

# Déterminisme et Imprédictibilité

*Hervé ZWIRN*

*Université Paris Diderot, LIED*

*ENS Cachan*

*IHPST*

*Fleurance, 3 aout 2013*

# Déterminisme et Imprédictibilité

## *Un peu d'histoire :*

### *- Aristote (384 – 322 av JC)*

*Distinction entre le monde sublunaire et le ciel*

- Le ciel est parfait et immuable*
- Le monde sublunaire est incompréhensible et imprévisible*

### *- Galilée (1564 – 1642) et Newton (1642 – 1727)*

*Unification du monde céleste et du monde terrestre*

- Existence de lois universelles*
- Equations différentielles*
- Déterminisme*

# Déterminisme et Imprédictibilité

## *Le déterminisme :*

*"Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger des atomes : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé seraient présents à ses yeux."*

*Laplace, Essai philosophique sur les probabilités [1814].*

# Déterminisme et Imprédictibilité

Vision chaotique du monde, selon laquelle ce qui se produit n'est dû qu'aux caprices imprévisibles de forces qui nous échappent



Vision d'ordre parfait où tout est régi par des lois qui nous sont accessibles et qui permettent de calculer, en principe, l'évolution de tout système et même de l'Univers pour l'éternité (vision de la fin du XIX<sup>ième</sup> siècle)

# Déterminisme et Imprédictibilité

Dans cette vision :

- Déterminisme  Prédictibilité
- Lois simples  Comportements simples

Premier choc : Poincaré (1892) puis Lorenz (1960)

Chaos déterministe

Déterminisme  Prédictibilité

# Amplification des petites différences

Chaos déterministe



Sensibilité aux conditions initiales

Amplification exponentielle des petites différences :

Quelle que soit la proximité initiale de 2 points de départ, le comportement du système finit par être totalement différent.

→ Horizon temporel de prédiction



Pendule magnétique

# Déterminisme et Imprédictibilité

Deuxième choc : Mécanique Quantique (1925)

Les lois de la nature sont probabilistes par essence :

 indéterminisme

Troisième choc : systèmes complexes

Lois simples  Comportements simples

# Déterminisme et Imprédictibilité

## *Les sources d'imprédictibilité*

- 1. Indéterminisme (Physique quantique)*
- 2. Déterminisme*
  - Incertitude / Connaissance imparfaite de l'état initial*
  - Sensibilité aux conditions initiales*
  - (Complexité trop grande)*



# Déterminisme et Imprédictibilité

*Une nouvelle source d'imprédictibilité  
dans les systèmes déterministes simples*

*L'irréductibilité computationnelle*

*The behavior of the system can be found only by direct simulation or observation: No general predictive procedure is possible.*

Wolfram S., *Undecidability and intractability in theoretical physics*, Vol 54, N 8. Phys. Rev. Letters, 1985

# Déterminisme et Imprédictibilité

Predire :

- connaitre le résultat avant le système lui-même
  - calculer plus vite que le système
- trouver des raccourcis

Intuitivement un système sera CIR si l'algorithme qui le simule à travers une stricte imitation étape par étape ne peut pas être court-circuité pour prédire directement le résultat de l'étape  $n$ , si le seul moyen de savoir ce qui se passe à l'étape  $n$  est de suivre pas à pas le processus qui se déroule jusqu'à arriver à l'étape  $n$ . Cela signifie qu'il n'existe aucun raccourci.

*Automates cellulaires : Cadre avec un temps discret*

*Systèmes Complexes*

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

## SYSTEME COMPLEXE ?

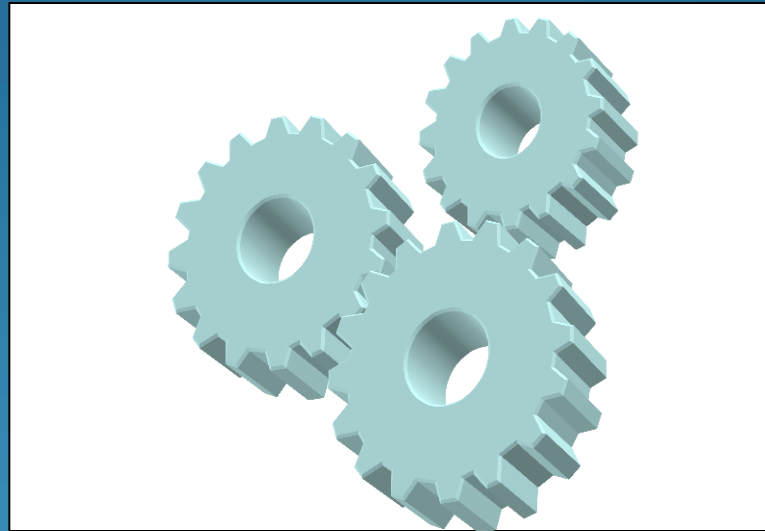
Un système complexe est composé de constituants qui interagissent de manière non triviale (non linéaire, boucles de rétroaction...)

