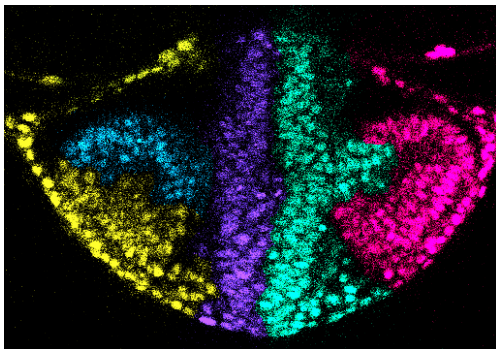


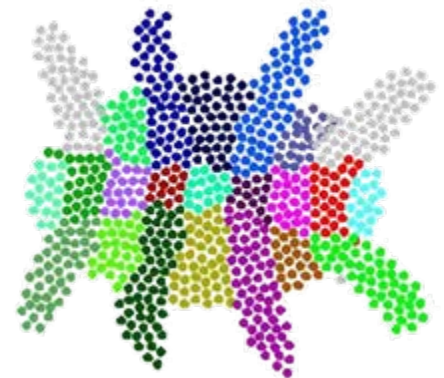
ZZ^{sel}le
the self-made
puzzle
th zle made
mad self

Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

Entre mouvement collectif hétérogène
et formation de motifs en mouvement



René Doursat
<http://doursat.free.fr>



Systemes auto-organisés

... et structurés



auto-organisation libre



ingénierie planifiée



auto-organisation programmée ou "instruite"

Vers une auto-organisation programmée

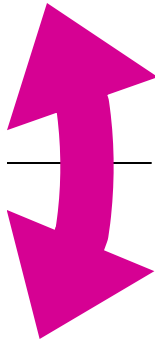
➤ Systèmes auto-organisés

- ✓ une myriade d'agents se plaçant eux-mêmes
- ✓ ordre collectif non imposé de l'extérieur (evt influencé)
- ✓ vient des informations et interactions *locales* de chaque agent
- ✓ aucun agent ne possède le plan d'ensemble
- ✓ mais chaque agent peut contenir toutes les *règles* qui y contribuent



➤ Systèmes structurés

- ✓ véritable *architecture* : morphologie non triviale, compliquée
 - *hiérarchique*, multi-échelle : régions, parties, détails, agents
 - *modulaire* : réutilisation, quasi-répétition
 - *hétérogène* : différenciation et divergence dans la répétition
- ✓ *aléatoire* au niveau micro, *mais reproductible* (quasi déterministe) aux niveaux méso et macro



Vue d'ensemble

➤ Approche abstraite (computationnelle) du développement



- ✓ en tant que phénomène fondamentalement *spatial*
- ✓ mise en évidence de *grands principes*, indispensables pour accueillir et intégrer les données ; modélisation *computationnelle* de ces principes

➤ Grands principes



1. *biomécanique* → mouvement collectif → “sculpture” de l’embryon
 2. *régulation génétique* → motifs d’expression → “peinture” de l’embryon
- + *couplage* entre formes et couleurs

➤ Modèles multi-agents



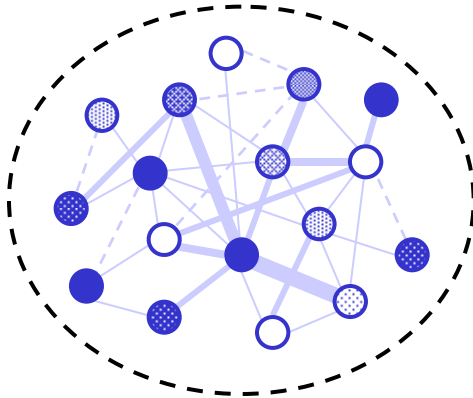
- ✓ mieux à même d’intégrer les deux
- ✓ rendre compte de l’hétérogénéité, de la modularité, de la hiérarchie
- ✓ chaque agent porte un ensemble de règles *biomécaniques* et *régulateurs*

Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

1. Systèmes auto-organisés et structurés
2. Enjeux : mouvement hétérogène / motifs en mouvement
3. Modèles multi-agents de l'embryogenèse
4. Développement évolutionnaire (evo-devo)

Systemes auto-organisés et structurés

➤ Les systèmes complexes



- un grand nombre d'agents élémentaires interagissant localement
- des comportements individuels locaux créant un comportement collectif émergent
- *une dynamique décentralisée sans plan/grand architecte*

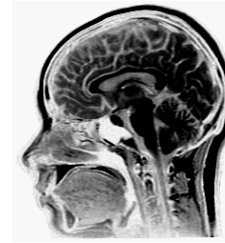
✓ systèmes **physiques**, **biologiques**, **sociaux** (naturels ou artificiels)



formation
de motifs
(○ = particule)



développement
animal
(○ = cellule)

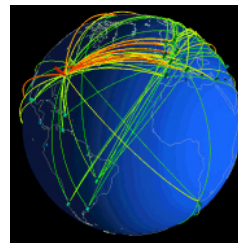


cerveau
et cognition
(○ = neurone)

colonies
d'insectes
(○ = fourmi)



Internet
& Web
(○ = hôte/page)

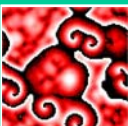
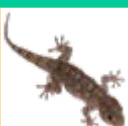


réseaux
sociaux
(○ = individu)



Systèmes “statistiques” vs. “morphologiques”

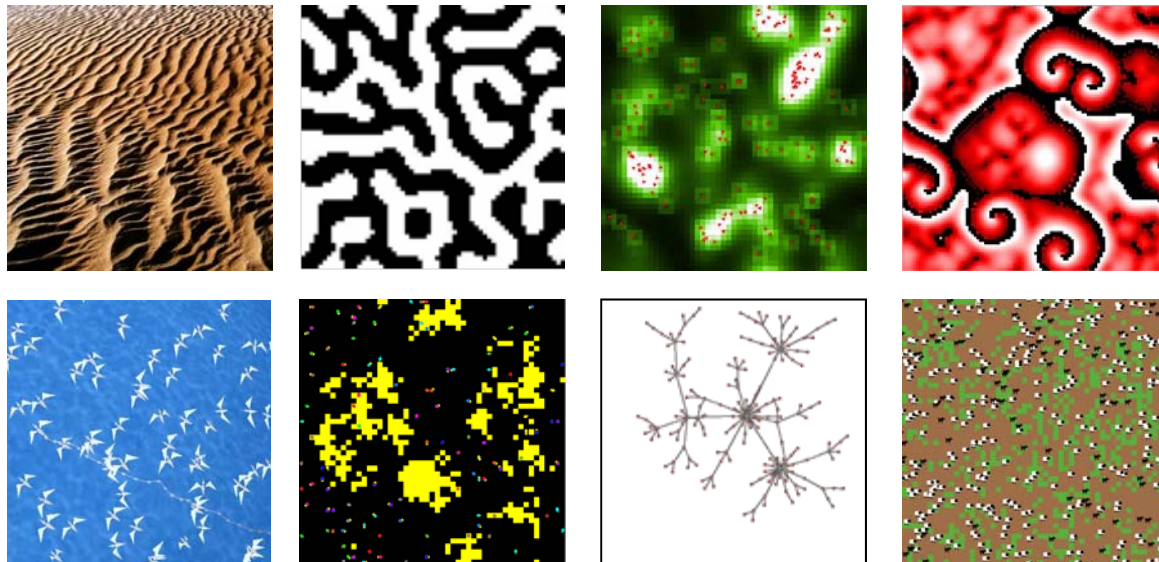
➤ Une brève taxonomie des systèmes

Catégories	<i>agents</i>	<i>règles locales</i>	<i>comportement émergent</i>	un “système complexe” ?
 problème à 2 corps	<i>peu</i>	<i>simples</i>	<i>simple</i>	<i>NON</i>
 problème à 3 corps, chaos	<i>peu</i>	<i>simples</i>	<i>complexe</i>	<i>NON – trop petit</i>
 cristal, gaz	<i>nombreux</i>	<i>simples</i>	<i>simple</i>	<i>NON – peu de params pour décrire</i>
 motifs, nuées, réseaux	<i>nombreux</i>	<i>simples</i>	<i>“complexe”</i>	<i>OUI – mais surtout aléatoire et uniforme</i>
 morphogenèse structurée	<i>nombreux</i>	<i>sophistiquées</i>	<i>complexe</i>	<i>OUI – reproductible et hétérogène</i>
 foules avec chef, machines	<i>nombreux</i>	<i>sophistiquées</i>	<i>“simple”</i>	<i>COMPLIQUÉ – pas auto-organisé</i>

Systèmes “statistiques” (auto-similaires)

➤ Nombreux agents, règles simples, émergence “complexe”

