

# Modèle POEtic

# Inspiration biologique

- Les organismes vivants sont des systèmes complexes dotés de propriétés désirables pour les systèmes informatiques et notamment embarqués telles que
  - L'adaptation,
  - L'évolution,
  - La tolérance aux pannes
  - ...

# Niveaux d'organisation des êtres vivants (1)

- Phylogénétique
  - Ce niveau organisationnel concerne l'évolution temporelle du programme génétique à travers les générations.
  - La multiplication des organismes est basée sur la reproduction du programme génétique. Processus sujet à un très faible taux d'erreur (sauf mutations).
  - C'est un processus fondamentalement non-déterministe grâce aux mutations et croisements et qui est source de diversité des organismes.
  - Cette diversité est une première source d'**adaptation** des espèces (et non d'un organisme particulier) aux changements de l'environnement

# Niveaux d'organisation des êtres vivants (2)

- Ontogénétique
  - Le deuxième niveau d'organisation correspond à celui qui agence plusieurs organismes entre eux.
  - La division cellulaire à partir de la cellule souche, la zygote, engendre de nouvelles cellules au patrimoine génétique identique
  - Mais qui vont subir une phase de spécialisation de leur rôle en fonction de leur environnement (phénotype), ou position dans l'organisme multi-cellulaire. C'est la spécialisation cellulaire.
  - Le phénomène ontogénétique est donc le processus développemental des organismes multi-cellulaires.
  - C'est un processus déterministe : une erreur sur une seule base du génome est transmise à toutes les cellules filles et peut engendrer des malformations sérieuses

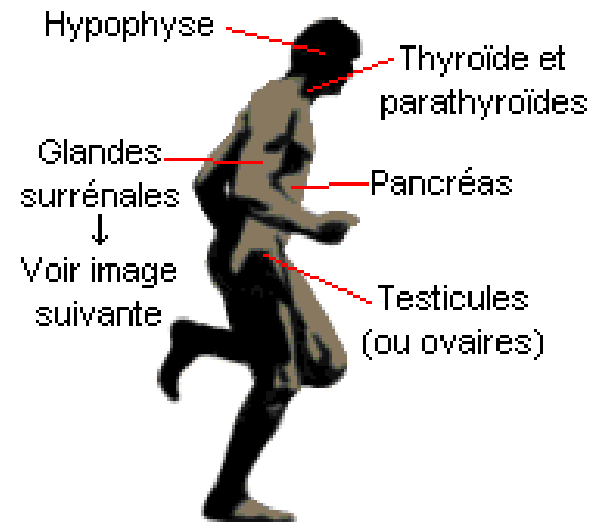
# Niveaux d'organisation des êtres vivants (3)

- Epigénétique
  - Le programme ontogénétique est limité par la quantité d'information qui peut être enregistré
  - Cette quantité ne peut en aucun cas décrire complètement la spécification de l'organisme complet
  - Exemple :
    - Le cerveau humain est constitué de  $10^{10}$  neurones et de  $10^{14}$  connexions
    - Le génome humain est constitué de  $2 \cdot 10^9$  bases de 4 caractères (A, T, C, G)
  - Ainsi, à partir d'un certain niveau de complexité, il est nécessaire qu'émerge un processus différent qui intègre les interactions infinies avec le monde alentour
  - Ce processus est appelé épigénétique et inclut principalement le système nerveux, le système immunitaire et le système endocrinien

# Systeme endocrinien

<http://www.corps.dufouraubin.com/hormone/hormone.htm>

- Le corps humain est un système complexe d'organes en relation les uns avec les autres, qui doivent travailler ensemble pour fonctionner correctement. Les glandes endocrines contrôlent les fonctions de l'organisme par l'intermédiaire de substances chimiques appelées hormones, qui sont libérées dans la circulation générale. Les hormones agissent comme des messagers chimiques qui voyagent dans tout le corps grâce à la **circulation sanguine**.
- Les différents organes du système endocrinien sont situés dans des régions parfois très éloignées de l'organisme. L'hypophyse est dans la boîte crânienne, la thyroïde dans le cou, le thymus dans le thorax, les glandes surrénales et le pancréas dans l'abdomen, les ovaires et les testicules dans le bassin. Les hormones qu'elles libèrent régulent les pulsions et émotions fondamentales, comme les pulsions sexuelles, la violence, la colère, la peur, la joie et le chagrin. Elles stimulent également la croissance et l'identité sexuelle, contrôlent la température corporelle, contribuent à la réparation des tissus lésés et aident à générer de l'énergie.



# épigénétique

- Les systèmes épigénétiques sont caractérisés par une structure de base intégralement définie par le génome (partie innée)
- Ils sont ensuite sujets à des modifications au cours des interactions avec l'environnement pendant la durée de vie du système (partie acquise)
- On classe les systèmes épigénétiques dans les systèmes apprenant

# Plasticité phénotypique

- Proposée par J.M. Baldwin [Bal96]
  - L'apprentissage est un phénomène concurrent à l'évolution dans l'adaptation de l'espèce. Le caractère appris peut devenir un caractère inné !



# Classification de Dennett

- Créature Darwinienne : Ses réponses à l'environnement sont dictées par ses gènes
- Créature Skinnerienne : capable d'apprendre et peut donc fournir de meilleures réponses à l'environnement au cours de sa vie
- Créature Popperienne : capable de prédire les conséquences de ses actions (inférence)