# Complexe $\neq$ Compliqué

1. Simple
2. Compliqué
3. Complexe

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

Simple



On peut suivre la propagation du mouvement de proche en proche

On peut facilement comprendre le comportement du système car on peut simuler mentalement sa dynamique

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

## Compliqué



On peut analyser sa fonction comme composée de plusieurs fonctions distinctes qui se combinent. On peut tracer le fonctionnement de chacun des constituants de manière indépendante

Une fois décomposé convenablement, on peut comprendre (même si ce n'est plus facile) le fonctionnement du système car on peut encore simuler mentalement la manière dont les différentes fonctions donnent naissance à la fonction principale (schéma mental)

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

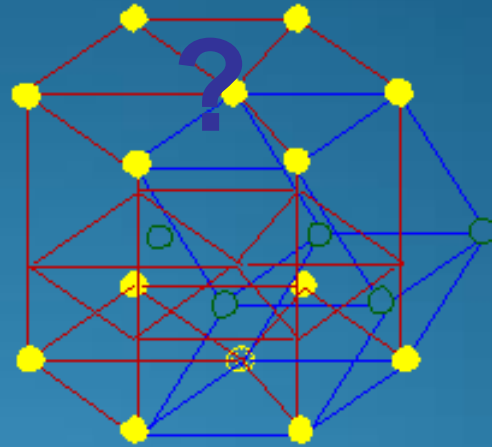
Compliqué



- ❖ Il est possible de découper le système en sous-systèmes (plus simples) dont le comportement peut s'analyser indépendamment les uns des autres.
- ❖ On peut ensuite reconstituer le comportement global comme une succession ou une juxtaposition des sous comportements.

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

## Complexe

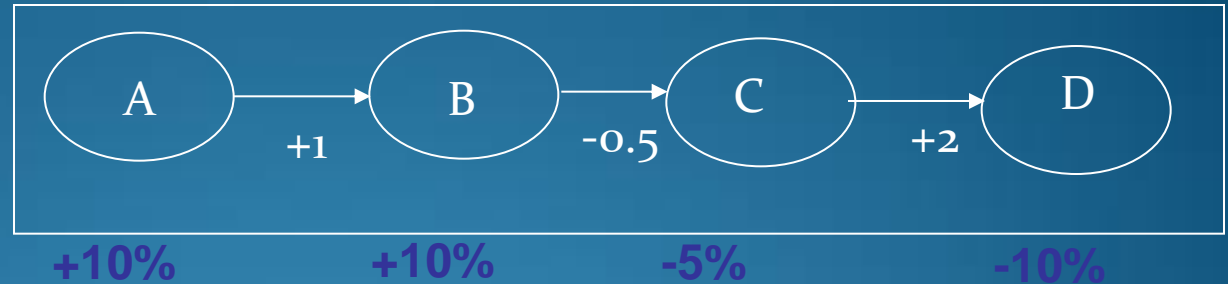


- ❖ Le comportement global ne peut plus être analysé comme succession ou juxtaposition de comportement de sous-systèmes indépendants
- ❖ Tous les constituants concourent simultanément au comportement du système
- ❖ On ne peut découper le système pour l'étudier :

