

Faculté des Sciences Exactes
et la nature et de la vie
Université Mohammed
Khider-BISKRA
Département d'informatique

Cours de Master2

Image et vie artificielle

Module :
Vie Artificielle

Pr. CHERIF Foudil

Contenu du programme(1)

- **Code : VA**
- ***Unité d'Enseignement :***
- **Nombre de crédits : 05.**
- **Coefficient de la Matière : 02.**
- **Mode d'évaluation.**

70 % Examen + 30 % de Travail personnel.

Objectifs de l'enseignement.

- Cette matière permet de sensibiliser les étudiants aux techniques de la vie Artificielle, qui en prenant leur inspiration sur le “vivant” permettent de construire des systèmes complexes évolutifs et adaptatifs.
- Le but est de décrire facilement le comportement des acteurs évoluant dans un monde virtuel. Ce comportement peut-être issu de différentes modalités de contrôle pour les entités (agents) dirigées ou pour les entités autonomes, par la simulation de comportements, adaptatifs et/ou coopératifs et/ou résultant d'un apprentissage.

Contenu du programme(1)

- **PARTIE 1 Cours.**
- **Vie Artificielle**
- 1) Notion de systèmes complexes et d'émergence.
- 2) Approches de conception de systèmes
 - Impératives, déclaratives, émergentes, SMA.
- 3) Panorama "Vie" Artificielle".
- 4) - Techniques des Générateurs
 - Réaction / diffusion ;
 - Automates cellulaires ;
 - L-Systems.

Contenu du programme(3)

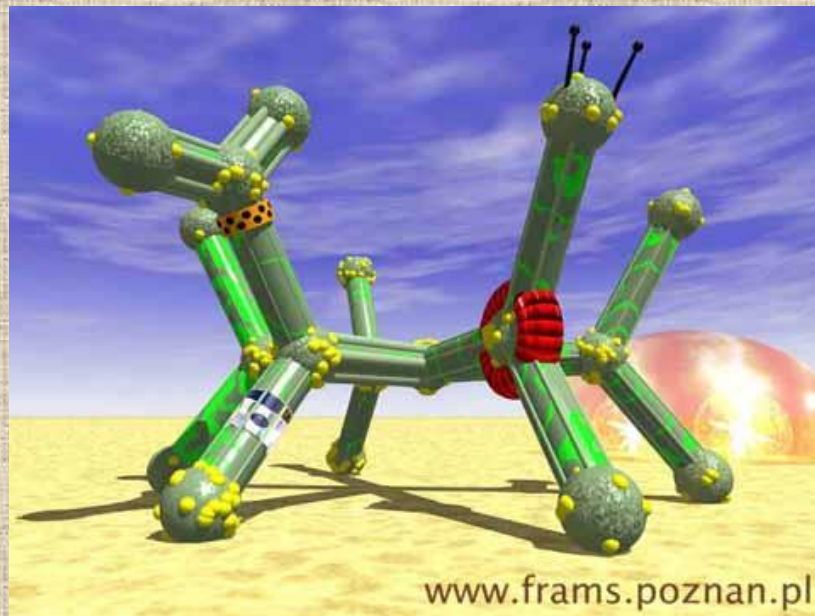
- 5) Evolution artificielle
 - Algorithmes génétiques ;
 - Programmation génétique.
- 6)Apprentissage
 - Réseaux de neurones ;
 - Systèmes de classeurs.
- 7) Génération de comportements
- 8) Créatures artificielles et Ecosystèmes
- **PARTIE 2 Démonstration.**
 - Etudes de cas en Netlogo ou logiciel équivalent**

Références

- 1. J. P. Rennard, **Vie Artificielle**, Vuibert Informatique, 2006.
- 2. A. Adamatzky & M. Komosinsky, **Artificial Life Models in software**, SPRINGER, 2005.
- 3. C. Langton, **Artificial Life series**, Addison Wesley Publishing.
- 4. J. A. Meyer, **From Animals to Animats series**, The MIT Press.
- 5. J.C. Heudin, **Virtual Worlds**, Springer LNCS/AI 1834, 2000.

Chapitre 1:

Introduction à la Vie Artificielle



Le cycle de vie

La vie de tout être suit un cycle inévitable:

- 1- Un nouvel être naît de la volonté d'un (ou de plusieurs) concepteur(s).
- 2- Puis progressivement, cet être se développe :
 - ! physiquement, en devenant plus grand et plus fort ;
 - ! intellectuellement, en acquérant des connaissances ;
 - ! efficacement, en mettant en pratique les compétences ainsi acquises.
- 3- Enfin, cet être vivant, à la suite d'une rupture brutale ou après une lente dégénérescence de ses facultés physiques et intellectuelles, meurt en restituant, à la nature, des composants inertes.

La complexité(1)

- La complexification marque le parcours de la « galerie de l'évolution » qui mène des cellules élémentaires aux organismes les plus perfectionnés. Cette complexité naît et prospère d'une répétition, dans le temps et dans l'espace, de mécanismes extrêmement simples. Ainsi, la réitération d'opérations élémentaires débouche sur des phénomènes émergents d'une extraordinaire complexité.

La complexité(2)

- Grâce à l'informatique, les biologistes acquièrent une perception nouvelle des systèmes qu'ils étudient. Ils ont la possibilité d'effectuer des simulations informatiques afin de tracer le passage de la simplicité à la complexité, par exemple :
 - croissance des végétaux ;
 - apparition et disparition des espèces animales ;
 - comportements collectifs des sociétés d'insectes ;
 - phénomènes dynamiques du cerveau.