# Classification de Dennett

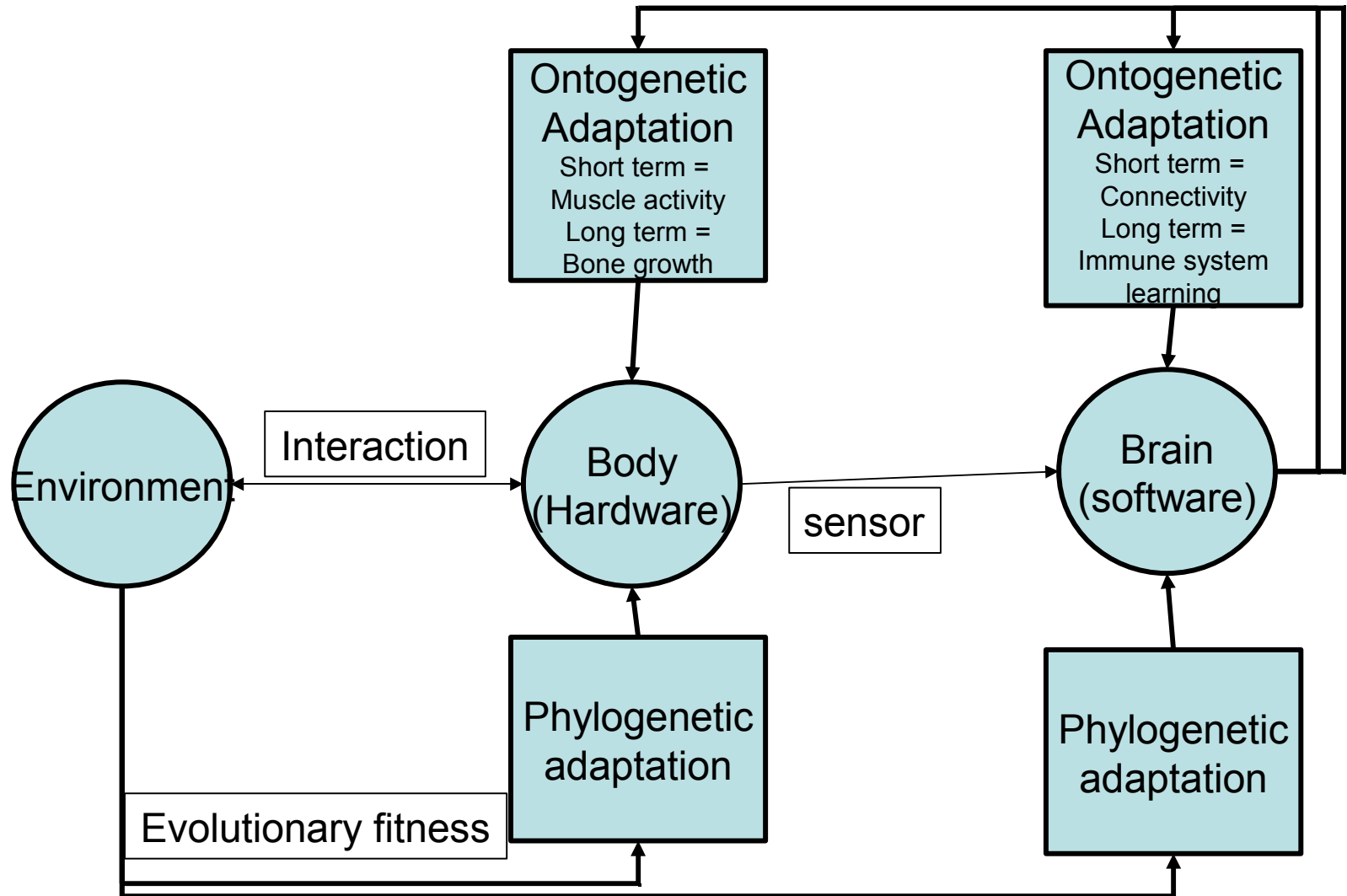
(philosophy of mind)

- Créature Darwinnienne : Ses réponses à l'environnement sont dictées par ses gènes
- Evolution
- Créature Skinnerienne : capable d'apprendre et peut donc fournir de meilleures réponses à l'environnement au cours de sa vie
- Apprentissage
- Créature Popperienne : capable de prédire les conséquences de ses actions (inférence)
- 'Simulation', anticipation

# Donc, qu'est ce que l'adaptation?

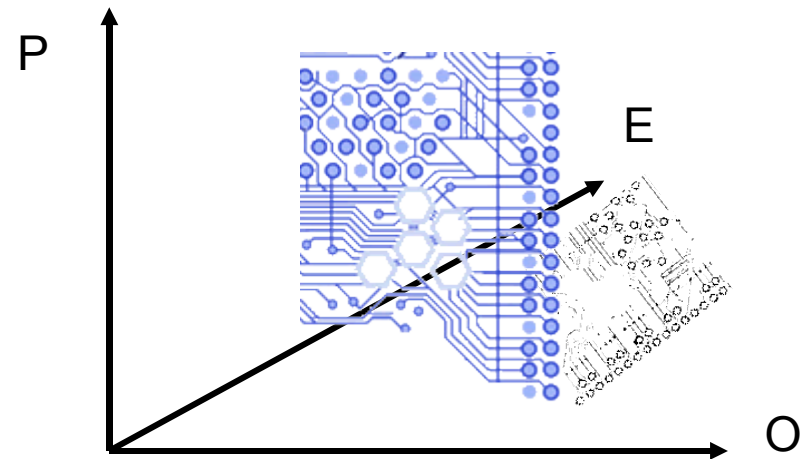
- Comment définir l'adaptation au sens global du terme (intelligence?)?
- Un système peut-il être adaptatif et autonome s'il est conçu pour répondre à une tâche (un critère) bien définie?
- Holland énonce que les animaux ont tous des comportements différents alors qu'ils ont tous en charge la même *mission* : propager leur information génétique.
  - Notion *d'objectifs intermédiaires*
- Cela pour s'adapter et survivre dans des *environnements différents dynamiques et hostiles*
- Ce qui laisse supposer que des objectifs secondaires émergent de l'objectif primaire (inné)

# Vue générale de l'interaction agent - environnement



# Architectures bio-inspirées selon le modèle POE [Sipper97]

- Axe P : capacité d'évolution
- Axe O : développement de l'individu à partir de son patrimoine génétique (sans interaction avec l'environnement)
- Axe E : apprentissage (de l'environnement) après formation de l'individu