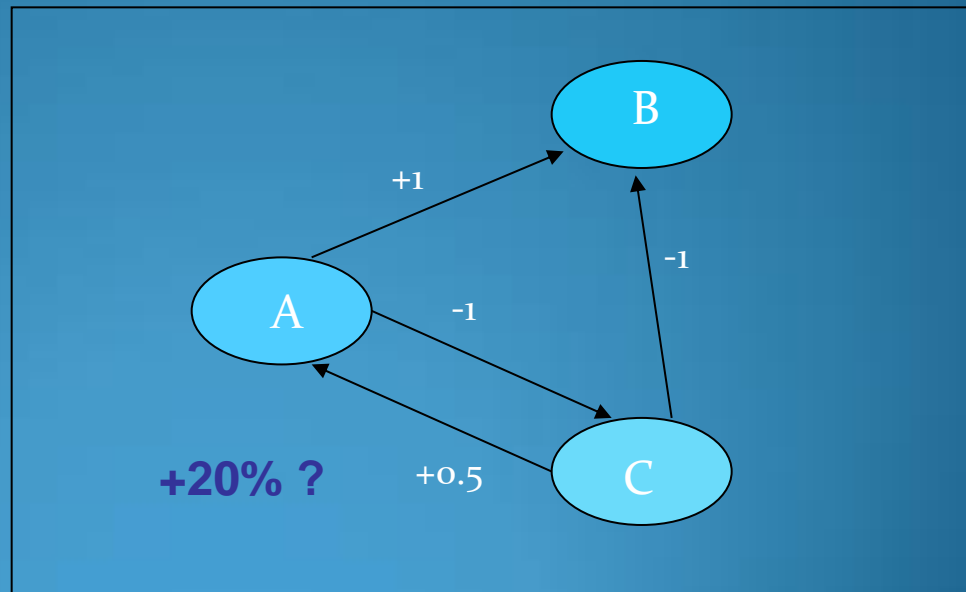
**comportement holistique**

# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

Simple



Complexe





# Qu'est-ce qu'un système complexe ?

## comportement holistique



Changement de la nature de  
compréhension du système

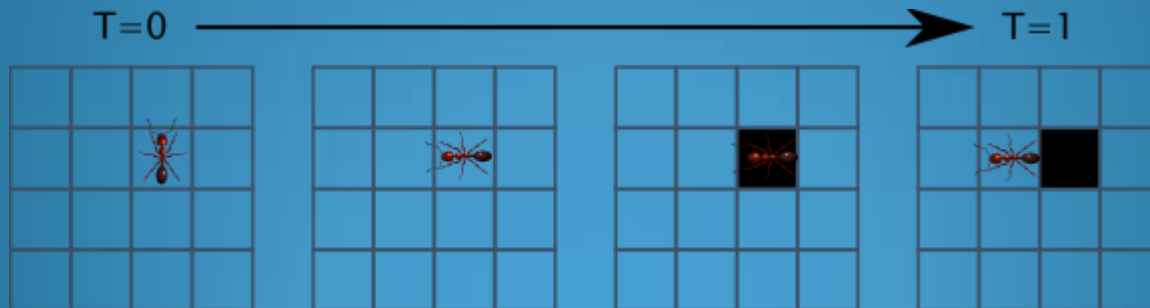
La compréhension intuitive disparaît

# Déterminisme et Imprédictibilité

## La fourmi de Langton

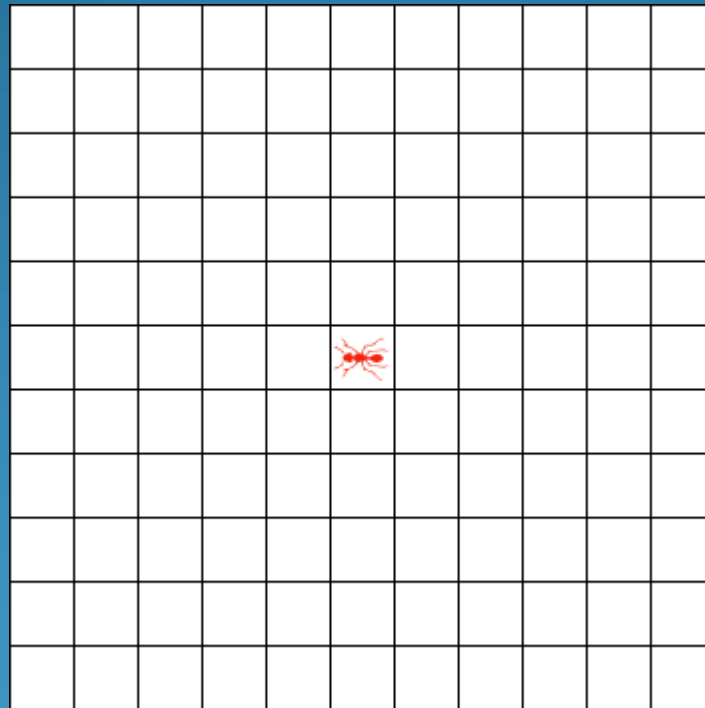
REGLES:

- La fourmi se déplace sur les cases d'une grille à gauche, à droite, en haut, en bas.
- Si la fourmi est sur une case noire, elle tourne de  $90^\circ$  vers la droite, change la couleur de la case en blanc et avance d'une case.
- Si la fourmi est sur une case blanche, elle tourne de  $90^\circ$  vers la gauche, change la couleur de la case en noir et avance d'une case.



