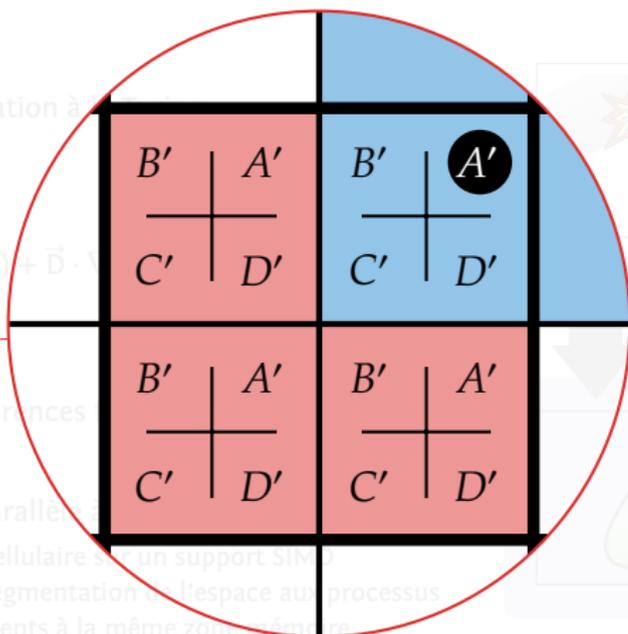
- ▶ Simulation

- ▶ Méthode aux différences

- cellulaires 2D

- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire sur un support SIMD
 - ▶ Faire correspondre la segmentation de l'espace aux processus
 - ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone mémoire

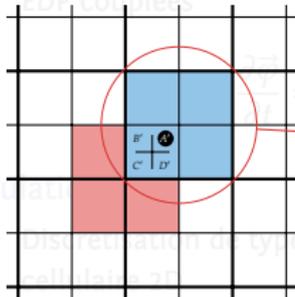


Moteur chimique

- ▶ Modèle

- ▶ Réaction-Diffusion-Évaporation à

- ▶ EDP couplées

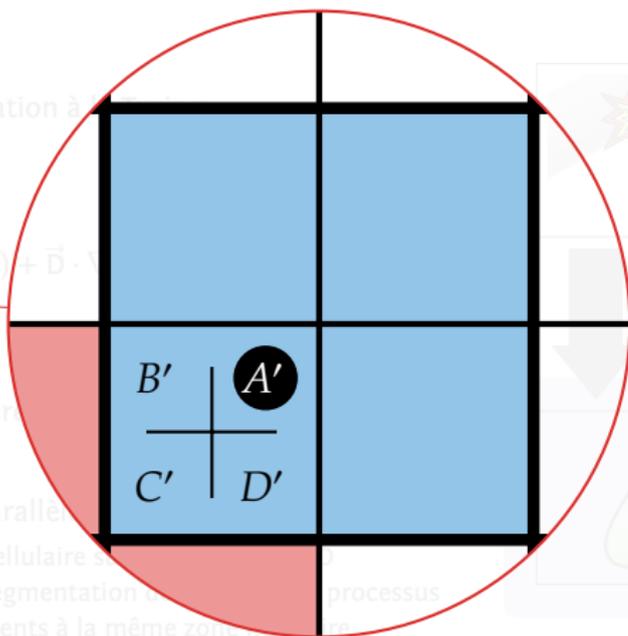


- ▶ Simulation

- ▶ Discrétisation de type différentiel
 - ▶ cellulaire (2D)