# Exemple

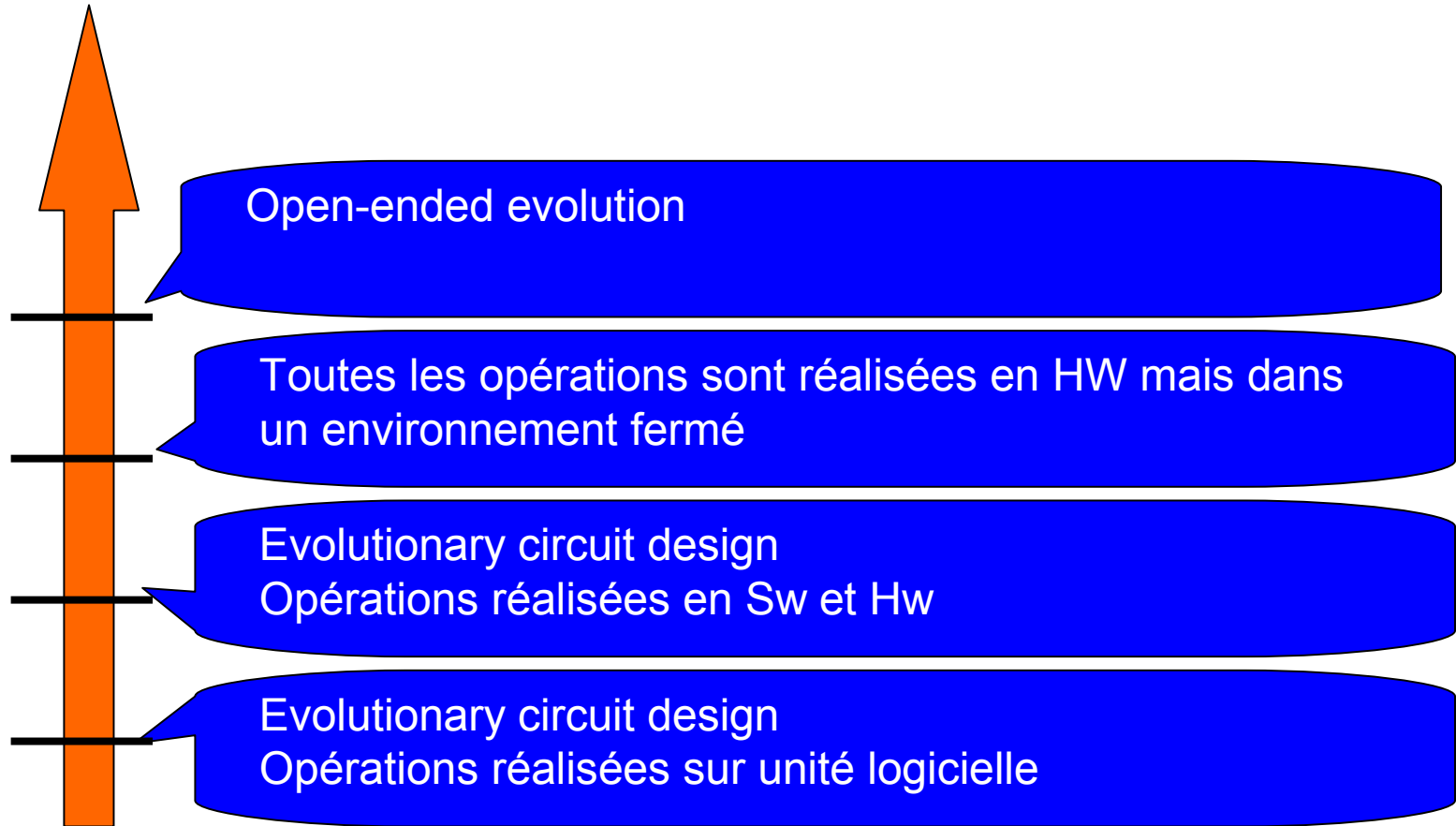
- Axe P : Algorithmes génétiques
- Axe O : Automates cellulaires
- Axe E : Réseaux de neurones

# Axe P

- Initialement appelé Evolvable hardware (Thompson)
- Evolutionary circuit design correspond mieux à l'utilisation des propriétés évolutionnistes appliquées au matériel (Sipper)
- Il servirait alors à la synthèse automatique de circuit (sans spécification)
- La présence physique d'un seul circuit (l'absence donc d'une réelle population qui coexiste) conduit au chargement (un par un) des individus d'une population virtuelle sur le circuit
- Ceci conduit à évaluer de manière totalement indépendante chaque individu contrairement aux organismes biologiques qui co-existent dans leur environnement
- Enfin les mécanismes évolutionnaires sont exécutés séquentiellement hors du circuit sur une unités logicielle centralisée !!