# Déterminisme et Imprédictibilité

## Fourmi de Langton



# Déterminisme et Imprédictibilité



Step: 199

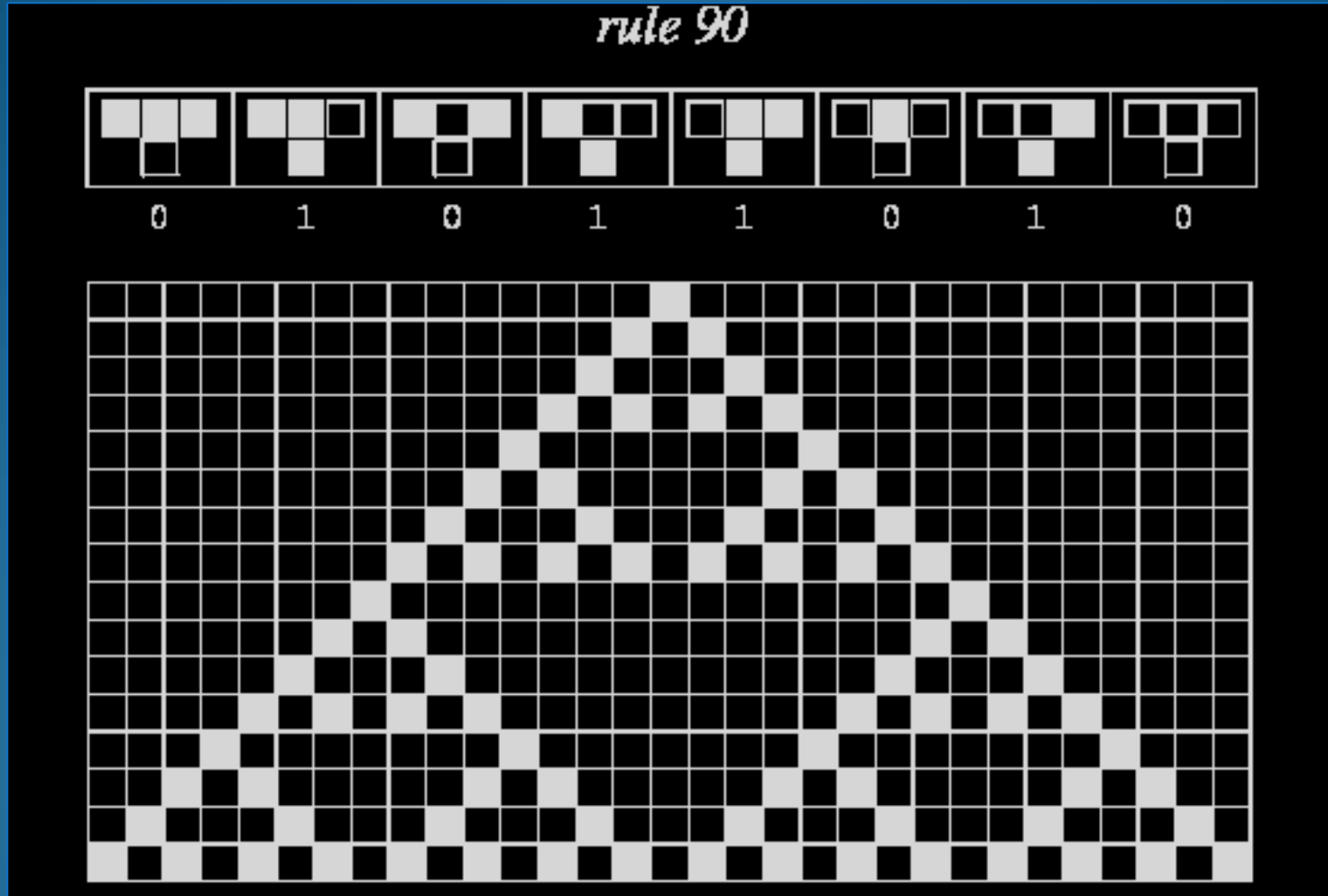
# Déterminisme et Imprédictibilité

## La fourmi de Langton

Après environ 10 000 itérations, la fourmi part à l'infini en construisant une sorte d'autoroute formée de 104 pas qui se répètent

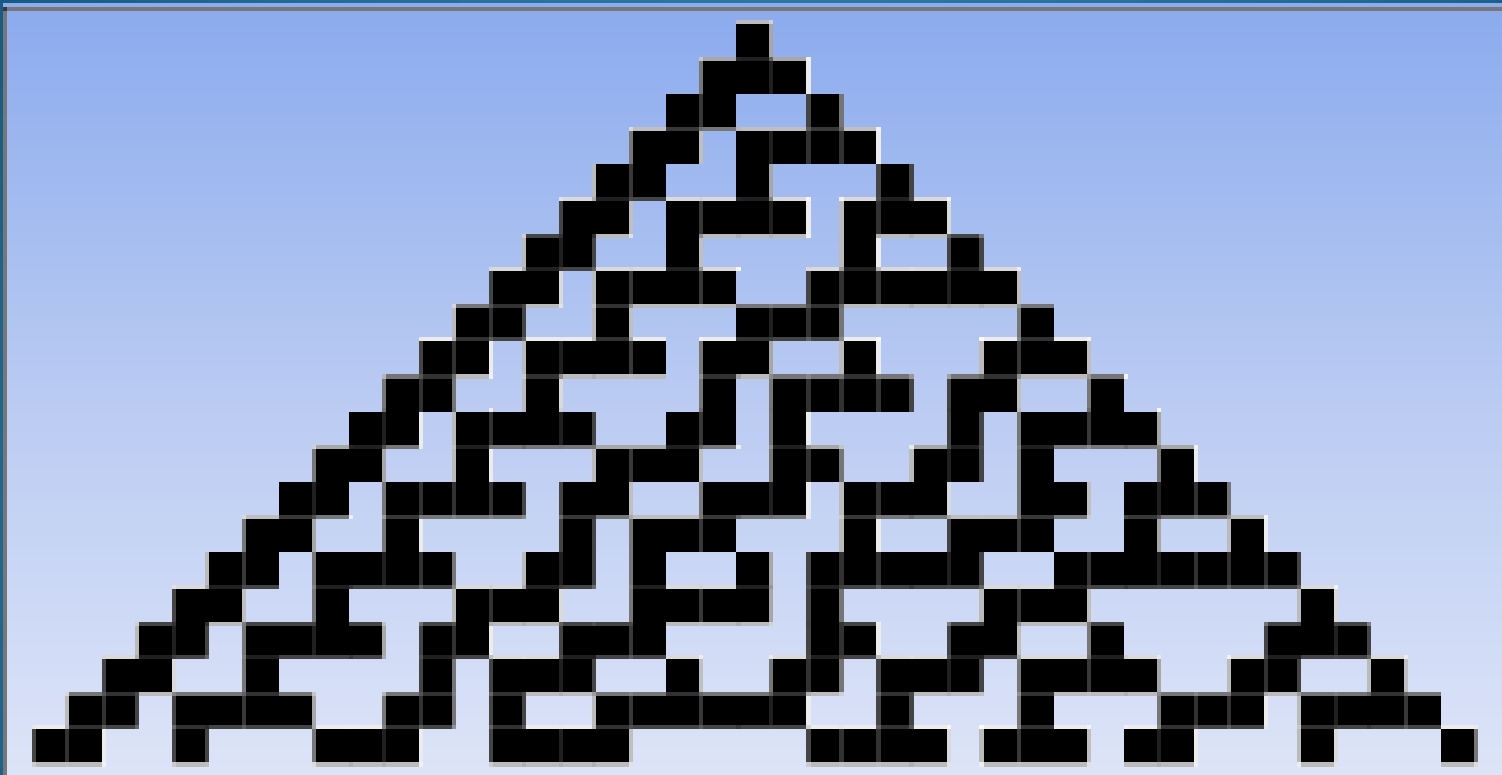
Personne ne sait aujourd'hui prouver ce résultat qui reste un constat d'observation