Historique de la vie artificielle

- La première manifestation de la vie artificielle date des années 40. Il s'agit des **automates cellulaires** créés par **John von Neumann**, décrivant le principe d'autoréplication basée sur un code décrivant la succession des actions à effectuer, ceci, fait remarquable, avant la découverte de l'ADN et des mécanismes génétiques.
- À la même époque, en 1948, **Alan Turing** écrit *Intelligent Machinery* où apparaît le concept de machine dotée d'intelligence.
- En 1970, **John Conway** propose le premier système artificiel simple qui évolue en système complexe organisé. Il s'agit du **jeu de la vie**, qui se présente sous la forme d'un système d'automates cellulaires en deux dimensions, constitué d'une matrice de cellules vivantes ou mortes. Toutes les cellules sont influencées par leurs huit voisines directes. Quatre règles simples entraînent la modification de l'état de la cellule considérée, en fonction de ses voisines. Ce système évolue jusqu'à trouver des structures stables.

Historique de la vie artificielle

- La tendance connexionniste, menée par **Marvin Minsky** dans les années 80, se rapproche des sciences cognitives, et se base sur des **réseaux de neurones** ainsi que sur des **machines parallèles**.
- En 1987, la première conférence consacrée à la vie artificielle est organisée par **Christopher Langton**, élève de Arthur Burkes à Princeton, qui avait poursuivi les travaux de von Neumann après la mort de ce dernier.

Le jeu de la vie

- Pour illustrer la génération de la complexité, le professeur Bersini rappelle les règles de ce jeu.
- Ce jeu consiste à choisir, dans une matrice, de dimensions finies, une cellule de départ et de donner une règle simple de génération des propriétés (par exemple la couleur) des cellules adjacentes (gauche, supérieure, droite, inférieure) et de répéter cette opération sur l'ensemble de la matrice,
- Ces algorithmes, sont très facilement programmables. Leur automatisation permet de visualiser la cinématique des résultats obtenus. On observe des configurations, totalement imprédictibles ;
- quelques-unes convergent vers une situation stable alors que d'autres entretiennent des évolutions perpétuelles.

Le jeu de la vie

- Le jeu de la vie est un jeu mathématique créé au début des années 70. Il s'agit d'une surface (en théorie infinie) composée de petits carrés. Ces petits carrés peuvent avoir deux valeurs : noir ou blanc (**vivant ou mort**)
- Les règles sont simples : si une cellule vivante a deux ou trois voisins, elle survit.
- Si une cellule morte a trois voisins, elle devient vivante.
- On peut soit disposer les cellules vivantes aléatoirement, soit selon une forme prédéfinie.
- Lorsqu'on lance le jeu, on voit vite apparaître, formées par des carrés, des "**créatures**" qui bougent sur l'écran.
- C'est une parfaite illustration du **phénomène d'émergence**.

Introduction à la vie artificielle

- La vie artificielle est probablement un des plus vieux rêves de l'homme. De tous temps, en effet, l'homme n'a cessé de recréer les mécanismes de la nature
- **Vie** : Ensemble des phénomènes (nutrition, assimilation, croissance, reproduction,...) communs aux êtres organisés et qui constituent leur mode d'activité propre, de la naissance à la mort. (...) (LAROUSSE)
- **Intelligence** : (...) aptitude à s'adapter à une situation, à choisir en fonction des circonstances ; capacité de comprendre, de donner un sens à telle ou telle chose (...) (LAROUSSE)

Introduction

- Une machine peut-elle se reproduire ?
- Un logiciel peut-il évoluer ?
- Comment des robots sophistiqués sont construits pour fonctionner dans un environnement humain ?
- Un écosystème peut-il être créé dans un ordinateur ?

Ce sont certaines des questions auxquelles sont confrontés les chercheurs dans le domaine de la vie artificielle (VA),

Définition de la Vie Artificielle(1)

- La Vie Artificielle (VA) est l'étude des systèmes artificiels qui montrent des comportements caractéristiques de systèmes naturels vivants.
- L'objectif de cette discipline est la création de systèmes qui se comportent comme s'ils étaient **vivants**.



Définition de la Vie Artificielle(2)

- La vie artificielle a été définie par **Langton** en 1989 comme étant *"l'étude de systèmes construits par l'homme qui présentent des comportements caractéristiques des systèmes vivants"*
- Dans la littérature, la vie artificielle ne peut se restreindre à une simple discipline au sens strict du terme, mais il s'agit plutôt d'un regroupement de **travaux** qui s'inspirent explicitement du vivant



Définition de la Vie Artificielle(3)

- Le but de la VA est de générer des comportements similaires à ceux produits par des organismes vivants.
- Pour cela il faut commencer par **identifier et étudier** les mécanismes qui génèrent et contrôlent les comportements des systèmes naturels et par la suite les **reproduire** dans des systèmes artificiels.



Vie artificielle à retenir

- Une nouvelle discipline qui étudie la vie naturelle en essayant de recréer des phénomènes biologiques, à l'aide d'ordinateurs et d'autres médias artificiels.
- Le programme de cette science jeune est défini par Christopher Langton.

"L'étude de systèmes construits par l'homme qui présentent des comportements caractéristiques des systèmes vivants"

Vie artificielle (domaine de recherche)

- *De tout temps, les hommes ont essayé de reproduire artificiellement la vie. Grâce à ses capacités universelles de simulation, l'ordinateur est aujourd'hui un outil efficace pour explorer les mécanismes du vivant. Aux frontières de la **biologie** théorique, de **l'informatique**, des **mathématiques** et de la **physique**, la Vie Artificielle amorce un nouveau domaine de la recherche scientifique*

Vie artificielle(autre définition)

- on pourrait définir la vie artificielle par les **caractéristiques** que doivent posséder les systèmes de vie artificielle : "Ces systèmes doivent avoir été créé par l'homme, être *autonomes*, être en *interaction avec leur environnement*, faire *émerger* un ou des comportements. Ils peuvent aussi, mais cela n'est pas nécessaire, se *reproduire* et être capables de *s'adapter*"

(*J.Doyne Farmer*)

Propriétés de la Vie artificielle

- Les propriétés minimales que nous retrouvons dans tout système de vie artificielle :
 - 1 L'être **humain** est à l'origine de toute vie artificielle.
 - 2 Un système de vie artificielle est **autonome** ;
 - 3 Un système de vie artificielle est en **interaction** avec son **environnement**;
 - 4 Il y a **émergence** de comportements dans un système de vie artificielle;
- Ces 3 propriétés ne sont pas indispensables mais restent néanmoins très présentes :
 - 1 Un système de vie artificielle peut **se reproduire lui-même**;
 - 2 Un système de vie artificielle possède une **capacité d'adaptation**;
 - 3 Un système de vie artificielle n'est pas une unité. A l'opposé de la vie, un système de vie artificielle peut être **réparti** en plusieurs endroits

D'où vient la vie artificielle ???