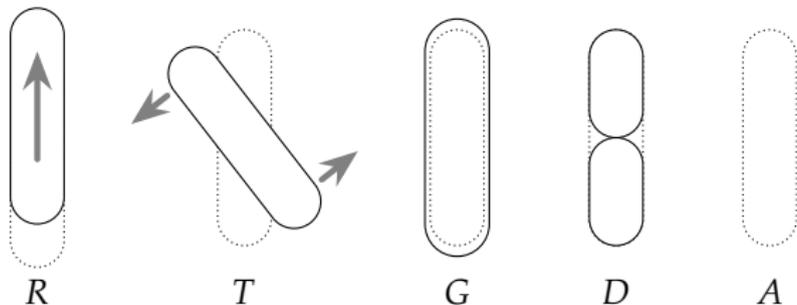
- ▶ Algorithme Propagation Parallèle

- ▶ Simuler un automate cellulaire
 - ▶ Faire correspondre la segmentation et les processus
 - ▶ Éviter les accès concurrents à la même zone



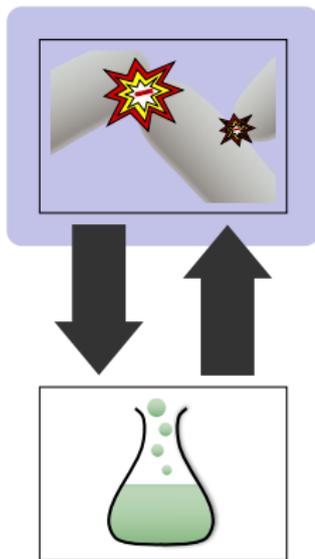
Moteur physique : spécification

► Dynamique individuelle:



► Dynamique collective:

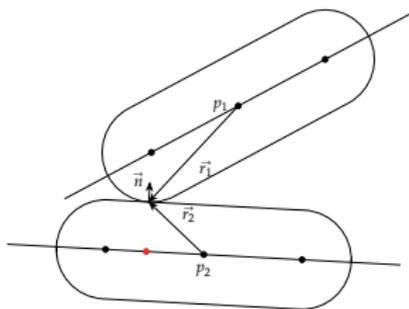
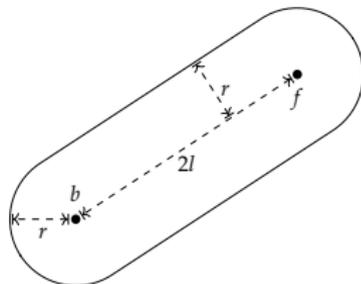
- Entrer en collision avec ses voisins
- Inhiber sa croissance (densité des bactéries)



Moteur physique : modèle

► Bactérie virtuelle

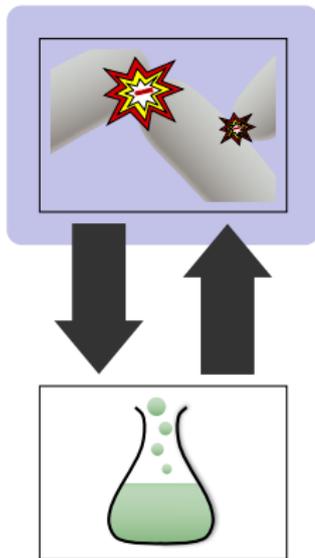
- Centre de masse, angle, longueur (l), rayon (r)
- Inertie (I), masse (m)
- Vitesse linéaire, vitesse angulaire, vitesse de croissance
- Âge de la membrane [Stewart 2005]



► Collision

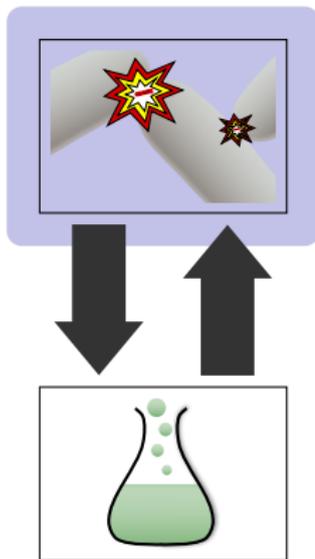
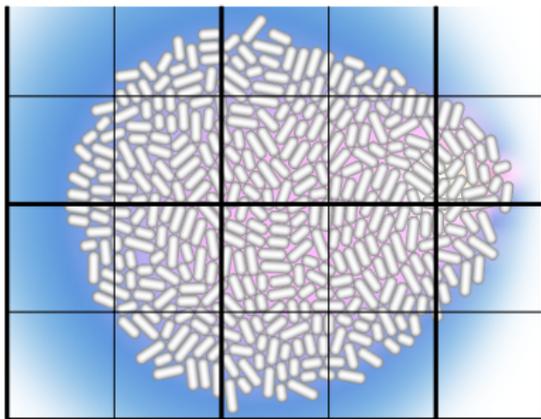
- Conservation des moments
- Conservation des quantités de mouvement
- Théorie de l'impulsion