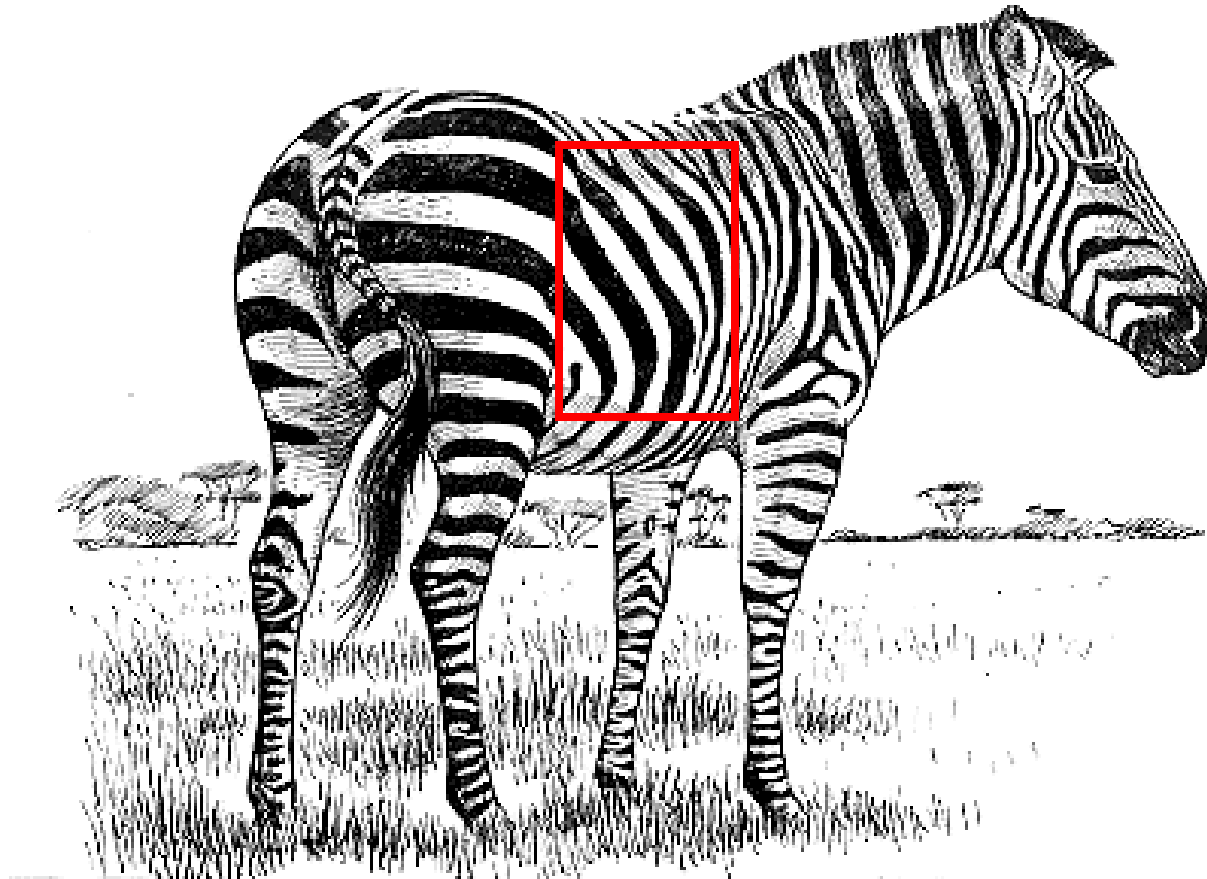
→ les “clichés” des systèmes complexes : diversité de formations de motifs (spots, rayures), nuées (grappes, cliques), réseaux, etc.



- ✓ mais la plupart en “textures”: répétitifs, *uniformes*, faibles en information
- ✓ ordre spontané *aléatoire*, émergeant de l'amplification de fluctuations
- ✓ nombre exact et position des entités méso (spots, groupes) *imprévisible*

Systèmes “morphologiques” (auto-dissimilaires)

formation de motifs $\neq$ morphogenèse



“I have the stripes, but where is the zebra?”

—(attribué à) A. Turing, après son papier de 1952 sur la morphogenèse

Systèmes “morphologiques” (auto-dissimilaires)

- **Nombreux agents, règles sophistiquées, émergence complexe**
→ *exemples naturels : organismes (cellules)*



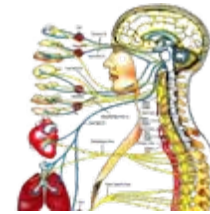
plantes



vertébrés



arthropodes



humains

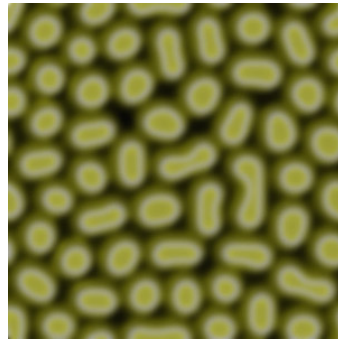
- ✓ organes, membres méso : morphologies *non aléatoires*, imbriquées
- ✓ développement hautement *reproductible* en nombre/position des parties
- ✓ éléments *hétérogènes* émergeant d'une information (épi)génétique riche
- **Les organismes biologiques sont auto-organisés et structurés**
 - ✓ les règles des agents étant plus sophistiquées (que la matière inerte), elles peuvent maintenant dépendre du *type* et de la *position* des agents
 - ✓ le système est véritablement plus compliqué mais, paradoxalement, se prête aussi mieux à un *contrôle* et une *programmation*

Systèmes “statistiques” vs. “morphologiques”

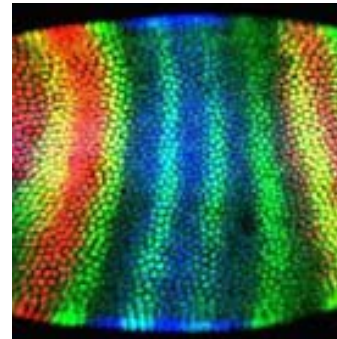
- La formation de motifs physique est “libre” –
la formation de motifs biologique est “guidée”



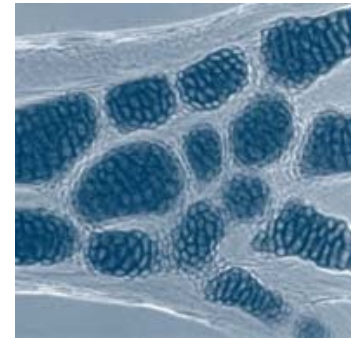
cellules de convection
www.chabotspace.org



réaction-diffusion
texturegarden.com/java/rd



embryon de drosophile
Sean Carroll, U of Wisconsin



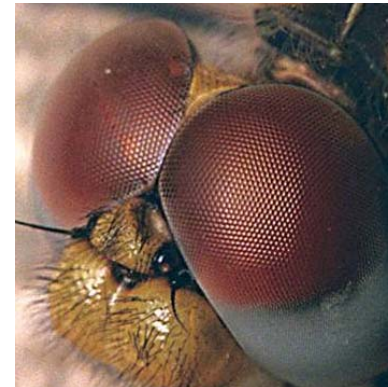
membre d'axolotl
Gerd B. Müller

Systèmes “statistiques” vs. “morphologiques”

- Formes bio = un peu de “libre” + beaucoup de “guidé”
 - ✓ domaines de motifs libres inclus dans une morphologie guidée



taches, rayures
angelfish, www.sheddaquarium.org



ommatidia
dragonfly, www.phy.duke.edu/~hsg/54

- ✓ copies répétées d'une forme guidée, distribuée en motifs libres



fleurs dans un arbre
cherry tree, www.phy.duke.edu/~fortney



segments dans insecte
centipede, images.encarta.msn.com

Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

1. Systèmes auto-organisés et structurés
2. Enjeux : mouvement hétérogène / motifs en mouvement
3. Modèles multi-agents de l'embryogenèse
4. Développement évolutionnaire (evo-devo)

L'embryogenèse couple **assemblage** et **marquage**

➤ Sculpture → formes

Ádám Szabó, *The chicken or the egg* (2005)
<http://www.szaboadam.hu>

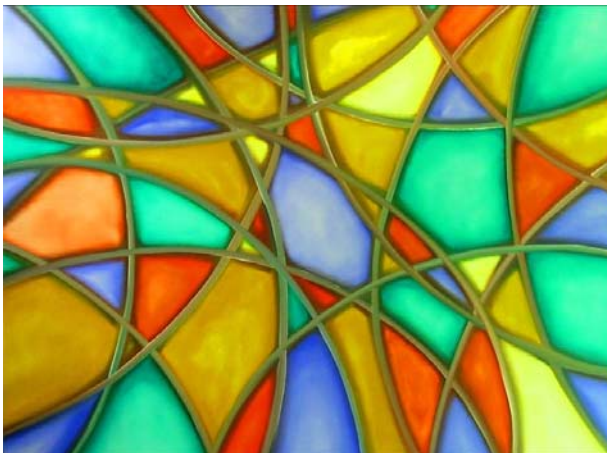


“shape from patterning”

- ✓ formes “sculptées” par l'auto-assemblage d'éléments, selon des comportements locaux déclenchés par les **couleurs**



➤ Peinture → couleurs



“pattern from shaping”

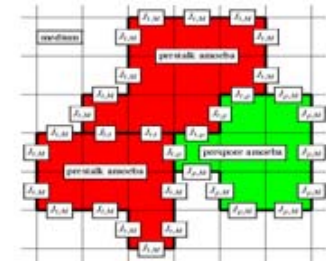
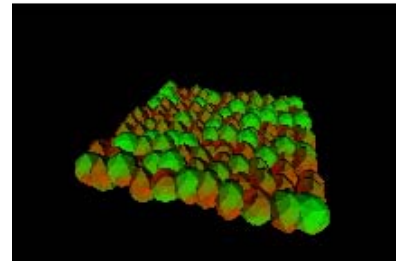
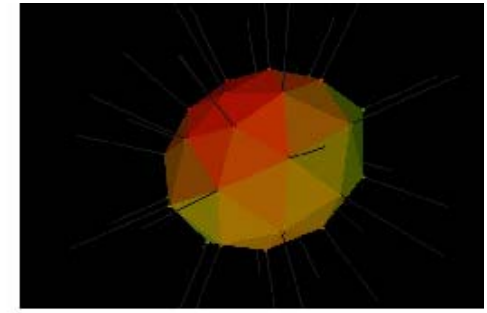
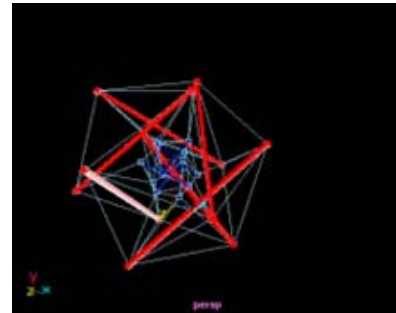
- ✓ nouvelles régionalisation en **couleurs** (domaines d'expression génétique) déclenchée par les **déformations**