- Une incapacité de l'IA classique à traiter l'interface de la cognition au monde sans s'intéresser à la biologie.
- La Vie Artificielle est l'étude des systèmes conçus par l'homme qui présentent des comportements caractéristiques des systèmes vivants naturels.
- la Vie Artificielle peut contribuer à la biologie théorique
- **J. Doyne Farmer** propose, en 1990, une définition en forme de liste de 8 critères permettant de qualifier un système comme "vivant"

Critères des vivants:

1. La vie est une structure dans l'espace-temps, plutôt qu'un objet matériel spécifique.
2. La vie implique un mécanisme d'autoreproduction.
3. Un être vivant comprend une description de lui-même qu'il utilise pour se reproduire.
4. Un être vivant possède un métabolisme qui convertit la matière ou l'énergie de l'environnement dans les formes et les fonctions utiles à l'organisme.
5. Un être vivant interagit fonctionnellement avec son environnement.
6. Un être vivant est composé d'un ensemble de structures interdépendantes qui constituent son identité.
7. Une forme vivante reste stable malgré les perturbations dues à l'environnement.
8. Les êtres vivants ont une capacité d'évolution au niveau des générations successives de l'espèce.

Vie Artificielle et Intelligence Artificielle

- **Intelligence artificielle**

L'intelligence artificielle est une science dont le but est de doter une machine d'une pensée similaire à la pensée humaine ou simplement d'en donner l'illusion.

- **Vie artificielle**

La vie artificielle est une tentative de reproduire le « vivant » dans une machine, dans des conditions initiales définies et à partir de mécanismes simples.

- **Remarque** : la vie artificielle est, plus qu'un changement de nom, un changement d'objectif. Le but n'est plus d'imiter la pensée humaine mais d'en créer une nouvelle forme.

Où trouve-t-on la vie artificielle ?

- Ce ne sont plus des hommes qui **conçoivent** les avions, . . .
- Qui étudient le comportement des foules dans les immeubles
- C'est des systèmes de VA qui font de la reconnaissance vocale, de la reconnaissance des visages et autres systèmes de sécurité.
- Noublions pas les petits robots qui vont dans les endroits **non fréquentables** pour l'homme.
- On pense aussi à utiliser ce type de robots pour exécuter certaines opérations **dangereuses** comme par exemple dans les zones contaminées des centrales ex-soviétiques genre Tchernobyl

Les applications de la vie artificielle (1)

- La vie artificielle est exploitée pour la création de la vie synthétique sur ordinateur afin d'étudier, de **simuler** et de **comprendre** les systèmes **vivants**.
- La définition et les caractéristiques de la vie artificielle sont représentées par les applications de ses études.
- Les **domaines d'application** de la vie artificielle:
 - Le contrôle, la fabrication de robots,
 - L'infographie,
 - modélisation de phénomènes naturels,
 - Les divertissement, les jeux, la musique (art),
 - L'économie, Internet,
 - Le traitement de l'information,
 - Le design industriel,
 - Les logiciels de simulation,
 - L'électronique, la sécurité,
 - L'exploration de données et les télécommunications.

Dr.

Les applications de la vie artificielle (2)

- Les domaines qui utilisent plus la vie artificielle sont la robotique, l'infographie ainsi que l'ingénierie.
- La modélisation et la simulation des systèmes vivants pour l'infographie résonnent avec un domaine émergent de la recherche scientifique,
- La vie artificielle, une discipline qui est entre les frontières traditionnelles de l'informatique et des sciences biologiques.
- Des concepts de la vie artificielle jouent un rôle central dans la construction des modèles graphiques avancés pour :
 - L'image de synthèse,
 - L'animation,
 - Le multimédia
 - Et la réalité virtuelle.

Les applications de la vie artificielle (3)

- En règle générale, ces modèles prennent des formes complexes et vivent dans des mondes virtuels dans lesquels ils sont soumis aux lois de la physique.
- Ces modèles doivent également simuler un nombre de processus naturels qui caractérisent uniquement les systèmes vivants y compris :
 - La naissance et la mort,
 - La croissance et développement,
 - La sélection naturelle,
 - L'évolution, la perception,
 - La locomotion, la manipulation,
 - Le comportement adaptatif,
 - L'apprentissage et l'intelligence.

Dr.

Principaux sujets de recherche(2021)

Dynamique écologique et sociale :

- Dynamique évolutive ;
- Chimie artificielle, origine de la vie ;
- Biologie cellulaire computationnelle / physiologie computationnelle / biologie des systèmes ;
- Auto-réplication, auto-réparation et morphogenèse ;
- Robotique bio-inspirée, cognitive et évolutive ;
- Perception, cognition et comportement ;
- Évolution du langage, linguistique computationnelle ;
- Systèmes interactifs intégrés ;
- Dynamique collective des essaims ;
- Systèmes et réseaux dynamiques complexes ;
- Automates cellulaires et systèmes dynamiques discrets ;
- Économie / société / médias sociaux comme systèmes vivants ;
- Humanités / anthropologie / archéologie computationnelles ;
- Méthodologies et outils pour la vie artificielle ;
- Interactions entre expériences *in silico* / *in vitro* / *in vivo* ;
- Questions philosophiques, épistémologiques et éthiques ;
- Vie artificielle et éducation ;
- Art inspiré de la vie artificielle Art de base artificiel ;
- Applications de la vie artificielle ;
- Technologies vivantes.