# Déterminisme et Imprédictibilité



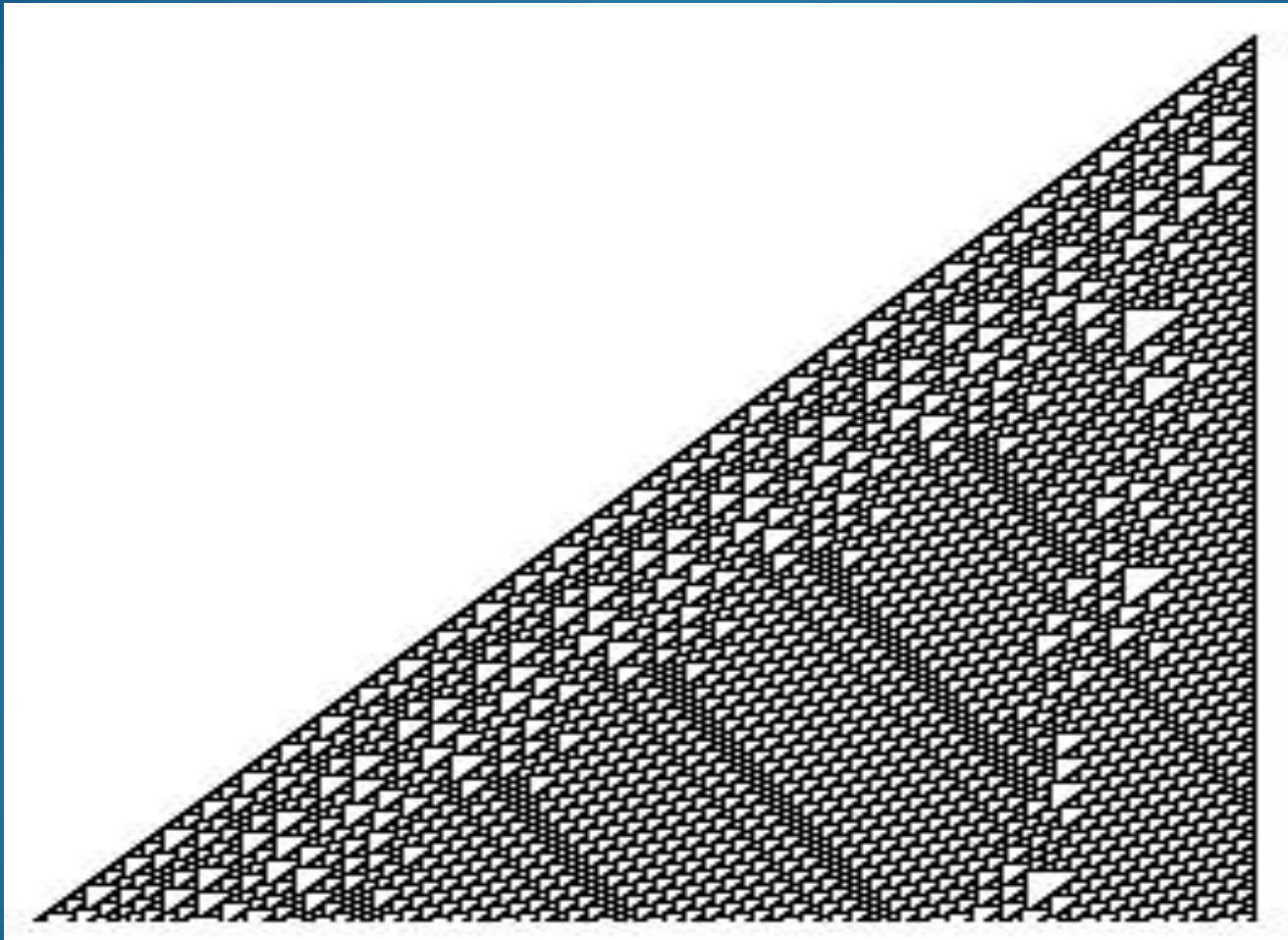
# Déterminisme et Imprédictibilité

Règle 30



# Déterminisme et Imprédictibilité

## Règle 110



Hervé ZWIRN

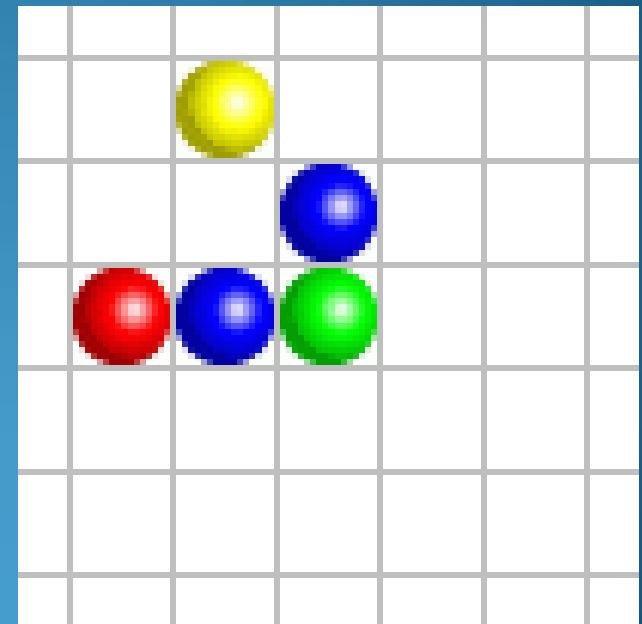
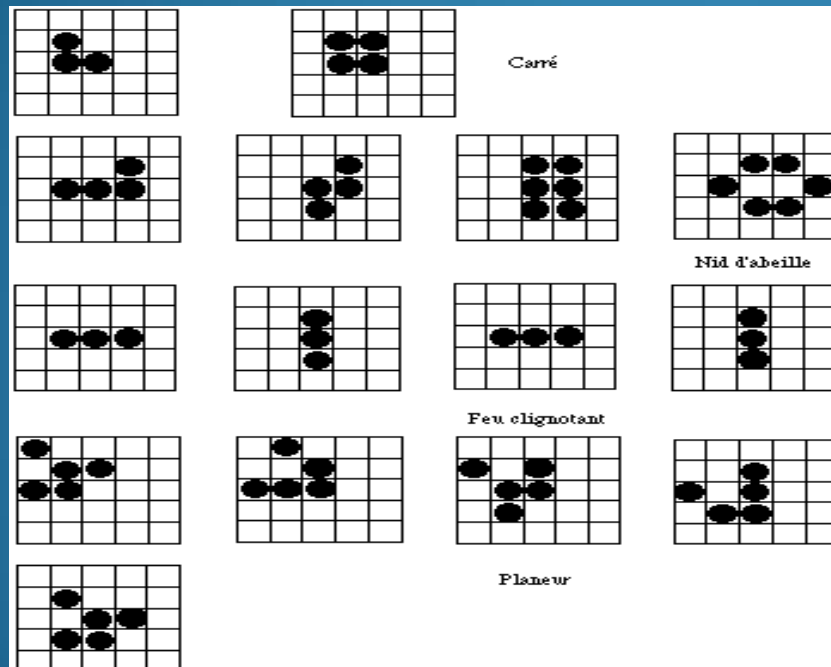