$$j = \frac{-(1 + Cr) \vec{v}_{ac12} \cdot \vec{n}}{1/m_1 + 1/m_2 + (\vec{r}_1 \wedge \vec{n})^2/I_1 + (\vec{r}_2 \wedge \vec{n})^2/I_2}$$



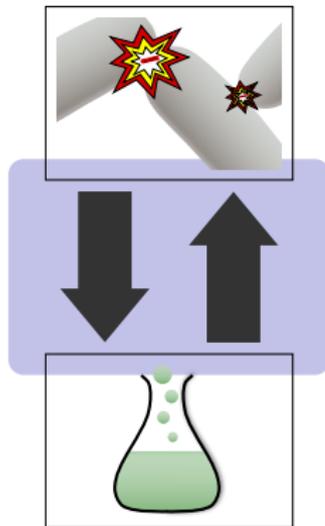
Moteur physique : réalisation

- ▶ Implémentation sur automate cellulaire 2D du modèle agent
- ▶ Utilisation de PPM
 - ▶ N bactéries par cellule
 - ▶ Traitement par bloc de 2×2
 - ▶ Tri des bactéries « voyageuses »

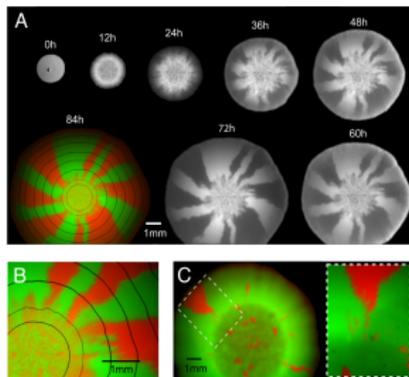


Moteur comportemental

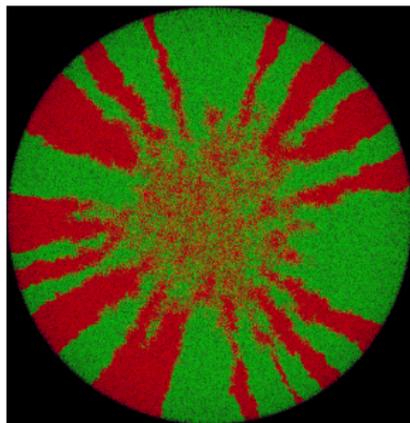
- ▶ **Couplage** entre le moteur chimique et le moteur physique
 - ▶ Déclencher des actions individuelles (R, T, G, D, A)
 - ▶ Consommer (C) ou synthétiser (S) des morphogènes
- ▶ **Exemples**
 1. Sectorisation
 2. Cercles concentriques



Exemple 1 : Sectorisation



O. Hallatschek et al : "Genetic drift at expanding frontiers promotes gene segregation", 2007



► Démarche expérimentale

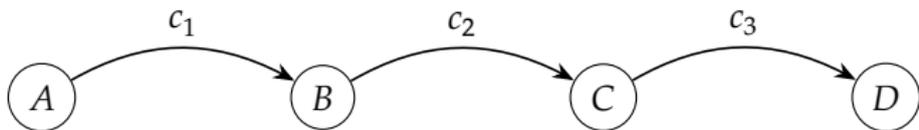
1. Croissance 1 → 1000
2. Marquage 50% rouge, 50% vert
3. Croissance 1000 → 200000