L'embryogenèse couple **mécanique** et **régulation**

➤ Mécanique cellulaire

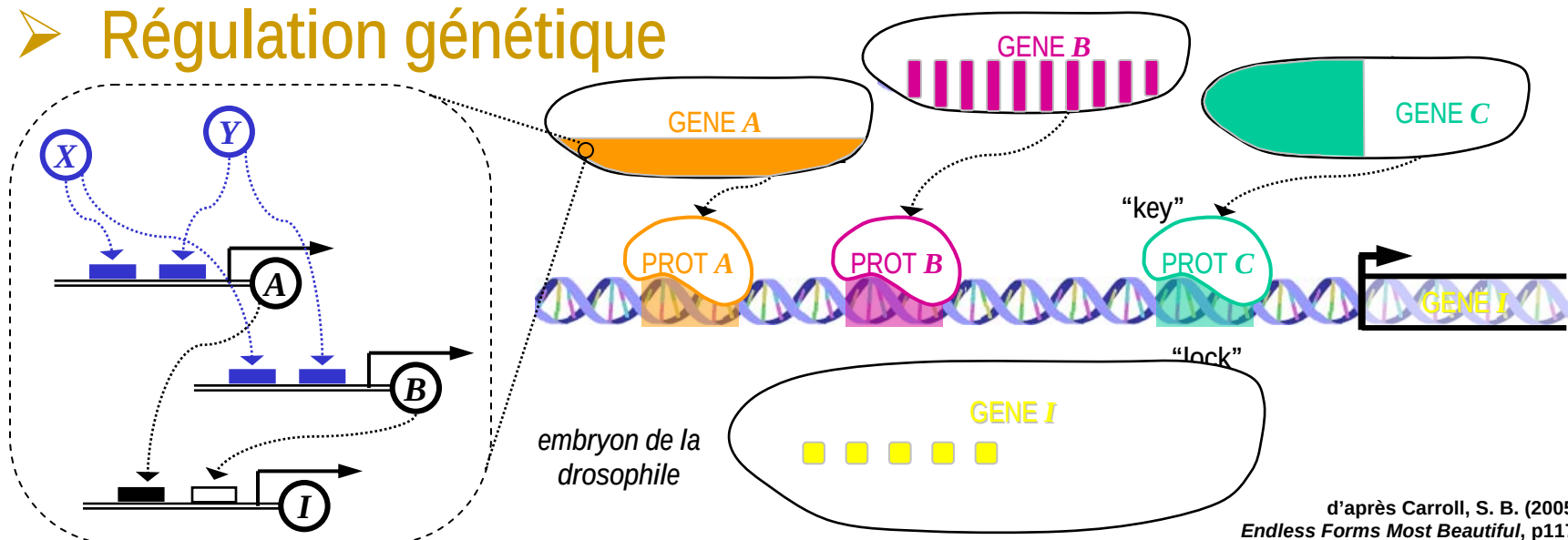
- ✓ adhésion
- ✓ déformation / reformation
- ✓ migration (motilité)
- ✓ division / mort

tensional integrity (Ingber)



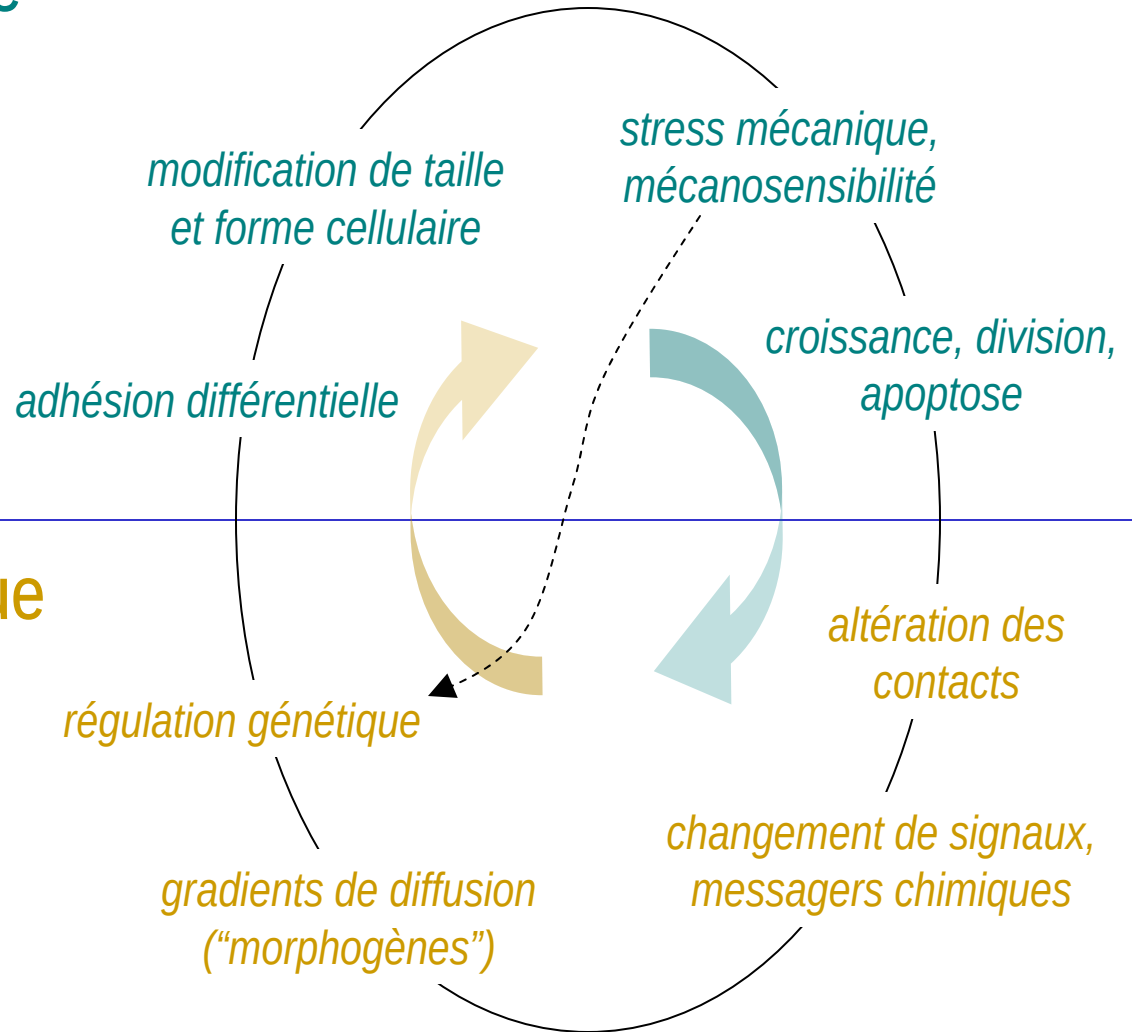
cellular Potts model
(Graner, Glazier, Hogeweg)

➤ Régulation génétique



L'embryogenèse couple **mécanique** et **régulation**

➤ Mécanique cellulaire

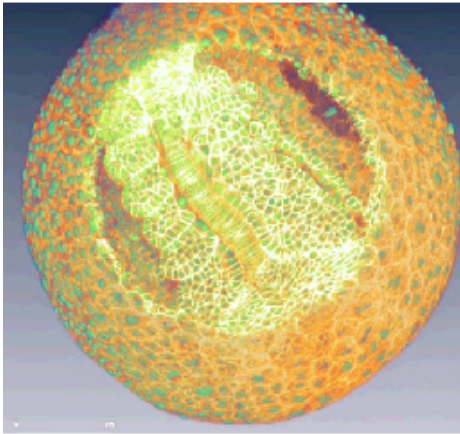


➤ Régulation génétique

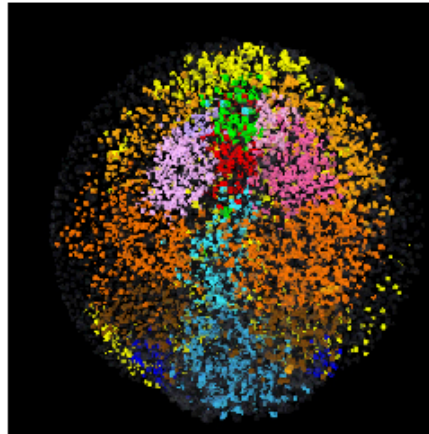
L'embryogenèse couple mouvement et motifs