Chapitre 2:

Les techniques de vie Artificielle

Les techniques de la vie artificielle

1. **Les systèmes Générateurs** qui permettent la création de nouveaux individus par incrémentation.
2. **Les systèmes d'Evolution** qui sont à l'origine de l'évolution d'une population contrainte dans un environnement. Il y est souvent question d'optimiser une exploration à l'aide de tirages pseudo-aléatoires.
3. **Les systèmes d'Apprentissage** qui permettent à des individus de s'adapter à un environnement par un apprentissage sans en modifier sa structure. Ils seront souvent à l'origine du paramétrage des générateurs

Les techniques de la vie artificielle

- Dans chaque système une idée reste permanente, il s'agit du fait que le concepteur fixe les règles des comportements des individus. Et c'est l'interaction entre chaque individu qui créait la complexité de la structure ou encore l'émergence de certaines propriétés.
- Dans la plus part des applications, on trouvera un mixage des différents systèmes.

Les techniques de la vie artificielle

1. Les systèmes GENERATEURS

- Modèles Réaction-Diffusion
- Automates cellulaires
- L-Systèmes

2. Les systèmes d'EVOLUTION

- Les algorithmes génétiques
- La programmation génétique

3. Les systèmes d'APPRENTISSAGE

- Les réseaux de neurones
- Les systèmes de classeurs ou classifieurs

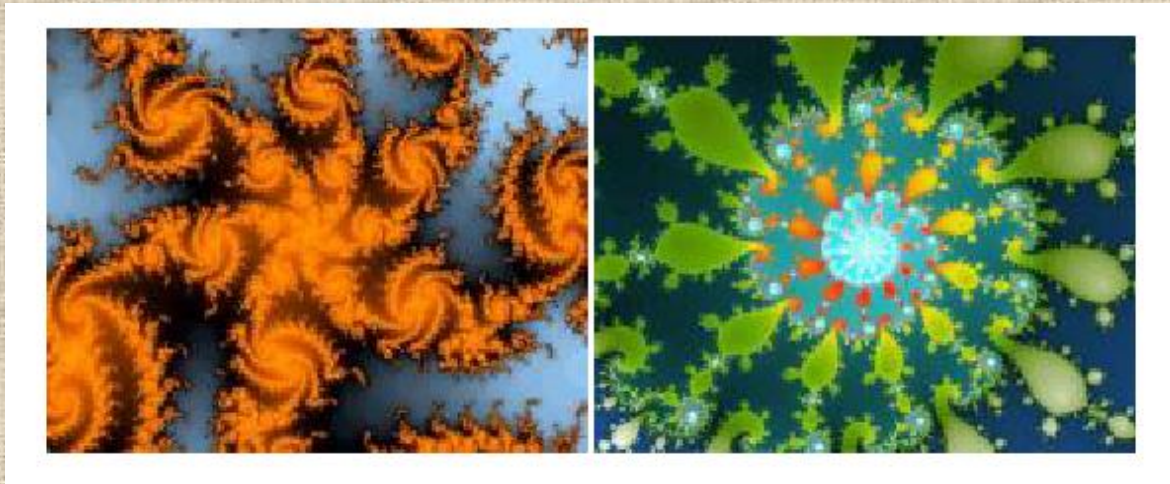
1- Les systèmes générateurs

1- Modèles Réaction-Diffusion

- Inspiré des réactions chimiques existants entre deux solutions mises en interaction, il s'agit d'une idée introduite par Alan Turing en 1952.
- Il s'agit d'une analogie chimique : sur un substrat sont mis en réaction deux produits, aussi appelés « morphogènes ». La réaction chimique qui a alors lieu est décrite localement par deux composantes :
- **La réaction** - Localement se produit une réaction chimique mettant en jeu les deux réactifs.
- **La diffusion** - Pour chacun des deux réactifs, et indépendamment l'un de l'autre, se produit un phénomène de diffusion.

1- Modèles Réaction-Diffusion

- Malgré l'originalité de ces deux exemples ces modèles sont typiquement utilisés pour la production de textures naturelles ou pour simuler le comportement d'insectes sociaux.
- La nature offre des exemples de géométrie fractale surprenants, comme le coquillage



Exemple d'image obtenue par modèle Réaction-Diffusion

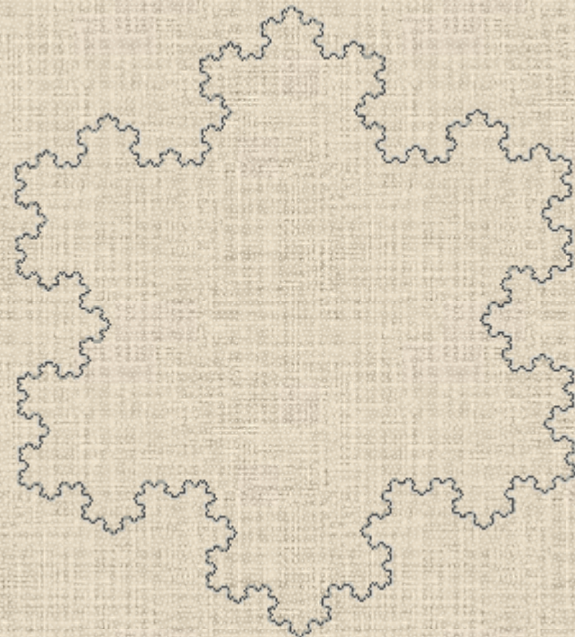
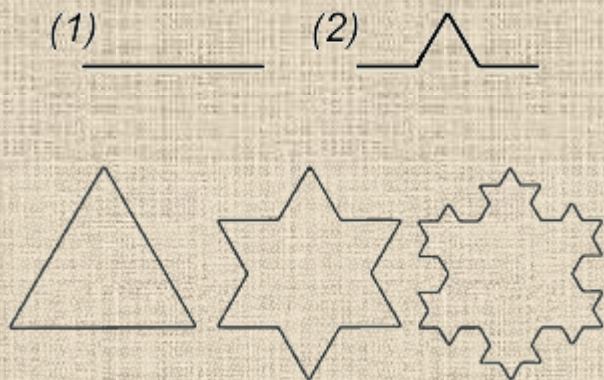
2- Récursion et génération