# Axe P

Phylogeny



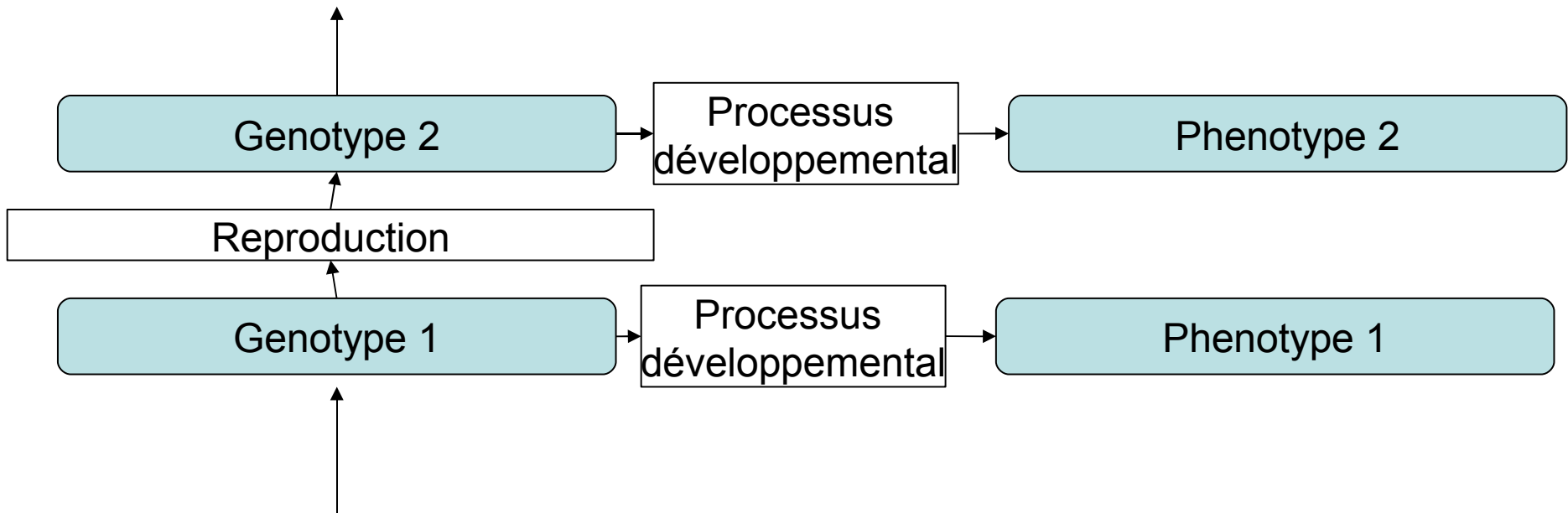


# Evolvable hardware, ... le vrai !

- En haut de l'axe P se trouve le processus d'évolution sans critère de fitness statiquement défini
- Celui-ci est plutôt un critère émergent, implicite et dynamique (qui peut être vu comme un sous but de celui de la survie de l'individu et de l'espèce).
- C'est le mécanisme ayant conduit à la formation d'ailes, des yeux ou du système nerveux
- De nouveaux systèmes apparaîtront si nous acceptons de ne pas contrôler initialement leur comportement et leur fonction

# Axe O

- Cet axe peut être considéré comme orthogonal à l'axe P



- D'un point de vue matériel, les mécanismes ontogénétiques exhibent des propriétés de :
  - Réplication
  - Auto-réparation
  - ...

# Replication vs. Reproduction

- La réplication est le processus de création d'un organisme identique en dupliquant le matériel génétique de la cellule mère dans une cellule fille
- La reproduction est un processus phylogénétique (évolutionniste) impliquant des opérateurs génétiques conduisant à un individu différent

# Autoreproduction et autoréplication

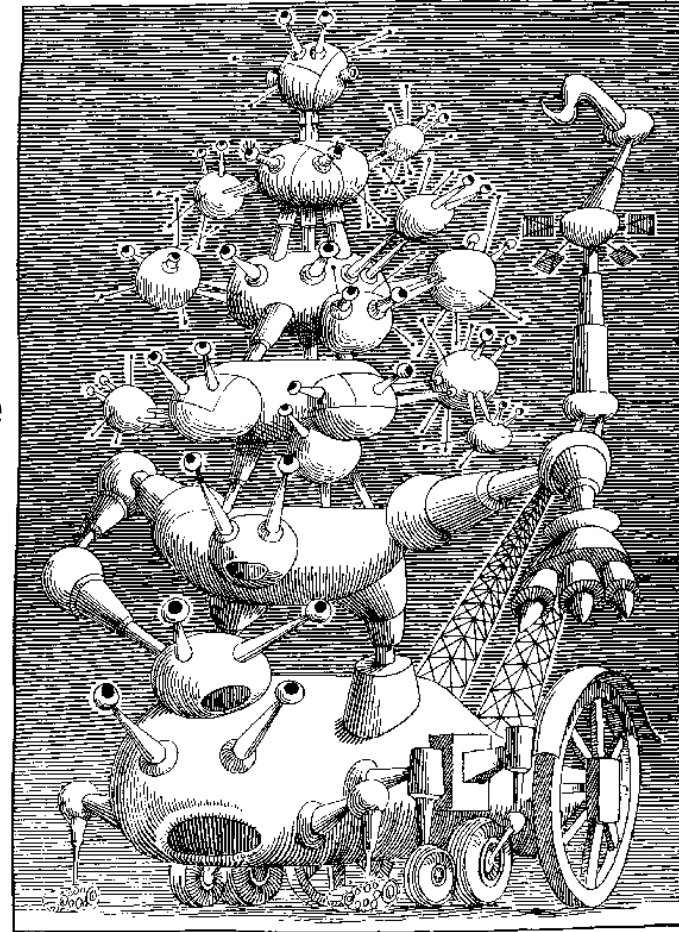
- Réplication : un système est réplicateur s'il engendre des unités identiques entre elles, mais différentes du système lui-même.
- Copie : il y a copie quand un système engendre un objet identique (isomorphe) à lui-même. La méthode utilisée n'est alors pas prise en compte,
- Autoreproduction : « lorsque par un processus couplé à son propre processus de production une unité en produit une autre dotée d'une organisation semblable à la sienne » (Varela, 89)
- Dans ce seul dernier cas, l'autoproduction est vue comme un moment de l'autopoïèse. Cette liaison entre le processus de fonctionnement et le mécanisme de production est une « clôture opérationnelle ».
- On parlera d'autoproduction des systèmes biologiques et d'autoréplication des systèmes artificiels.
- Nous considérerons comme propriété d'autoréplication : tout système doté d'une description de lui-même capable à la fois de l'interpréter et de la dupliquer.

# Machines ontogénétiques

Automates auto-réplicateurs de  
Von Neumann

# Automate autoréplicateur de Von Neumann

- Comment un système peut-il engendrer un système de complexité équivalente à lui-même, voire supérieure si l'on considère l'évolution ?
- 1948, Théorie générale et logique des automates,
- Machine universelle de Turing : capable d'interpréter toute description d'une autre machine (chapitre 1),
- Kinematon : robot capable, via un bras, de construire une copie de lui-même en utilisant des éléments mécaniques simples présents dans l'environnement.



# L'automate

- L'automate réplicateur dans les espaces cellulaires de Von Neumann utilise 29 états et se base sur un voisinage de 5 cellules => taille de 200 000 cellules
  - Ground state
  - Transition state (8 substates)
  - Confluent state (4 substates)
  - Ordinary transmission state (8 substates)
  - Special transmission state (8 substates)
- Automate synchrone et homogène
- Il a d'abord montré qu'il était possible de construire une machine universelle de Turing au sein d'un automate cellulaire, puis qu'il était possible de construire un constructeur universel (A+B+C).
- L'automate était très complexe et n'avait pas été réalisé.
- Aujourd'hui seulement on trouve des simulations de l'automate :  
<http://alife.santafe.edu/alife/software/jvn.html>





Comment réaliser l'automate auto-réplicateur ?