➤ Mouvement collectif régionalisé en motifs

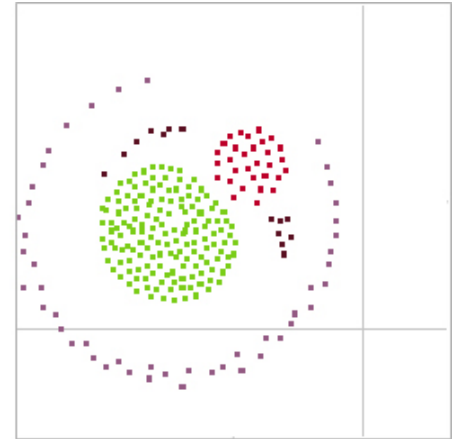
Nadine Peyrière, Thierry Savy,
Benoît Lombardot, Emmanuel Faure et al.
(Embryomics & BioEmergences)



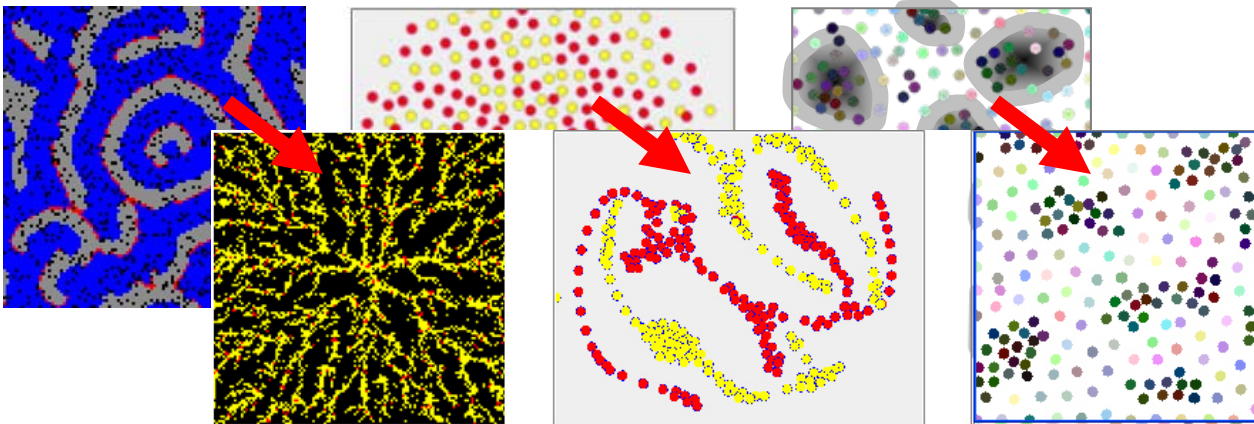
poisson zèbre



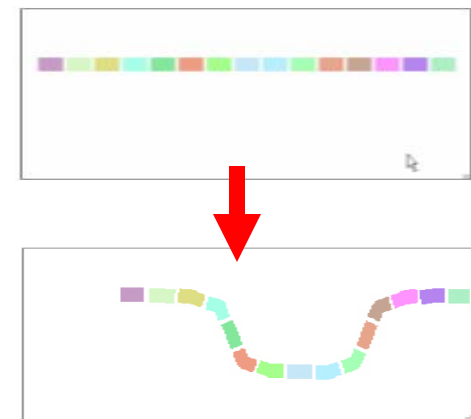
Hiroki Sayama (Swarm Chemistry)
<http://bingweb.binghamton.edu/~sayama/SwarmChemistry/>



➤ Formation de motifs qui imprime un mouvement



<http://zool33.uni-graz.at/schmickl>



Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

1. Systèmes auto-organisés et structurés
2. Enjeux : mouvement hétérogène / motifs en mouvement
- 3. Modèles multi-agents de l'embryogenèse**
4. Développement évolutionnaire (evo-devo)

Différentes approches et familles de modèles

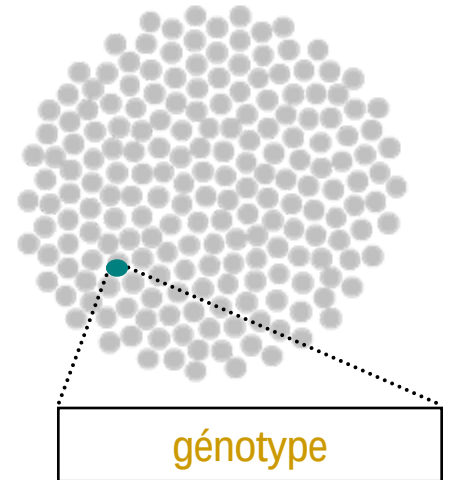
➤ Modèles biologiques, bio-inspirés ou artificiels

✓ centrés sur motifs de différenciation spatiale (pas ou peu de mouvement)

- réaction-diffusion (EDP, automates cellulaires)
- réseaux génétiques (booléens ou concentrations)
- “amorphous computing”

✓ centrés sur mouvement (pas ou peu de motifs)

- Potts (sous-)cellulaire
- auto-assemblage, agrégation
- formations d'essaims (flocking), tir cellulaire

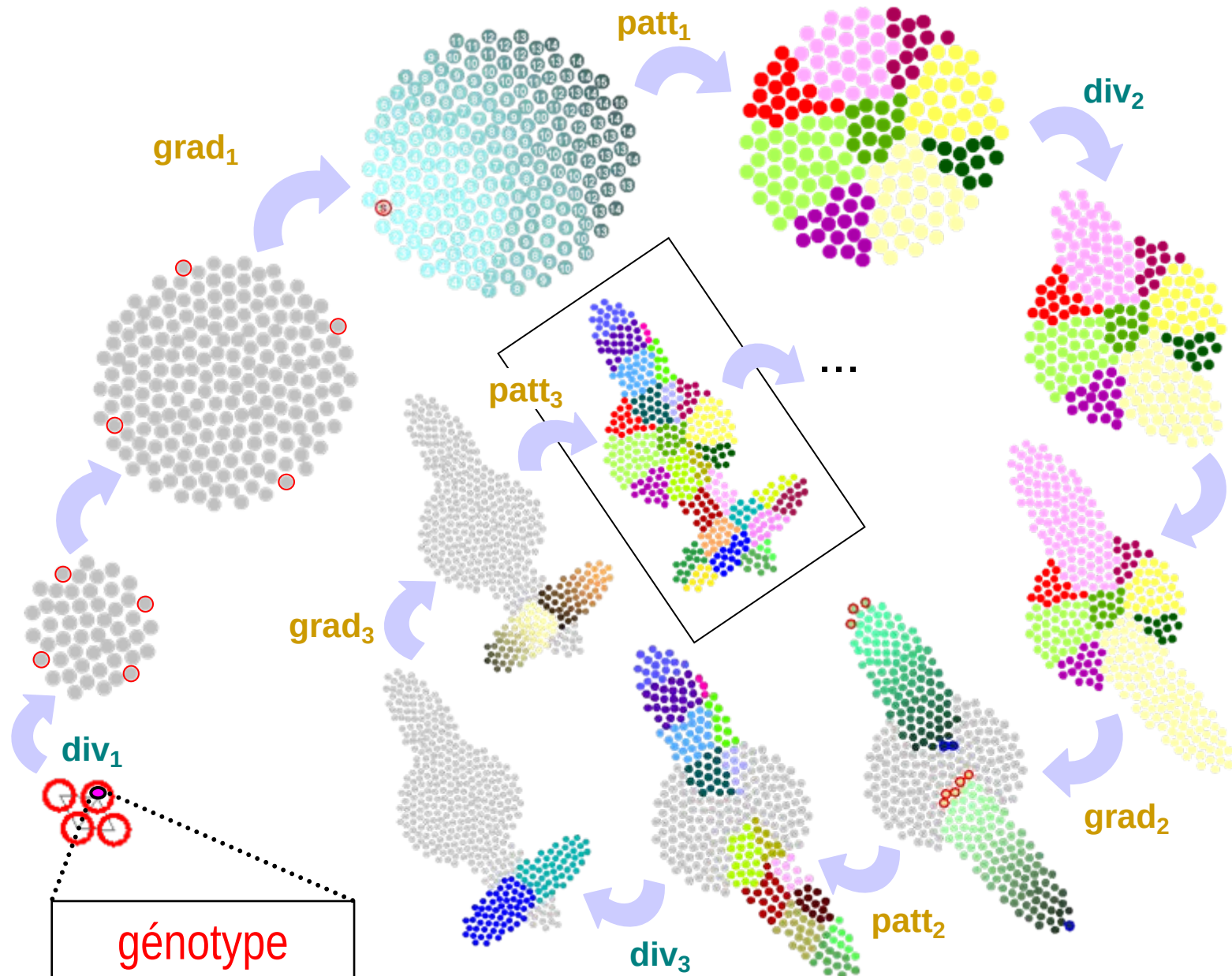


*une combinaison encore peu fréquente
Hogeweg / Salazar-Ciudad / Mjolsness..*

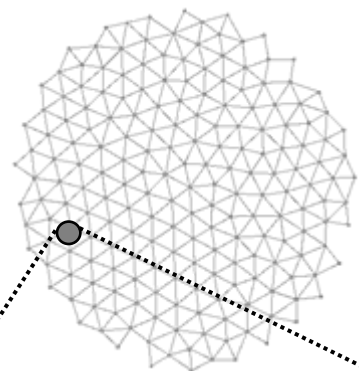
✓ à différentes échelles

- modèles macroscopiques (densités, géométrie différentielle) : pas d'info individuelle
- modèles mésoscopiques (centres cellulaires, Potts) : pas de membranes/noyaux
- modèles microscopiques (polyèdres élastiques, gouttes) : déformations cellulaires