- Fonctions récursives

- Ex: $f(n) = f(n-1) + f(n-2)$ $f(0) = 1$ $f(1) = 4$

- Fractales

- *Géométrie récursive – fonctions itératives – suites géométriques*





3- Le jeu de la vie

- **Le jeu de la vie, automate cellulaire** imaginé par John Horton Conway en 1970, est probablement, à l'heure actuelle, le plus connu de tous les automates cellulaires.
- Malgré des règles très simples, le jeu de la vie permet le développement de motifs extrêmement complexes
- il faut préciser que le jeu de la vie n'est pas vraiment un jeu au sens ludique, puisqu'il ne nécessite aucun joueur ; il s'agit d'un automate cellulaire, un modèle où chaque état conduit mécaniquement à l'état suivant à partir de règles pré-établies.

3- Le jeu de la vie

- Le jeu se déroule sur une grille à deux dimensions, théoriquement infinie (mais de longueur et de largeur finies et plus ou moins grandes dans la pratique), dont les cases- qu'on appelle des « cellules », par analogie avec les cellules vivantes - peuvent prendre deux états distincts : « vivantes » ou « mortes ».
- À chaque étape, l'évolution d'une cellule est entièrement déterminée par l'état de ses huit voisines de la façon suivante :
 - 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.

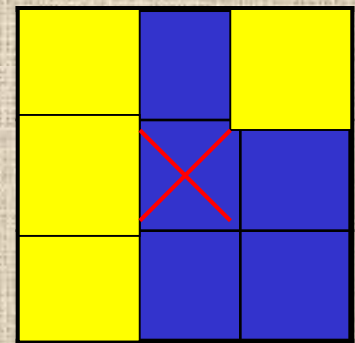
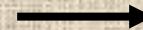
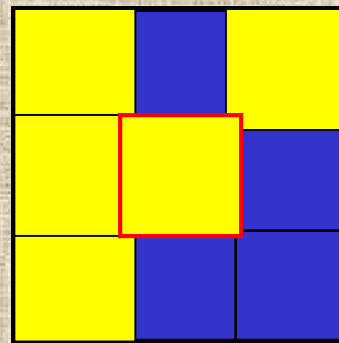
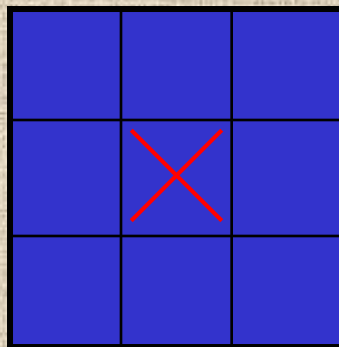
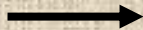
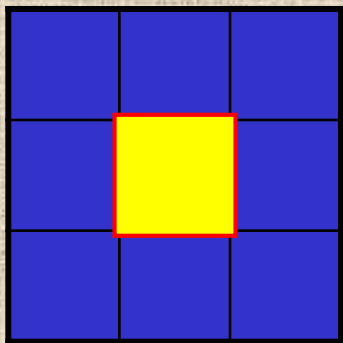
3- Le jeu de la vie

On peut également formuler cette évolution ainsi :

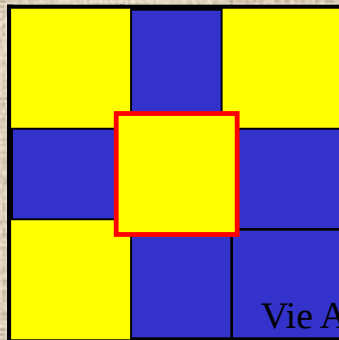
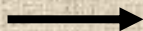
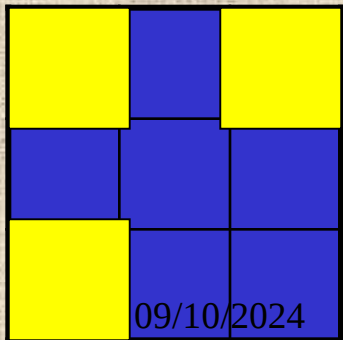
- Si une cellule a exactement trois voisines vivantes, elle est vivante à l'étape suivante.
- Si une cellule a exactement deux voisines vivantes, elle reste dans son état actuel à l'étape suivante.
- Si une cellule a strictement moins de deux ou strictement plus de trois voisines vivantes, elle est morte à l'étape suivante.

3- Jeu de la vie

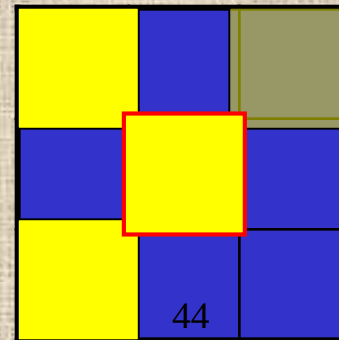
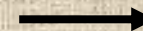
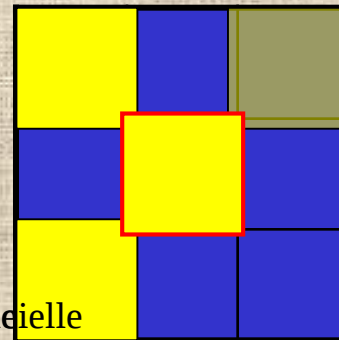
1 ou + de 3 voisins → MORT



3 voisins → NAISSANCE



2-3 voisins → survie

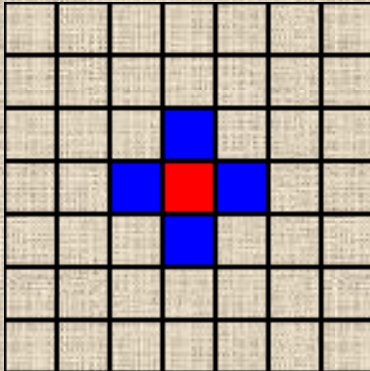


4- automate cellulaire

- les **automates cellulaires** sont à la fois un modèle de système dynamique discret et un modèle de calcul. Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » pouvant chacune prendre à un instant donné un « état » parmi un ensemble fini. Le temps est également discret et l'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ».
- À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente.