# Déterminisme et Imprédictibilité

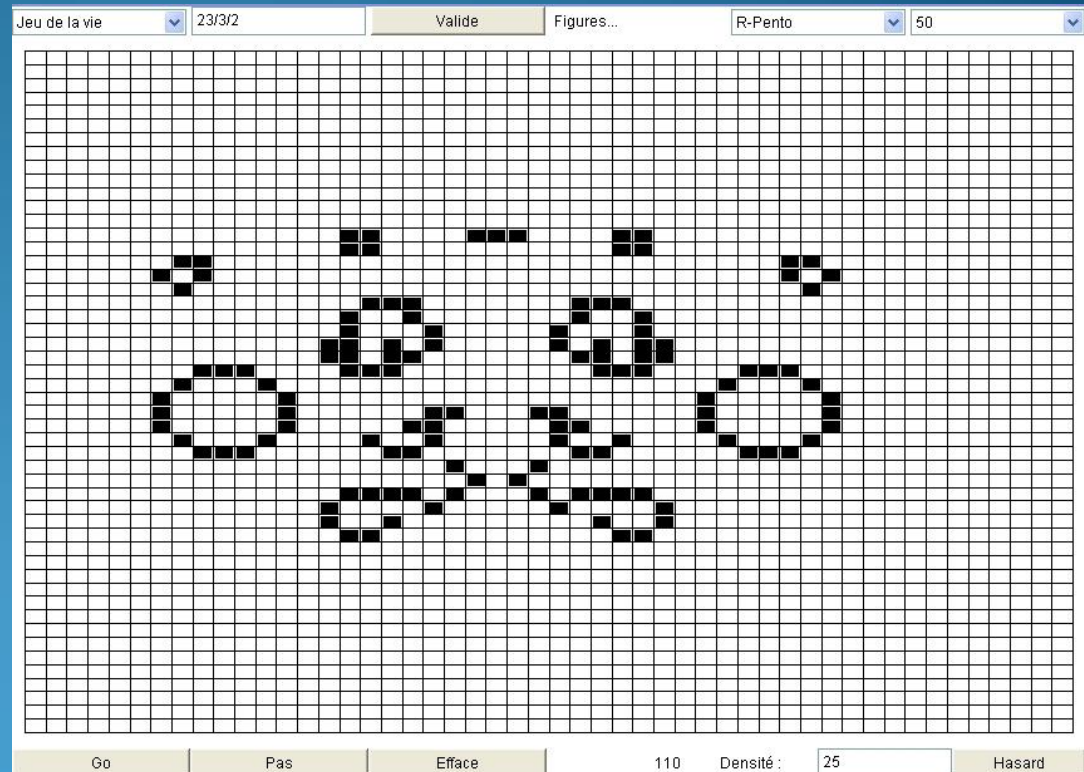
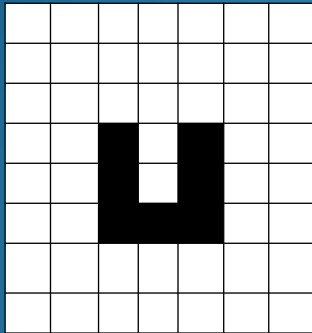
## Le jeu de la vie de Conway

Une cellule morte possédant exactement trois voisines vivantes devient vivante (elle naît).