Exemple de modèle mésoscopique hybride

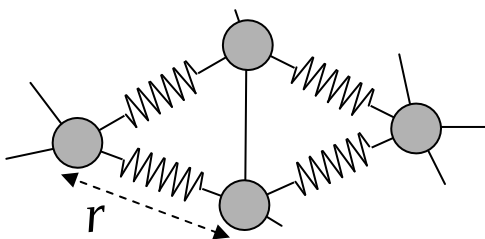
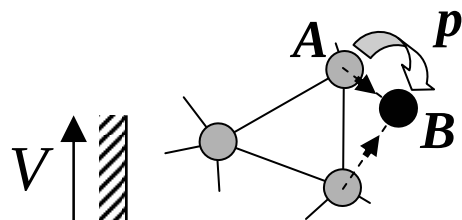


div

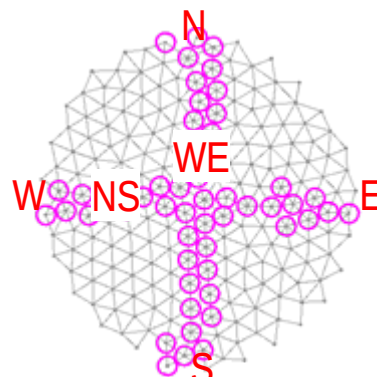
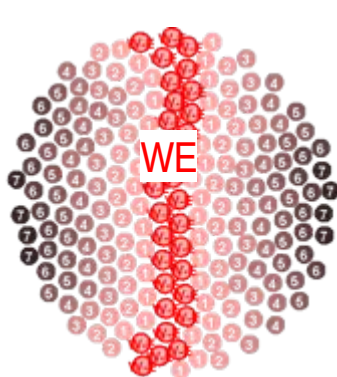
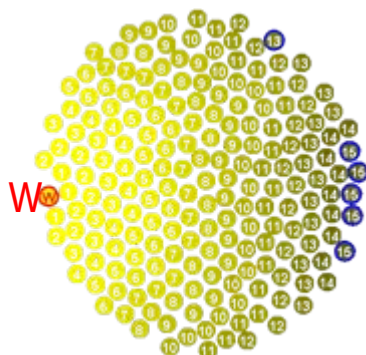


$$G_{SA} : r_c < r_e = 1 \ll r_0$$

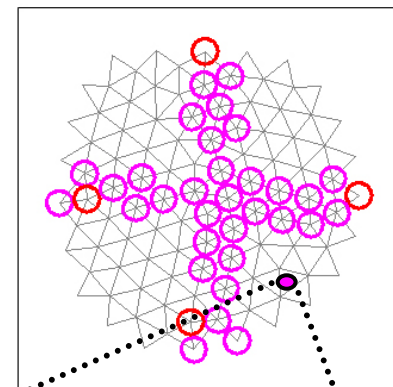
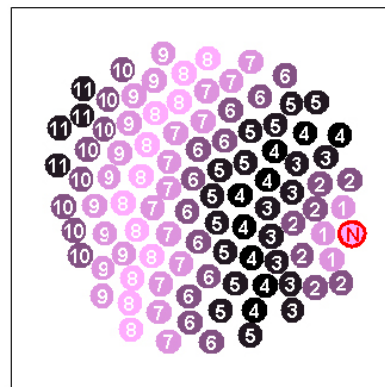
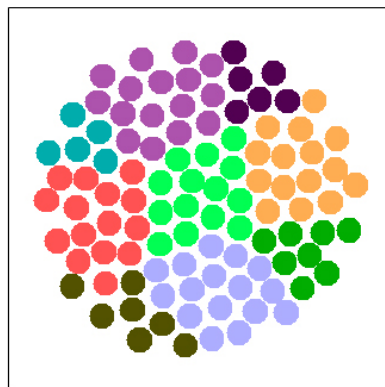
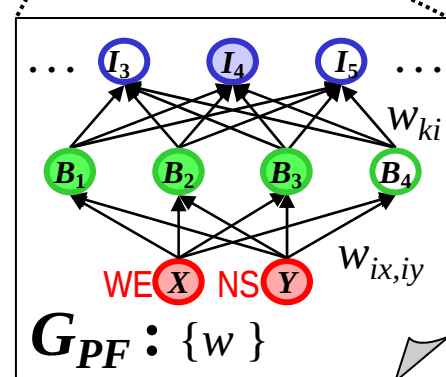
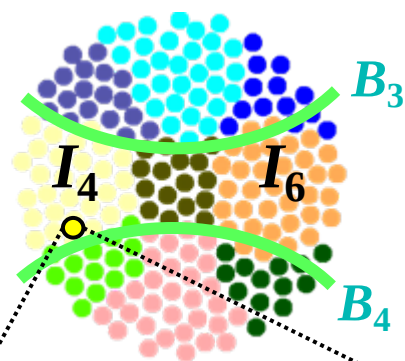
$$p = 0.05$$



grad



patt



$$G_{SA} \cup G_{PF}$$

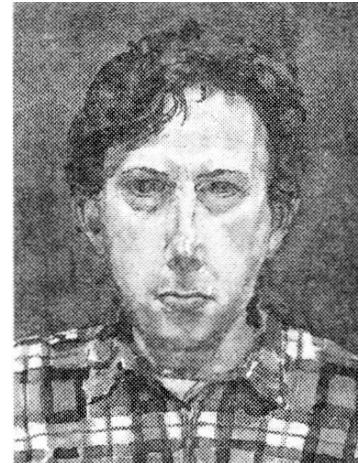
Morphogenèse multi-échelle

➤ Affinement morphologique par croissance itérative

- ✓ les détails ne sont pas créés en une fois, mais ajoutés graduellement...

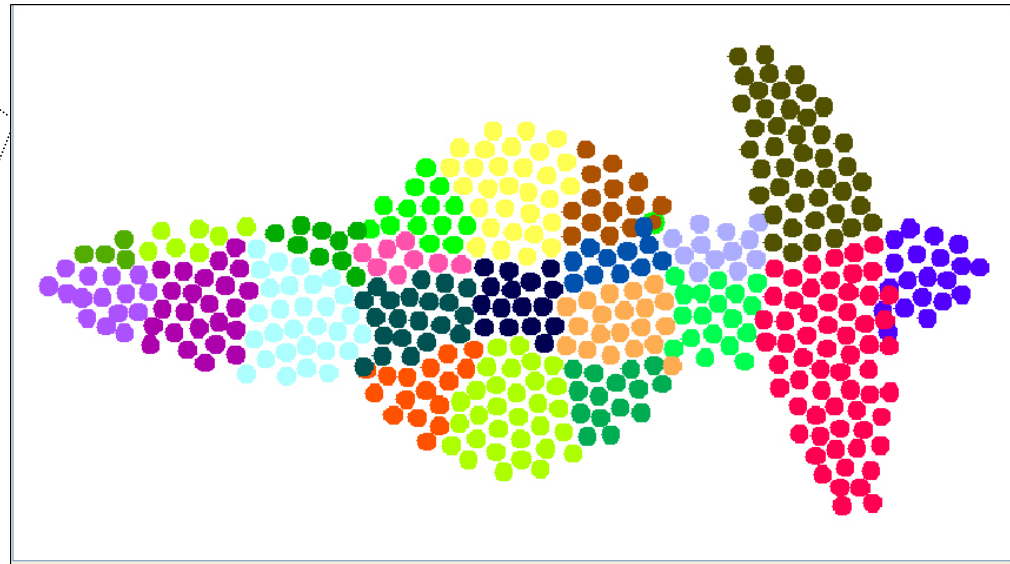
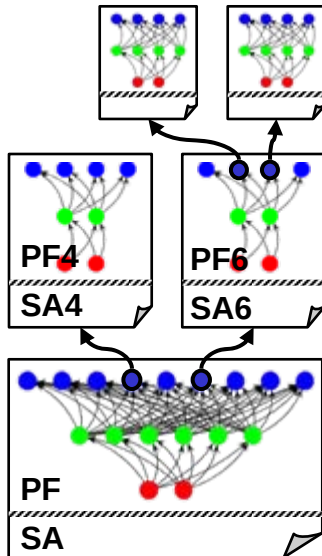
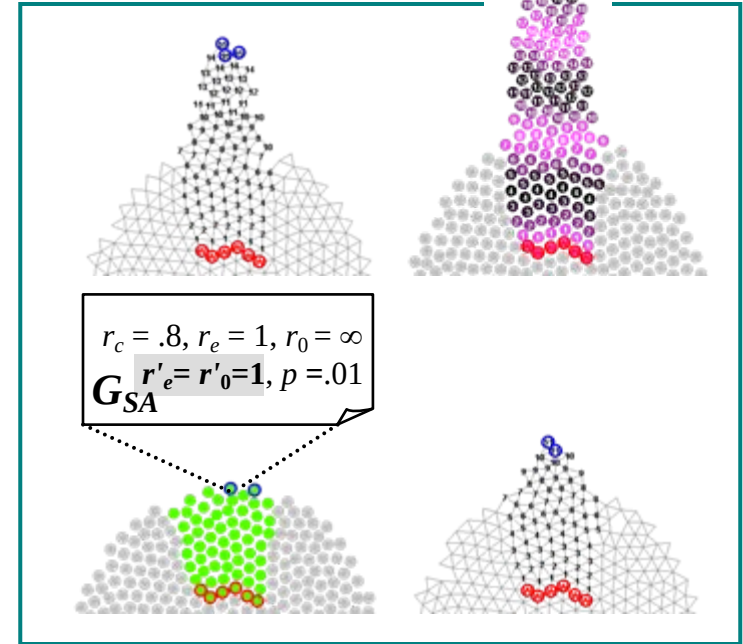
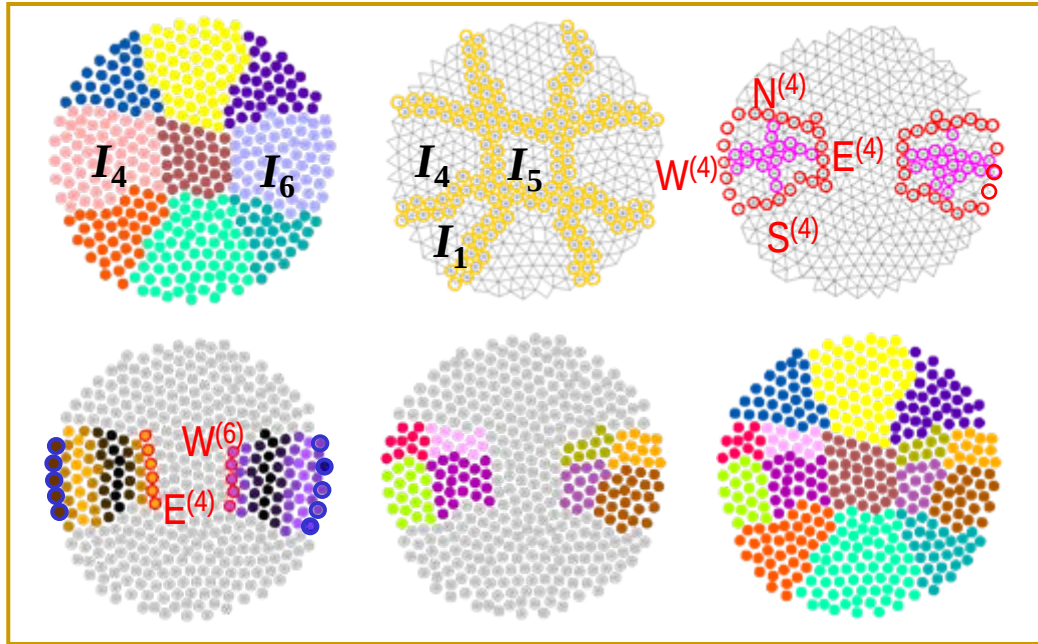