4- Les automates cellulaires

- Exemple



Si deux voisins sur
quatre sont bleus alors
je deviens rouge

Applications des automates cellulaires

1. **Simulation du comportement d'un gaz.** Un gaz est composé d'un ensemble de molécules dont le comportement est fonction de celui des molécules voisines.
2. **Étude des matériaux magnétiques** selon le modèle d'Ising : ce modèle (1925) représente le matériau à partir d'un réseau dont chaque noeud est dans un état magnétique donné. Cet état (en l'occurrence l'une des deux orientations du moment magnétique) dépend de l'état des noeuds voisins.
3. **Traitement d'images.**
4. Simulation d'une foule d'humains virtuels
5. Dans un domaine différent, les automates cellulaires peuvent être utilisés comme alternative aux **équations différentielles**.
6. Conception d'ordinateurs **massivement parallèles**.
7. Simulation et étude du développement **urbain**.
8. Simulation des processus de **cristallisation**.
9. Simulation de la **propagation des feux de forêt**: par exemple 4 états (**sans arbres / arbre vert / en feu / en cendres**) et des règles du type "si au moins 1 cellule voisine en feu, alors cellule s'enflamme"...etc.

TP1 : Automates cellulaires

- Les configurations suivantes sont stables : elles n'évoluent pas au fil du temps
- La première question qui s'est posée est de savoir s'il existe des configurations qui restent indéfiniment instables.
- Une structure est en vaisseau lorsqu'elle se déplace dans la grille. Il s'agit en général d'une structure cyclique mais dont la position après un cycle est translatée de la position précédente. Le plus petit vaisseau est le planeur (ou glisseur).
- Le Pentamino R est un automate cellulaire de type Mathusalem, c'est à dire qu'il évolue pendant une longue période (ici 1103 générations) avant de se stabiliser vers des structures périodiques ou vaisseau.
- Enfin, la question suivante est de savoir s'il existe des configurations qui vont engendrer un nombre croissant de cellules.

TP1 : Automates cellulaires

- Les configurations suivantes sont stables : elles n'évoluent pas au fil du temps
- La première question qui s'est posée est de savoir s'il existe des configurations qui restent indéfiniment instables.
- Une structure est en vaisseau lorsqu'elle se déplace dans la grille. Il s'agit en général d'une structure cyclique mais dont la position après un cycle est translatée de la position précédente. Le plus petit vaisseau est le planeur (ou glisseur).
- Le Pentamino R est un automate cellulaire de type Mathusalem, c'est à dire qu'il évolue pendant une longue période (ici 1103 générations) avant de se stabiliser vers des structures périodiques ou vaisseau.
- Enfin, la question suivante est de savoir s'il existe des configurations qui vont engendrer un nombre croissant de cellules.

5- Les fractales

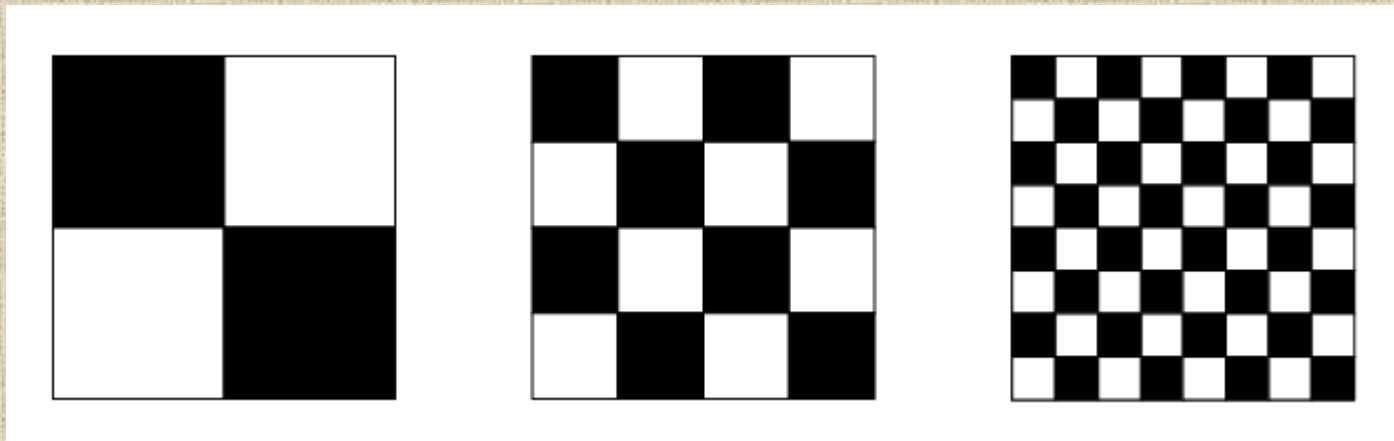
Définition:

- Les fractales font partie des approches génératrices de la morphogenèse.
- Une fractale est un objet mathématique de structure complexe dont la création ou la forme met en jeu des règles utilisant le fractionnement.
- La génération de fractales emploie des algorithmes récurifs qui permettent à une ou plusieurs fonctions de s'appeler elles-mêmes.