# Identification au processus évolutionnistes

- Besoin d'un automate de construction A capable de construire tout automate dont la description I lui est fournie.
- Dans ce contexte l'autoréplication devient un cas particulier de construction où l'on fournit à A une description de lui-même.
- Pour que l'automate soit auto-réplicateur, c'est-à-dire pour que le mécanisme de production soit autonome, il faut que la description I fasse partie de l'automate A : production de l'automate correspondant à la description, de la description elle-même et de l'automate A.
- Il faudrait donc avoir une description de la description ... Problème d'auto-référence.
- Donc, besoin d'un automate B, un copieur de description.
- Il y a donc également besoin d'un automate C qui coordonne les 2 autres automates.
- $D = A+B+C$  : C demande à A de construire l'objet spécifié par I, et à B de copier I et de l'insérer dans l'objet construit.
- Avec la description Id de A+B+C, on obtient  
 $E = A+B+C+Id = A+B+C+I(A+B+C)$  qui est l'automate auto-réplicateur
- La modification/mutation d'une partie de Id peut être à l'origine d'un nouveau type d'automate et permet de résoudre le problème de la production par un être d'un individu plus complexe que lui-même.
- L'auto-réplication est donc un fait d'organisation, indépendante de son substrat.

# Autoréplication et biologie

- La conception générale des automates autoreproducteurs a été étudiée du point de vue théorique par des mathématiciens et des ingénieurs éminents comme Von Neumann. Ces travaux ont montré que tout automate suffisamment complexe pour se reproduire lui-même devait nécessairement être composé de certains sous-systèmes strictement analogues à ceux que l'on trouve dans une cellule. Une de ces composantes serait une usine automatique capable de rassembler des matériaux bruts et de les transformer en un produit spécifié par une instruction écrite. C'est l'analogie d'un ribosome. Un autre sous-système serait un duplicateur, automate qui prend les instructions écrites et qui les copie. C'est l'analogie du système de réplication de l'ADN. Il y aurait aussi une instruction écrite contenant des spécifications du système complet, soit l'analogie de l'ADN

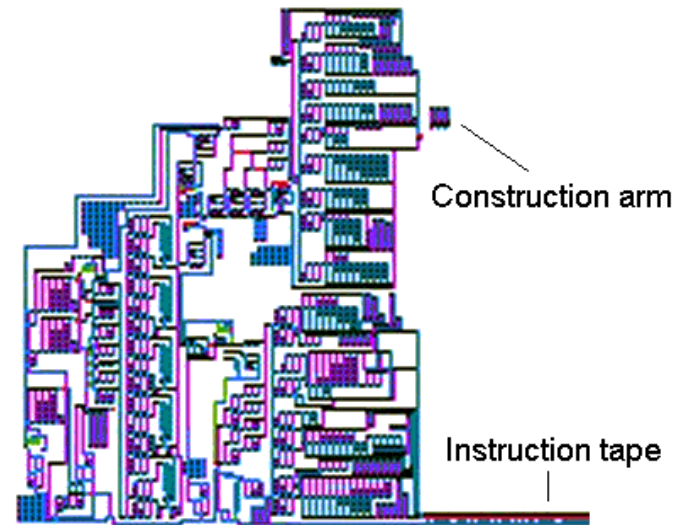
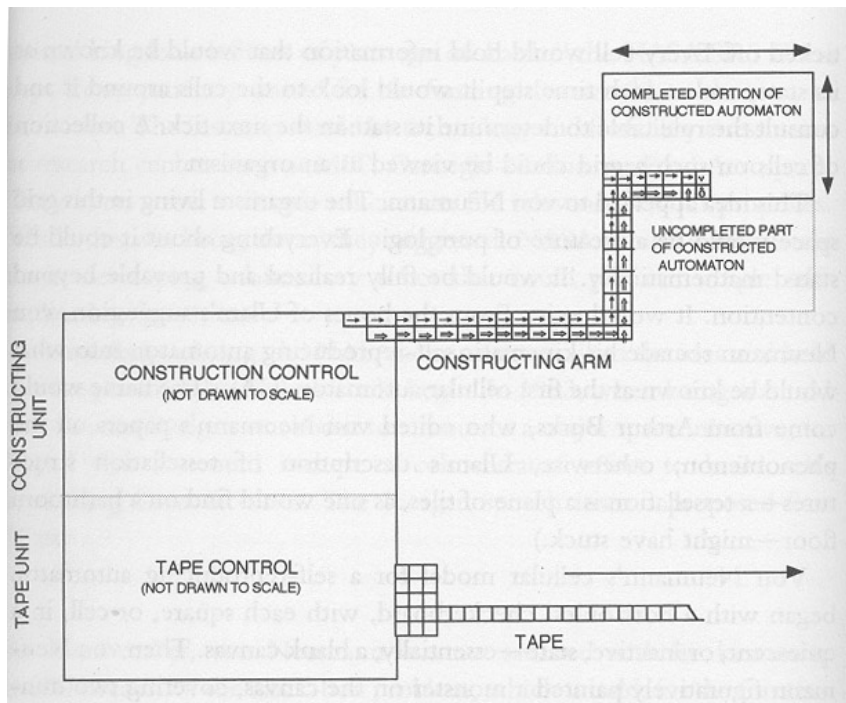
# Et là, ... on diverge !