- ✓ ... tandis que, dans le même temps, le canevas grandit



extrait de Coen, E. (2000)
The Art of Genes, pp131-135

Morphogenèse multi-échelle



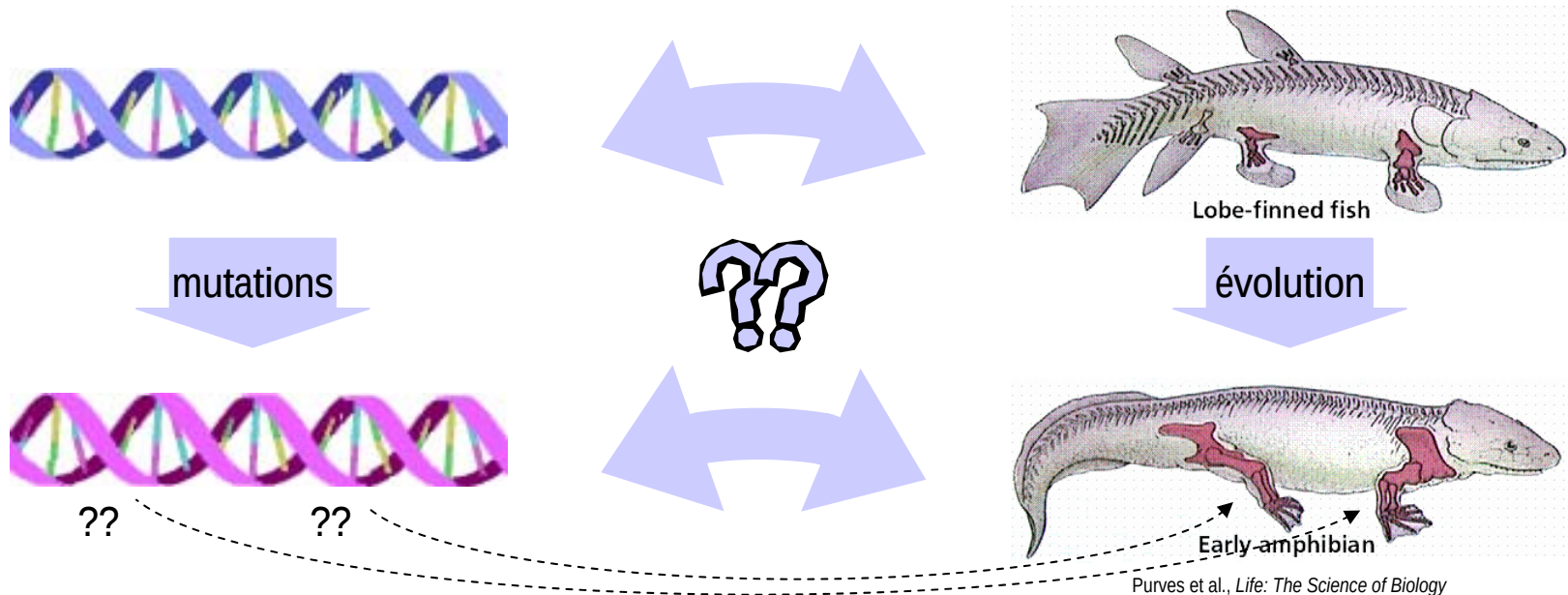
Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

1. Systèmes auto-organisés et structurés
2. Enjeux : mouvement hétérogène / motifs en mouvement
3. Modèles multi-agents de l'embryogenèse
4. Développement évolutif (evo-devo)

Développement évolutionnaire (evo-devo)

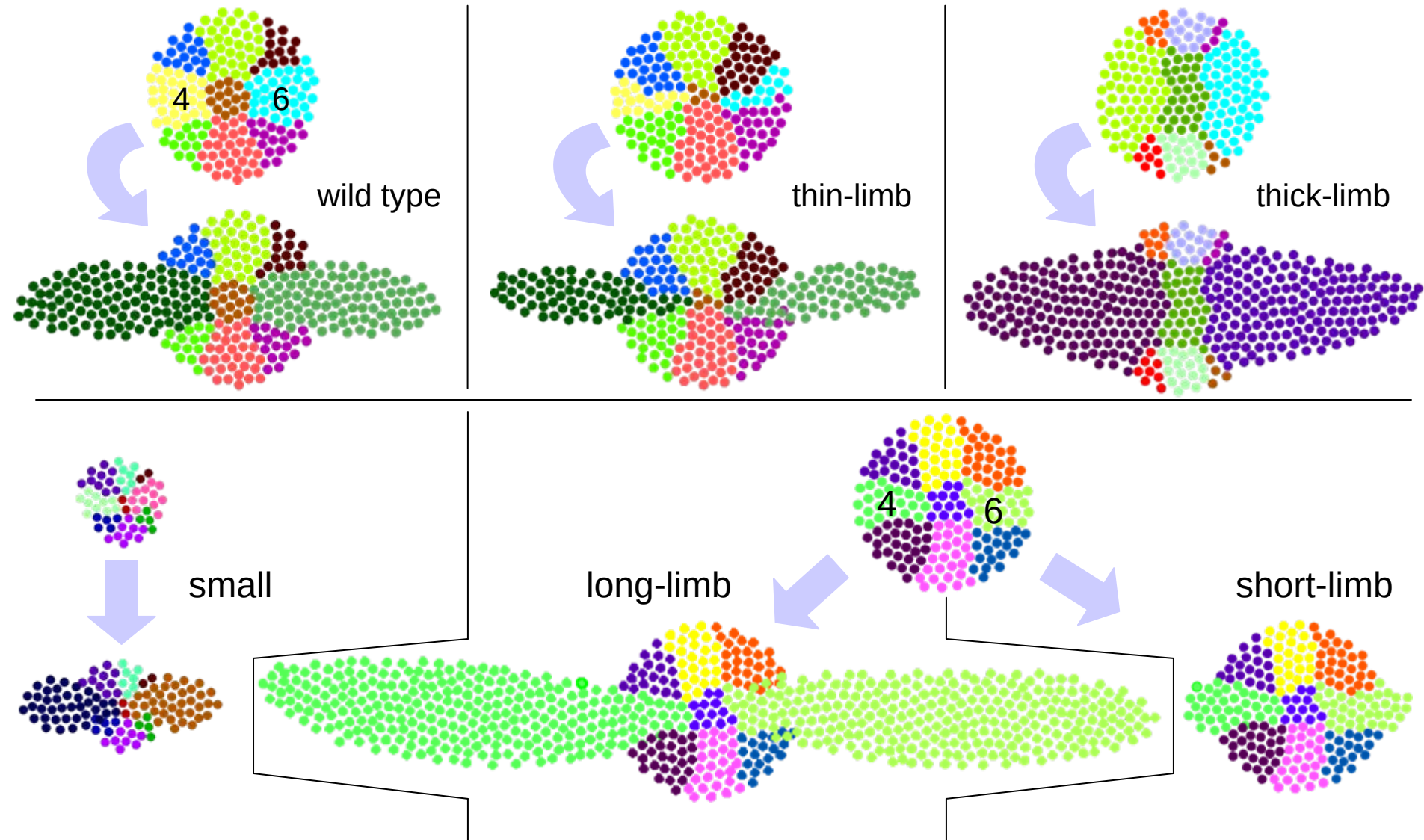
➤ Développement: le chaînon manquant de la synthèse moderne