5- Les fractales

Les fractales ont des composantes répétitives:

L'un des aspects intéressants à propos des fractales est que ces formes autosimilaires peuvent être utilisées pour composer des **motifs** (ou régularités) qui peuvent se répéter indéfiniment!



5- Les fractales dans la nature

Exemples:

- Flocons de neige
- Cristaux et Montagnes
- Le système sanguin, les poumons, les brocolis et les côtes



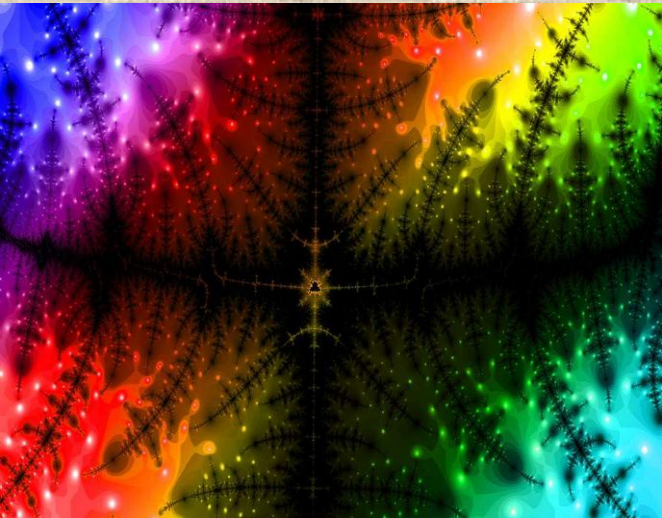
5- Les fractales dans la nature

Les ensembles fractales permettent de reproduire graphiquement les formes naturelles. On peut imiter à la perfection la structure de certaines plantes naturelles.

La figure (a) géométrique sombre ressemble à des branches épineuses de sapin,

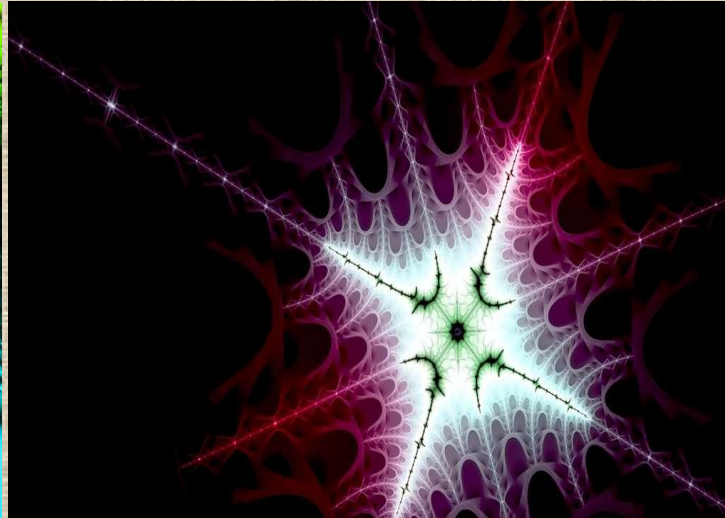
Cette fractale (b) associe le rouge, le rose, le blanc et le vert. Sa structure symétrique évoque celle d'un flocon de neige.

(a)



09/10/2024

(b)

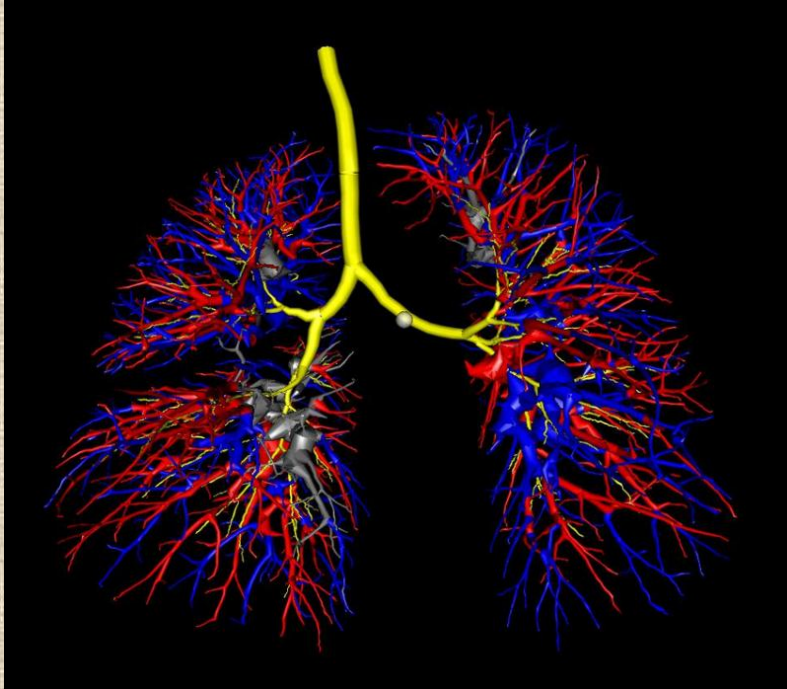


Université de la Côte d'Ivoire

Sapin



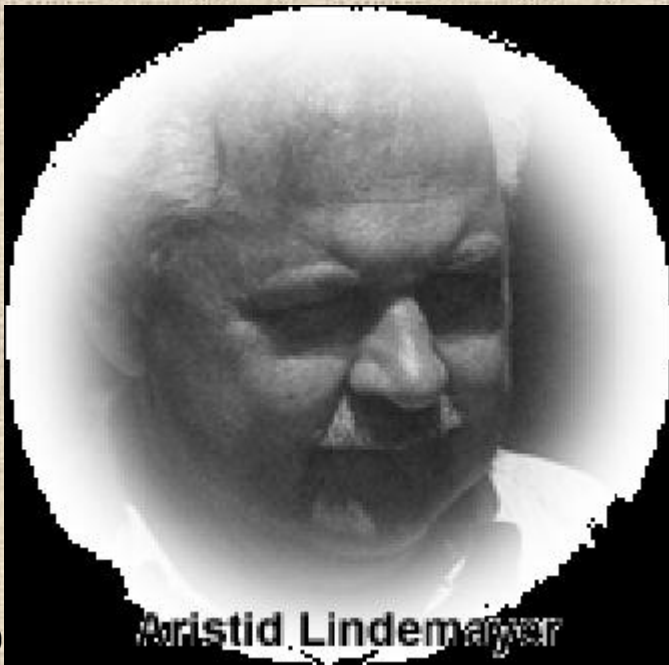
5- Les fractales dans la nature



6- L-Systèmes

Dans son jardin, un homme fait pousser des plantes de tomate et vient de semer les premières graines. Est-il capable de prédire leur croissance? Peut-il deviner le nombre de branches, les angles entre elles, leur longueurs?