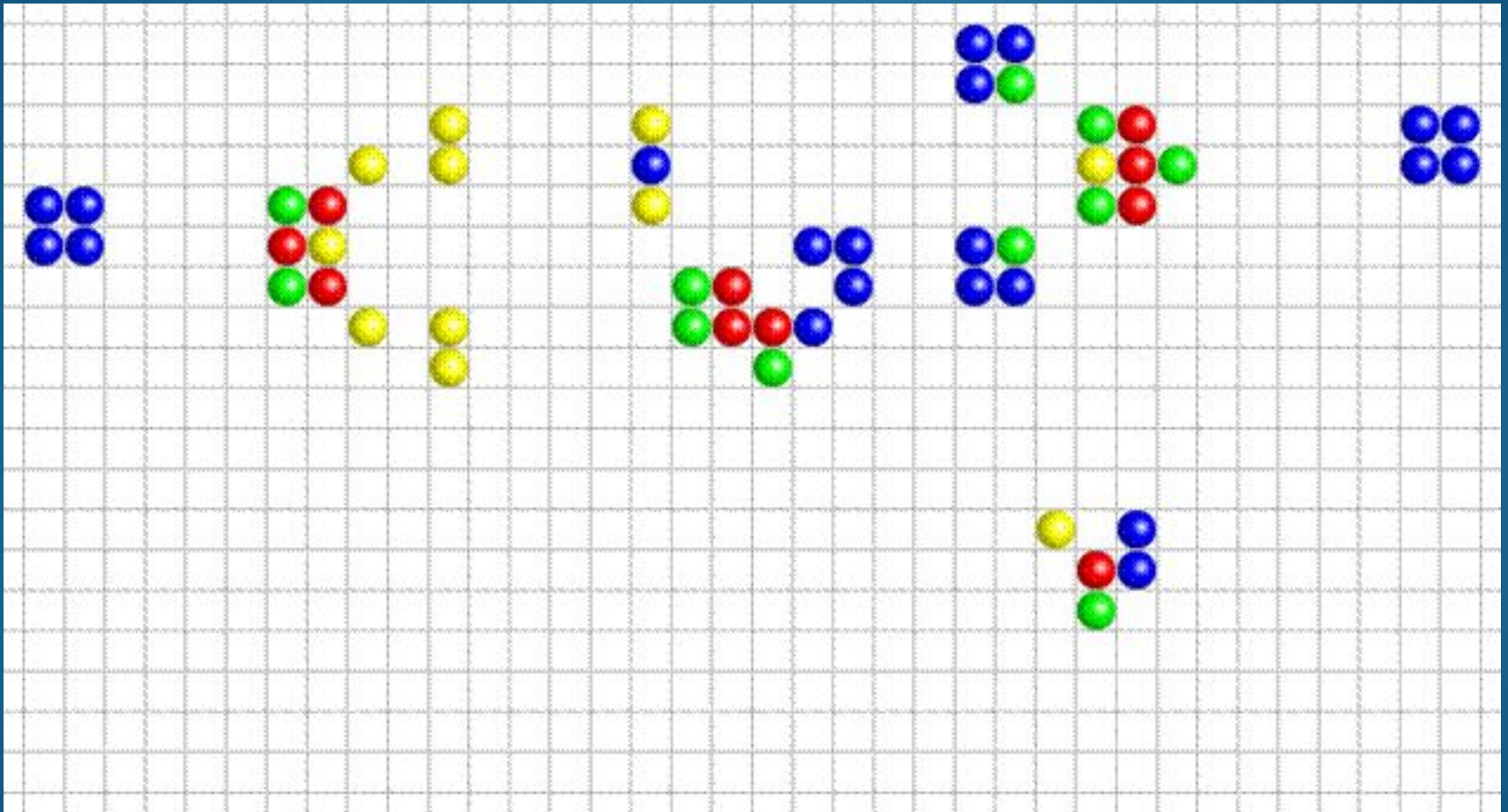
Une cellule vivante possédant deux ou trois voisines vivantes le reste, sinon elle meurt.