- ✓ la synthèse moderne a démontré une corrélation fondamentale entre génotype et phénotype, pourant le *phénomène développemental* (ses mécanismes moléculaires et cellulaires) n'est pas encore élucidé
- ✓ or ce lien génotype-phénotype ne peut pas rester une abstraction si l'on veut aussi mieux comprendre l'évolution en tant que *production d'innovation* (variation) et pas seulement en tant que sélection



L'evo-devo multi-agent

- Mutations du génotype → variations du phénotype (*quantitatives*)



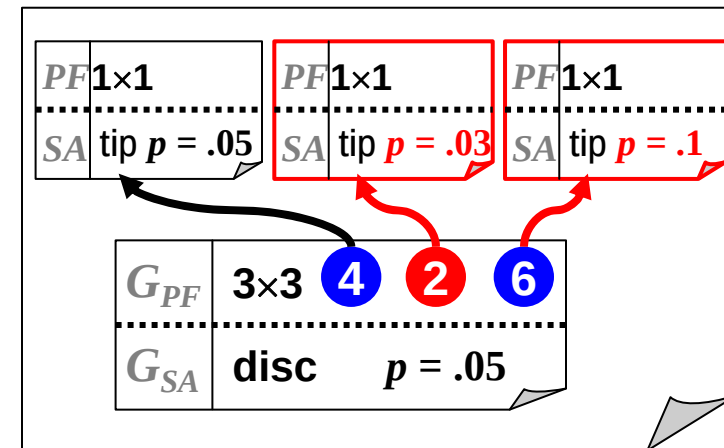
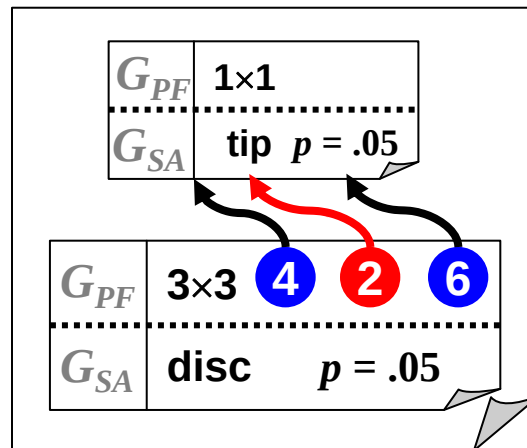
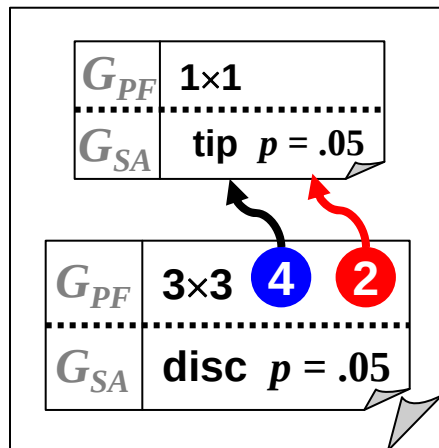
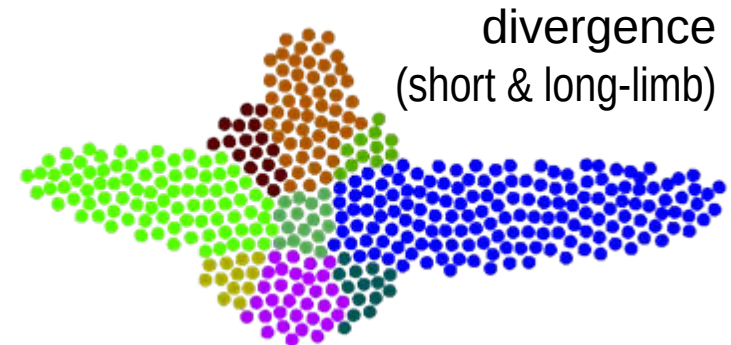
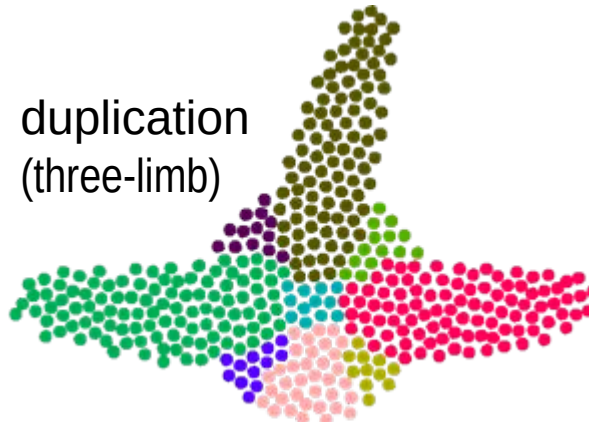
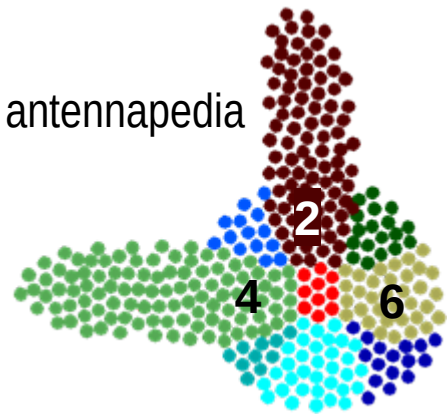
Développement évolutif (evo-devo)

➤ Mutations du génotype → variations du phénotype (*qualitatives*)

antennapedia

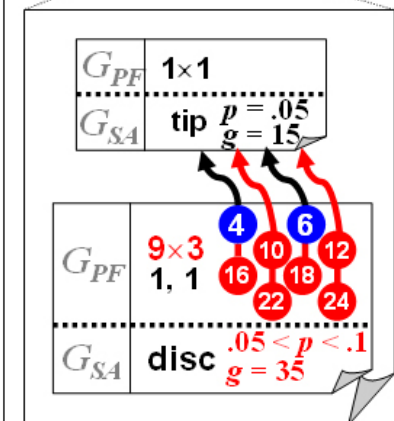
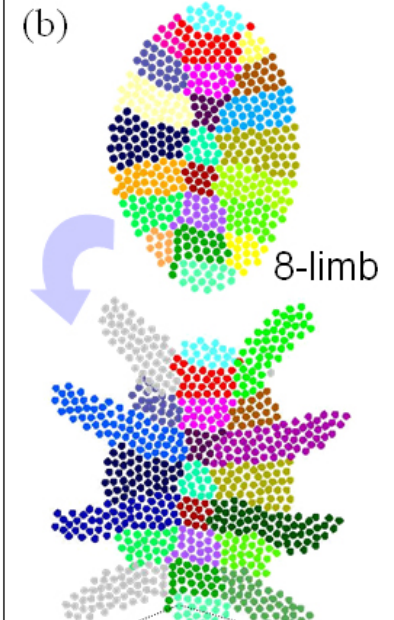
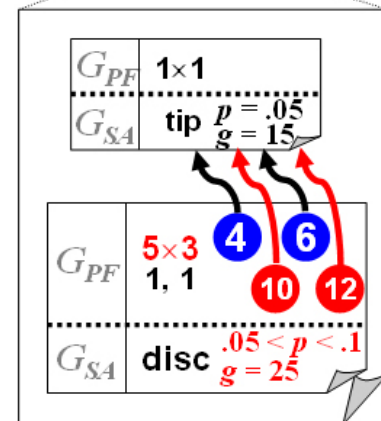
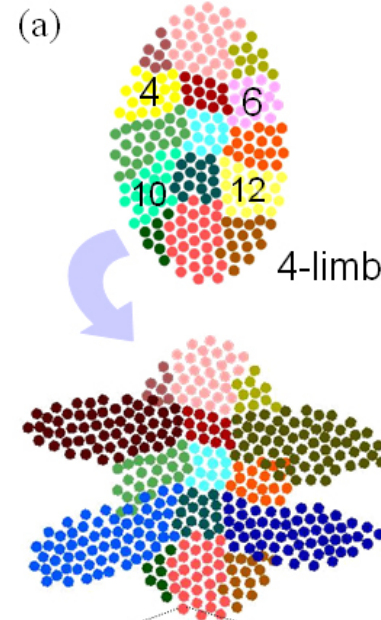
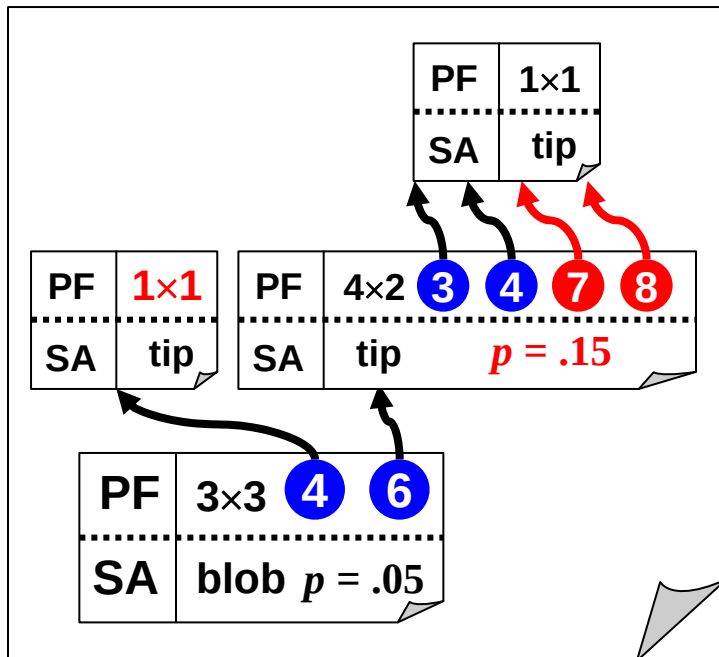
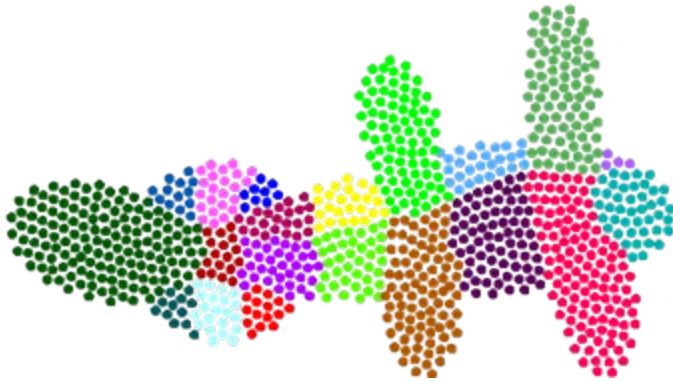
homologie par duplication