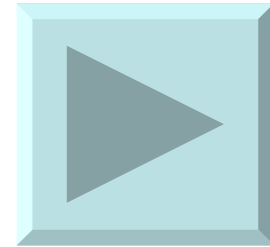
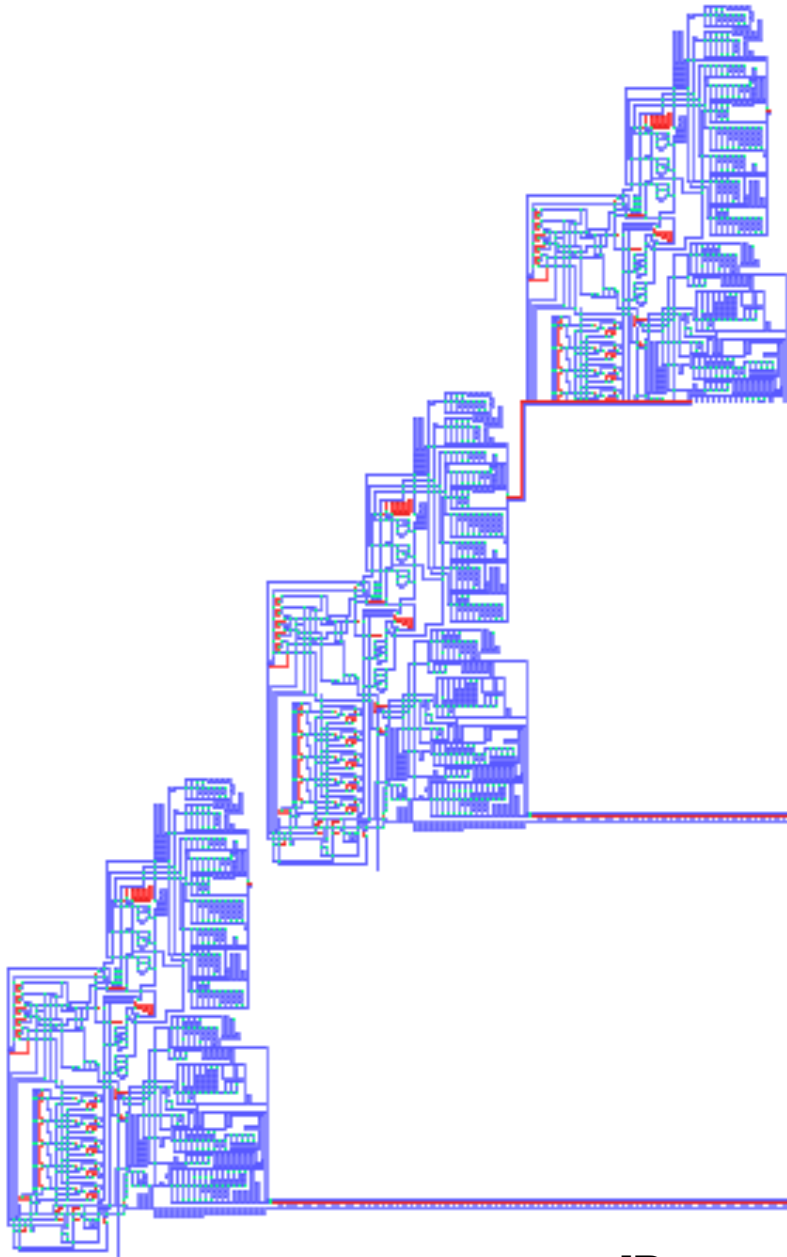
- La sélection cumulative peut donc fabriquer la complexité, ce que ne peut faire la sélection en une seule étape. Mais la sélection cumulative ne peut fonctionner à moins qu'il y ait une amorce quelconque de mécanisme de réplication et un minimum de pouvoir répliqueur, et le seul mécanisme de réplication dont nous avons connaissance semble trop compliqué pour avoir accédé à l'existence par rien de moins que de nombreuses générations de sélection cumulative ! D'aucuns voient là un vice fondamental de toute la théorie de l'horloger aveugle (l'évolution due uniquement au hasard). Ils y voient la preuve ultime qu'il a dû y avoir à l'origine un concepteur, non pas quelque horloger aveugle, mais un horloger surnaturel et qui voit loin
- Dawkins, Richard. *L'Horloger aveugle*,

# Mmmouai...

- Mais bien évidemment tout Dieu capable de concevoir intelligemment quelque chose d'aussi complexe que la machine répliquatrice ADN/protéine aurait dû être au moins aussi complexe et organisé que cette machine elle-même. Et c'est encore plus vrai si l'on suppose qu'il soit de surcroît capable de fonctions aussi avancées que l'écoute des prières et le pardon des péchés. Expliquer l'origine de la machine ADN/protéine en invoquant un Concepteur surnaturel revient à n'expliquer rien du tout, car l'origine de ce Concepteur reste inexpliquée. On est obligé de dire quelque chose du genre " Dieu a toujours existé ", et si l'on se permet ce genre d'échappatoire facile, on pourrait tout aussi bien dire " l'ADN a toujours existé ", ou " la vie a toujours existé " et tirer un trait
- Dawkins, Richard. *L'Horloger aveugle*,

# Bon, la solution!





# Boucles de Langton

- Première réduction de la complexité par E. Codd proposant un automate à 8 états,
- A la fin des années 70, C. Langton a réduit au minimum l'automate.
- Exemple, en se fondant sur l'observation des organismes élémentaires, il abandonne l'idée de constructeur universel.
- Le processus qui structure l'individu est aussi celui qui construit les descendants (clôture opérationnelle).

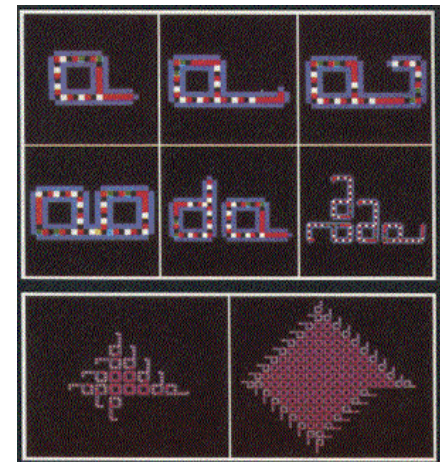


# Structure des boucles de Langton

- L'automate est constitué de 2 membranes (cellules à l'état 2) enserrant une bande de données.
- A chaque itération, les données avancent d'une cellule.
- Certaines séquences forment des signaux.
- Lorsque le signal arrive au croisement, il est dupliqué.
- Il n'était plus nécessaire de construire une tête de lecture se déplacent sur la bande. On se passe complètement de tête de lecture !
- On cherche ici une construction admettant une instruction qui est à la fois elle-même et description d'elle-même.
- L'automate est donc plus simple : 8 états, voisinage de 5 et 219 règles de transition.
- La structure minimale capable de s'auto-répliquer s'inscrit dans un rectangle de 10x15 cellules.