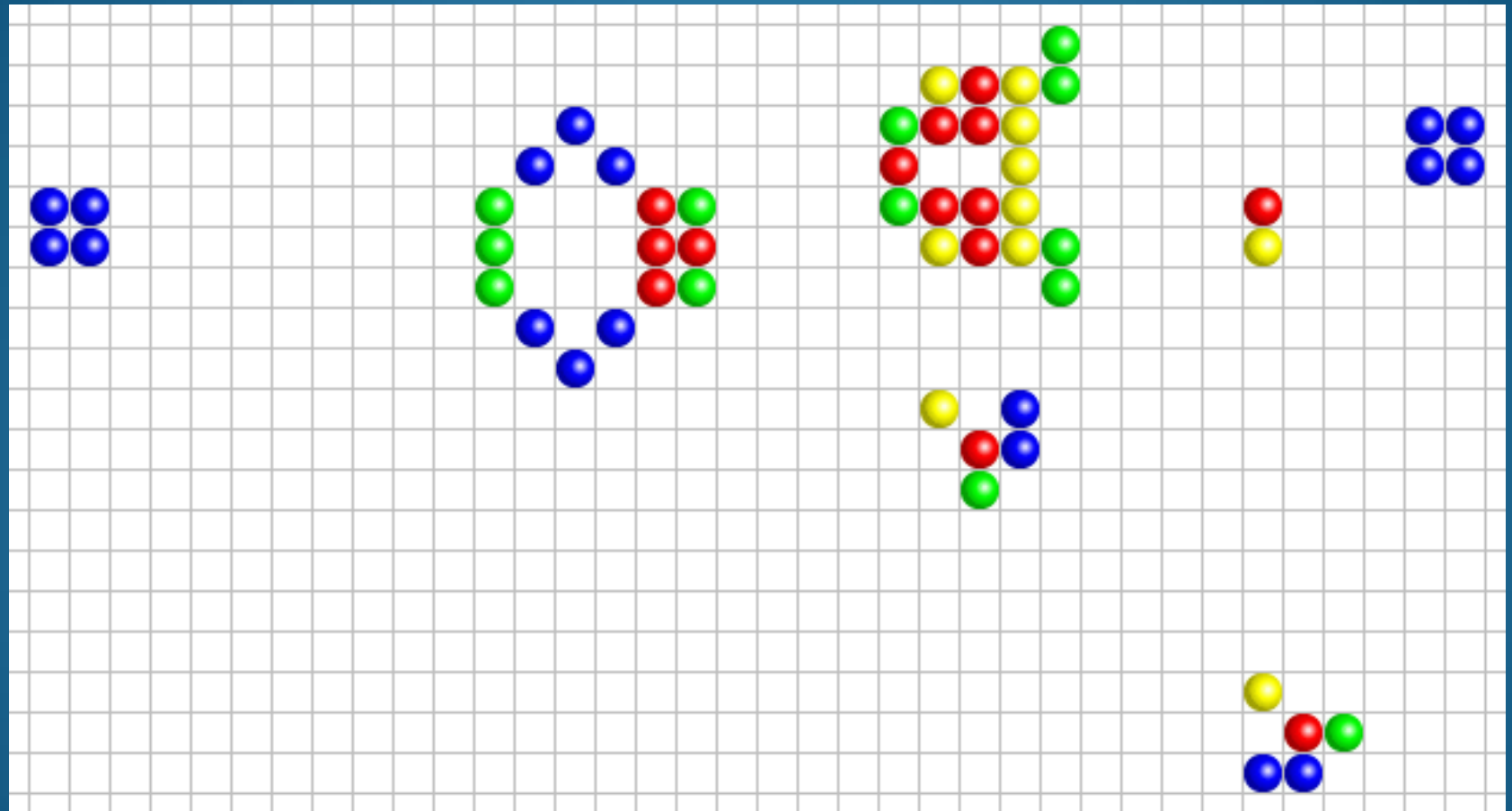
# Le jeu de la vie de Conway



# Déterminisme et Imprédictibilité



# Déterminisme et Imprédictibilité



# Déterminisme et Imprédictibilité

*Pourquoi s'intéresser à l'irréductibilité computationnelle ?*

## ❖ *Algorithme :*

- *Est-ce qu'il existe une définition robuste ?*
- *Est-ce qu'il y a réellement des phénomènes CIR ?*

## ❖ *Raisons philosophiques :*

- *Comprendre le comportement des systèmes complexes*
- *Comprendre les phénomènes émergents*

# Un vol d'oiseaux

- Ils obéissent à 4 règles simples :
  - Séparation: éviter de rentrer dans ses voisins
  - Alignement: voler dans la même direction que ses voisins
  - Cohésion: rester proche du centre de gravité de ses voisins
  - Evitement: s'éloigner d'un éventuel obstacle

Vol d'oiseaux évitant des obstacles





# Déterminisme et Imprédictibilité

*Exemples de phénomènes considérés comme émergents :*

- La liquidité de l'eau,
- La superfluidité de l'hélium à 2.17 °K,
- La superconductivité du mercure à 4.2°K,
- La forme des flocons de neige qui suit des motifs symétriques complexes,
- La forme et le comportement d'un vol d'oiseaux
- Un arc en ciel ou une tornade,
- Un glisseur dans le jeu de la vie,
- Les anneaux de Saturne,
- La vie,
- Les yeux ou les ailes des animaux,
- La conscience.

# Déterminisme et Imprédictibilité

- *Qu'est ce qu'un phénomène émergent ?*
- ✓ *2 niveaux:*
  - *individuel / collectif*
  - *micro / macro*
- ✓ *Connaissance des règles pour le niveau micro*
- ✓ *Imprédictibilité apparente des phénomènes se produisant au niveau supérieur*



# L'émergence

## *Emergence*

- *Caractéristique qui apparaît au niveau global et qui est difficilement prédictible à partir de la connaissance des règles du niveau inférieur*
- *Des lois simples entre constituants engendrent un comportement qui va au-delà des capacités individuelles de chacun d'entre eux*
- *Pertinent au niveau global mais dépourvu de sens au niveau inférieur*

## *Explication ?*



# Comprendre les phénomènes émergents

*Comprendre un phénomène c'est :*

- Identifier les mécanismes qui régissent son comportement*
- Pouvoir relier mentalement l'état initial et l'état final*

*Différence entre automate simple et jeu de la vie*

*Nécessité de simulation sur un ordinateur  
⇒ la sensation de compréhension disparaît.*

*Plus de compréhension intuitive ⇒ Emergence*

# 2 concepts d'émergence

1. **Emergence subjective** : Il est trop difficile de suivre mentalement la manière dont le phénomène se produit.

Cette limitation provient de nos capacités humaines

2. **Emergence objective** : Il n'y a pas de raccourci pour savoir comment le système se comporte. Dynamique computationnellement irréductible.

Emergence subjective  $\neq$  Emergence objective ( $\pi$ )

Emergence objective  $\neq$  Emergence subjective

# Comprendre les phénomènes émergents ?

Si prédire c'est simuler

Si la simulation est computationnellement irréductible



Impossibilité de prédire

Affaiblissement du concept de compréhension

La vie ?

La conscience ?