► Deux résultats

1. Moteur physique réaliste
2. Nouvelle hypothèse pour la sectorisation

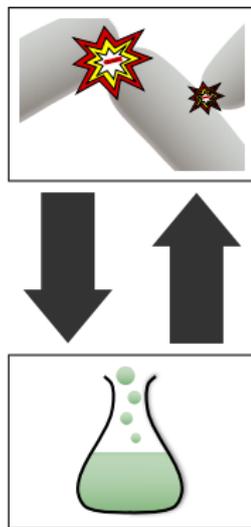
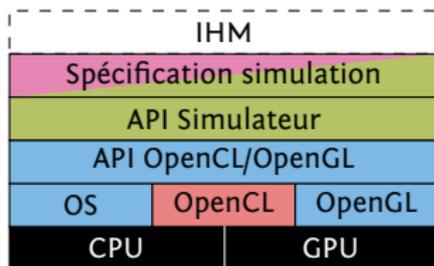
Exemple 2 : Cercles concentriques

- ▶ Morphogènes : Vert, Rouge, Bleu
- ▶ États
 - ▶ A: Croissance(0.005), Dépôt(Vert,50), Tumble()
 - ▶ B: Croissance(0.005), Dépôt(Bleu,50), Tumble()
 - ▶ C: Croissance(0.005), Dépôt(Rouge,50), Tumble()
 - ▶ D: Destruction()
- ▶ Transition
 - ▶ c_1 : IsDaughter()
 - ▶ c_2 : LessThreshold(Vert,0.1)
 - ▶ c_3 : LessThreshold(Vert,0.1) \wedge LessThreshold(Rouge,10.0)



Architecture logicielle

- 2300 lignes de C
 - ▶ Programmation API, bas niveau
 - ▶ Interface avec OpenCL/OpenGL
- 2000 lignes de OCaml réparties en 10 modules
 - ▶ Programmation API, haut niveau
 - ▶ Processus maître, orchestration de simulation
 - ▶ Gestion des zones dynamiques
- 700 lignes de kernel OpenCL
- SBGP

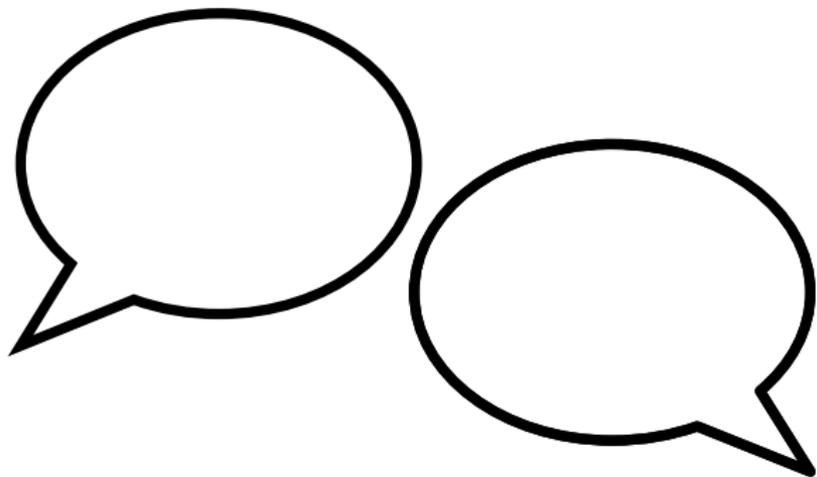


► Conclusion:

1. Développement d'un simulateur d'une colonie de bactéries
2. Programmation spécifique SIMD, non triviale
3. Proposition d'un algorithme (PPM) pour la simulation parallèle d'un automate cellulaire 2D

► Perspectives:

1. Calibrer les paramètres des moteurs physique et chimique
2. Tester d'autres méthodes de discrétisation pour l'équation de réaction-diffusion
3. Construire une IHM (GUI, CLI, etc.)
4. Effectuer des tests de performance
5. Diffuser l'outil auprès de la communauté



Questions!