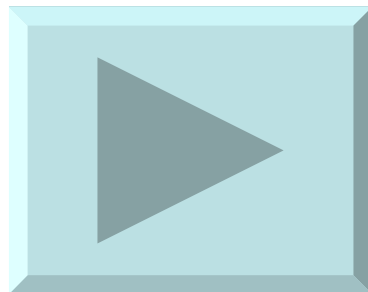
```

2 2 2 2 2 2 2 2
2 1 7 0 1 4 0 1 4 2
2 0 2 2 2 2 2 2 0 2
2 7 2           2 1 2
2 1 2           2 1 2
2 0 2           2 1 2
2 7 2           2 1 2
2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2
2 0 7 1 0 7 1 0 7 1 1 1 1 1
  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
    
```



# Les automates autoréPLICATEURS

- Les règles des automates :
  - <http://code.google.com/p/ruletablerepository/>
- Applets :
  - <http://necsi.org/postdocs/sayama/sdsr/java/>
  - <http://golly.sourceforge.net/> :



# Architecture multi-cellulaire

- Les automates précédents sont des organismes unicellulaires dans la mesure où ils sont composés d'un seul génome qui décrit la machine entière.
- Mange et. al ont proposé une nouvelle architecture appelée Embryonics basée sur 3 mécanismes élémentaires :
  - Organisation multicellulaire
  - Différentiation cellulaire
  - Division cellulaire

# Axe E

The background of the slide features a complex network of interconnected nodes and lines, resembling a neural network or a web. The nodes are highlighted with a bright orange glow, and the lines are thin and dark, creating a dense, intricate pattern. The overall color scheme is a mix of purple, blue, and orange, giving it a futuristic and scientific appearance.

- Les réseaux de neurones artificiels viennent de l'étude du principe épigénétique du système nerveux
- Le système immunitaire biologique est capable d'apprendre, de reconnaître et d'éliminer les cellules étrangères qui envahissent le corps