divergence de l'homologie



Développement évolutionnaire (evo-devo)

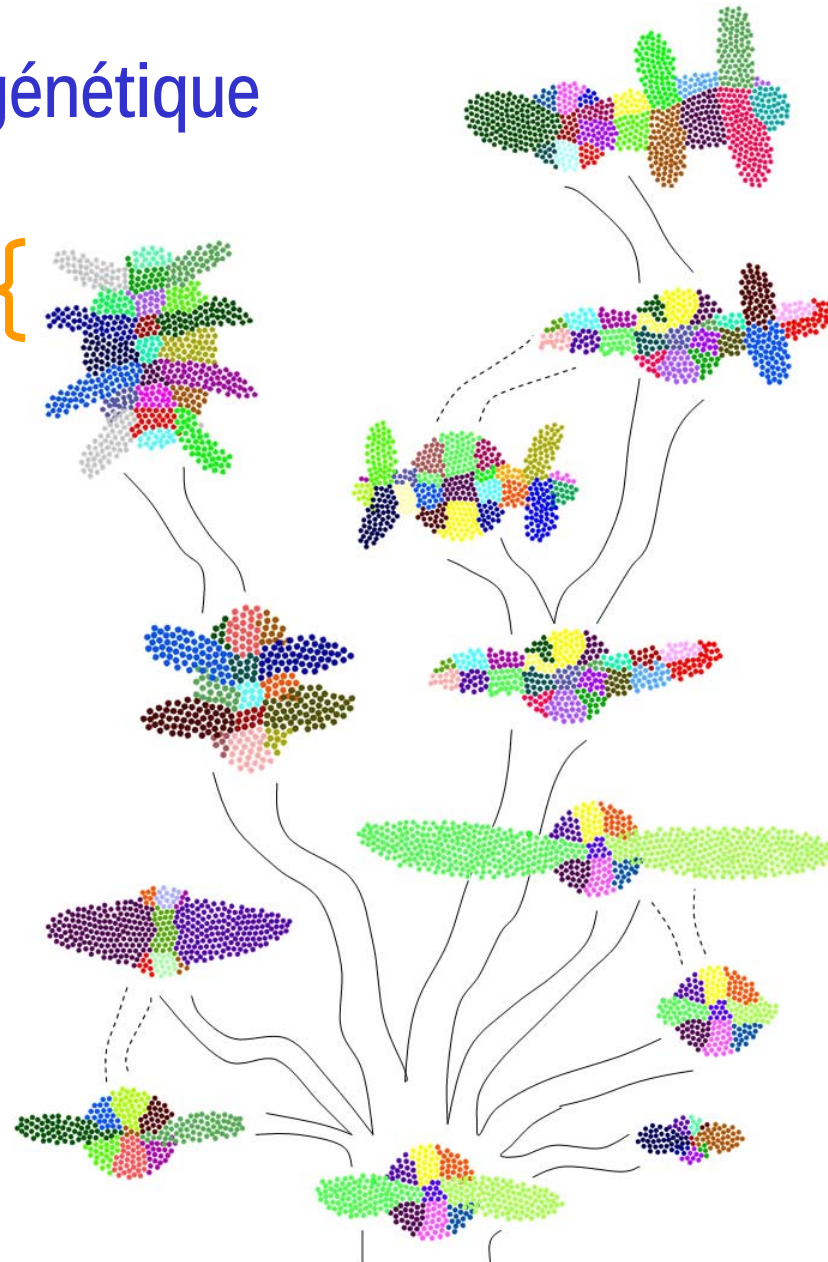
- Mutations du génotype → variations du phénotype (*qualitatives*)



Développement évolutionnaire (evo-devo)

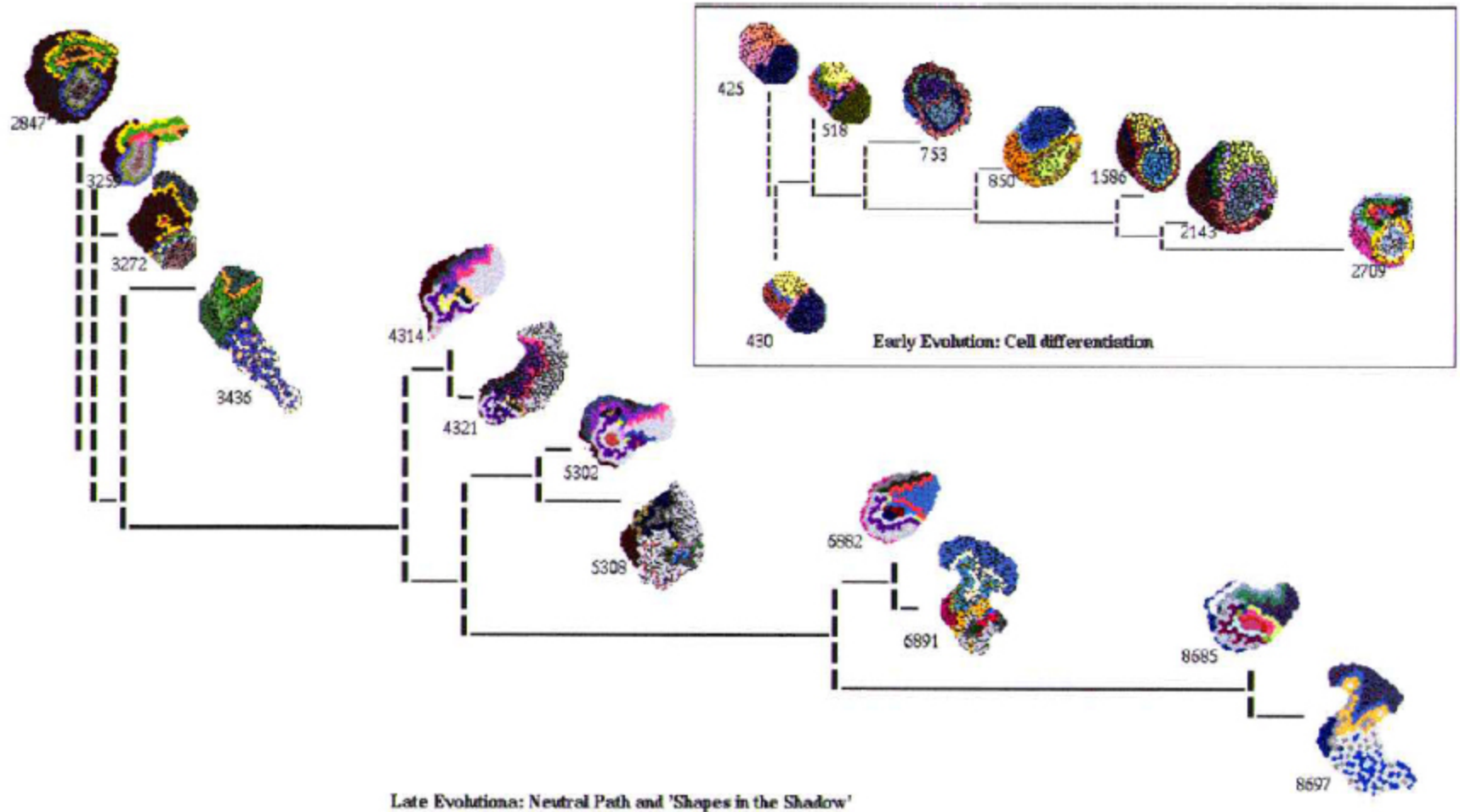
➤ Arbre phylogénétique

*production
d'innovation
structurale*



Développement évolutif (evo-devo)

➤ Autre exemple d'arbre phylogénétique (Paulien Hogeweg)



Le puzzle auto-façonné de l'embryogenèse

1. Systèmes auto-organisés et structurés
2. Enjeux : mouvement hétérogène / motifs en mouvement
3. Modèles multi-agents de l'embryogenèse
4. Développement évolutionnaire (evo-devo)