# Instanciación material du modèle POE

Exécution

Phenotype

Différentiation

Mapping

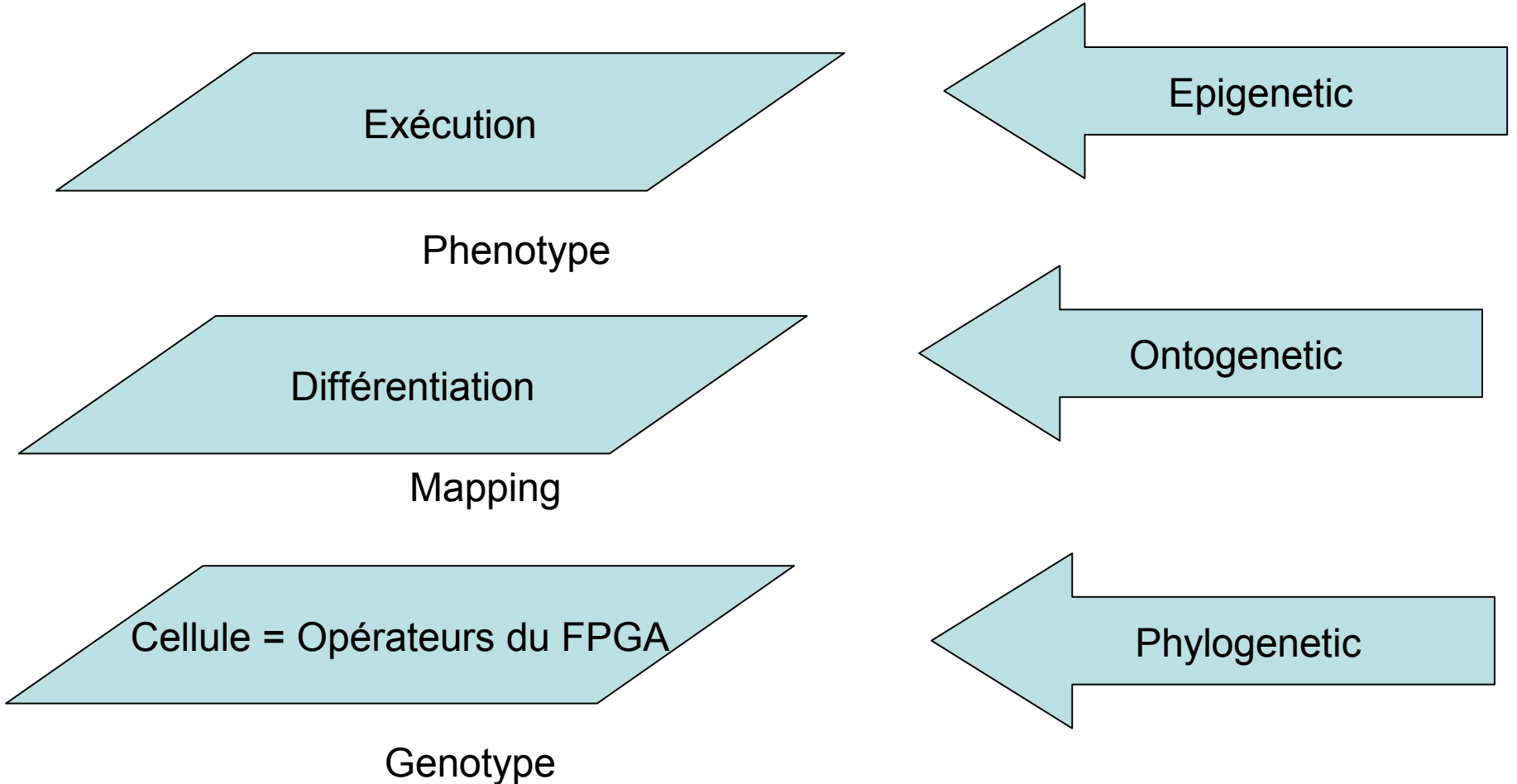
Cellule = Opérateurs du FPGA

Genotype

Epigenetic

Ontogenetic

Phylogenetic



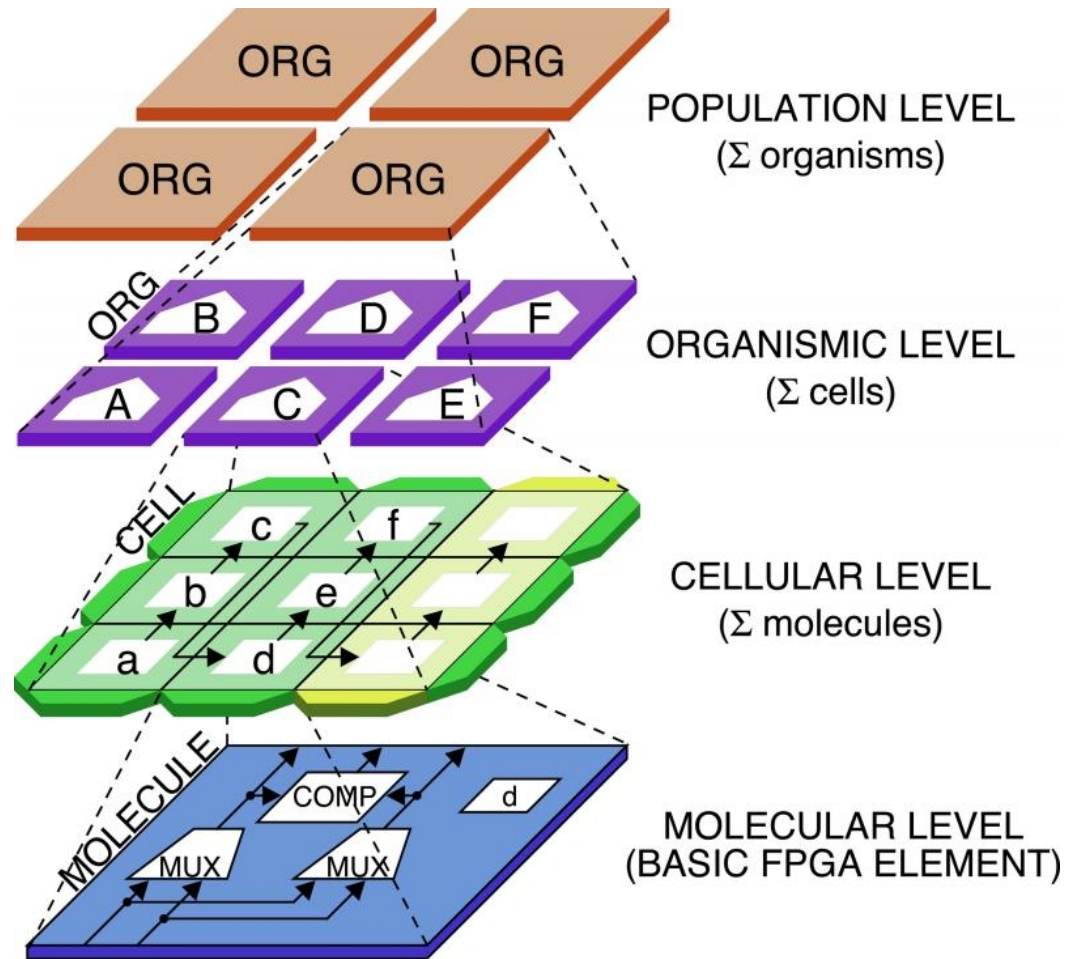
# Exemple de Embryonics

[Mange97]

# Introduction

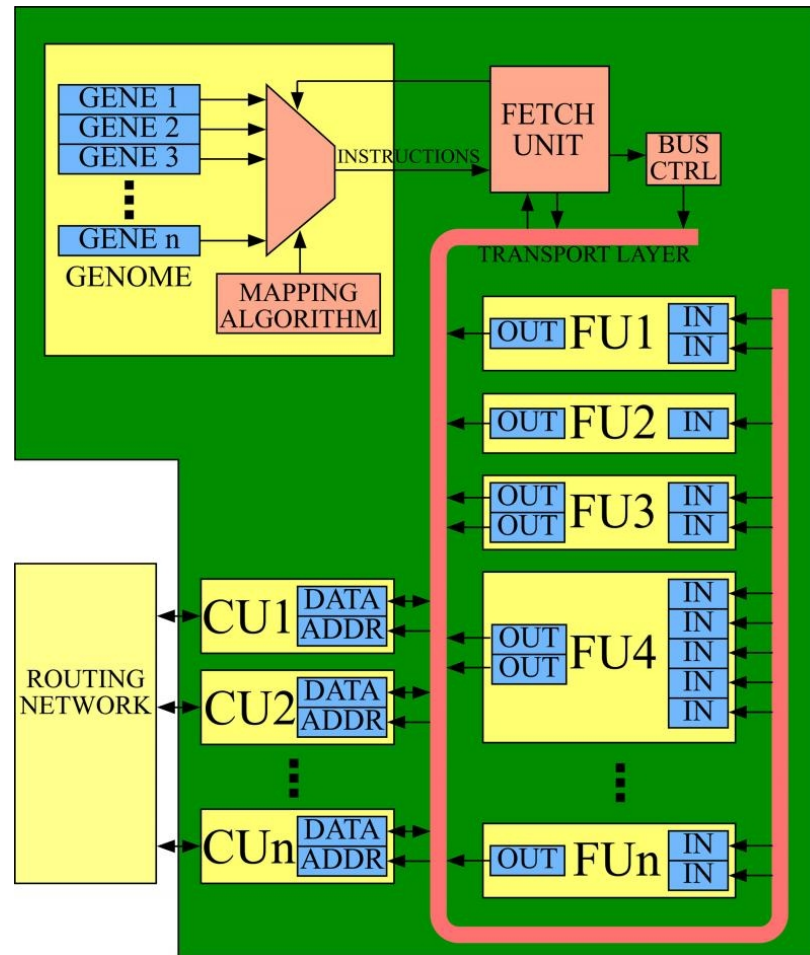
- Le corps humain est constitué de  $60 \cdot 10^{12}$  cellules
- Le génome contenu dans chaque cellule contient  $2 \cdot 10^9$  caractères.
- A chaque instant, dans chaque cellule, le génome est décodé pour produire les protéines nécessaires à la survie de l'organisme
- L'exécution parallèle de 60 trillion de génomes se fait sans cesse de la naissance de la première cellule jusqu'à la mort.

# Organisation d'Embryonics





# Architecture d'Embryonics



# Autres travaux

<http://www.elec.york.ac.uk/intsys/projects/inspired.html>

# Un exemple local