Aristid Lindenmayer, un mathématicien du XX^e siècle, a répondu à cette question : nous pouvons le faire et ce, avec une étonnante précision et un niveau de réalisme insoupçonné. Sa méthode? Les L-systèmes



6- L-Systèmes

- Inventé en 1968 par le biologiste hongrois Aristid Lindenmayer,
- A. LINDENMAYER qui proposera la méthode à l'origine des L-Systèmes mise en œuvre graphiquement par P.PRUNSINKIEWICZ.
- Il s'agit d'une méthode de description formelle de la structuration des plantes. Basée sur une forme récursive de grammaire générative,
- Permet de résoudre les limitations des grammaires de Chomsky et des automates cellulaires,
- c'est un très bon exemple de l'aide que peut apporter la vie artificielle à la vie naturelle,

6- L-Systèmes

Définition: Un L-system est défini par :

- Un ensemble de symboles
- Un ensemble de constantes
- Un axiome (ou initiateur)
- Un ensemble de règles de production

6- L-Systèmes

Définition:

Un L-système est la donnée :

1. d'un alphabet fini $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ de symboles ;
2. de règles de dérivation

$$r : A \rightarrow A^*$$

$$a \mapsto u$$

3. où A^* désigne l'ensemble des mots sur l'alphabet A ;
4. d'un axiome $u_0 \in A^*$.

6- L-Systemes

Exemple:

Voici le L-système permettant d'obtenir (en partie) le **flocon de Koch**.

1. l'alphabet $A = \{F, +, -\}$;
2. l'axiome $u_0 = F$;
3. les règles de dérivation :

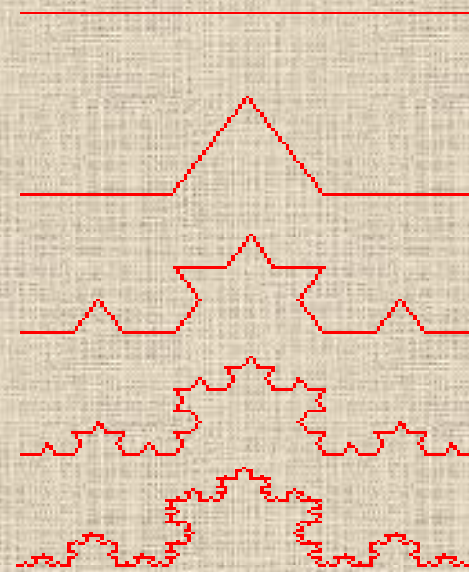
$F \mapsto F - F + +F - F$

$+ \mapsto +$

$- \mapsto -$



La propriété de similarité interne



Le flocon de Koch

6- L-Systèmes

Dérivation d'un mot:

Étant donné un L-système, il est possible de construire une suite $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de mots à partir de l'axiome et des règles de dérivation :

1. Le mot initial est l'axiome u_0 .
2. On calcule le mot u_{n+1} à partir du mot u_n en remplaçant chacune des lettres x de u_n par son image $r(x)$ donnée par les règles de dérivation.

Exemple: Avec l'exemple du L-système présenté ci-dessus, voici les premiers mots obtenus :

<u>n</u>	<u>U_n</u>
0	F
1	F - F + +F - F
2	F - F + +F - F - F - F + +F - F + +F - F + +F - F - F - F + +F - F

le mot u_2 est de longueur 36 et le mot suivant, u_3 , est de longueur 148.

Exemple de la courbe de KOCH

Variable : $v = \{F\}$

- Constantes : $S = \{+, -\}$

- Axiome : $w = F$

- Règle : $(F \rightarrow F+F-F-F+F)$

Courbe de Koch

```
{
angle 90
```

```
axiom F
```

$$F = F + F - F - F + F$$

}

angle 90 détermine que l'on tourne de 90° avec les symboles + et -.

Voici le résultat sur trois générations :

- $n=0$: F ---

- $n=1$: $F+F-F-F+F$

- $n=2$:

F+F-F-F+F + F+F-F-F+F - F+F-F-F+F - F+F-F-F+F + F+F-F-F+F

- $n=3$:

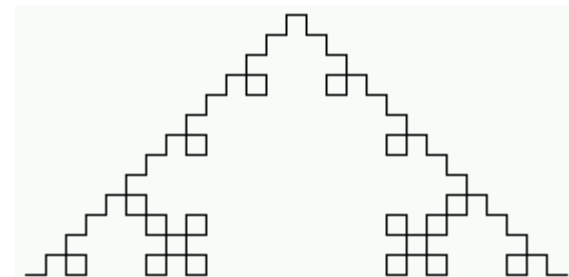
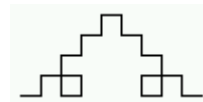
F+F-F-F+F+F+F-F-F+F-F+F-F-F+F-F+F-F-F+F+F+F-F-F-F+F +

F+F-F-F+F+F+F-F-F+F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F-F-F-F -

F+F-F-F+F+F+F-F-F+F-F+F-F-F+F-F-F+F+F-F-F-F+F-F -

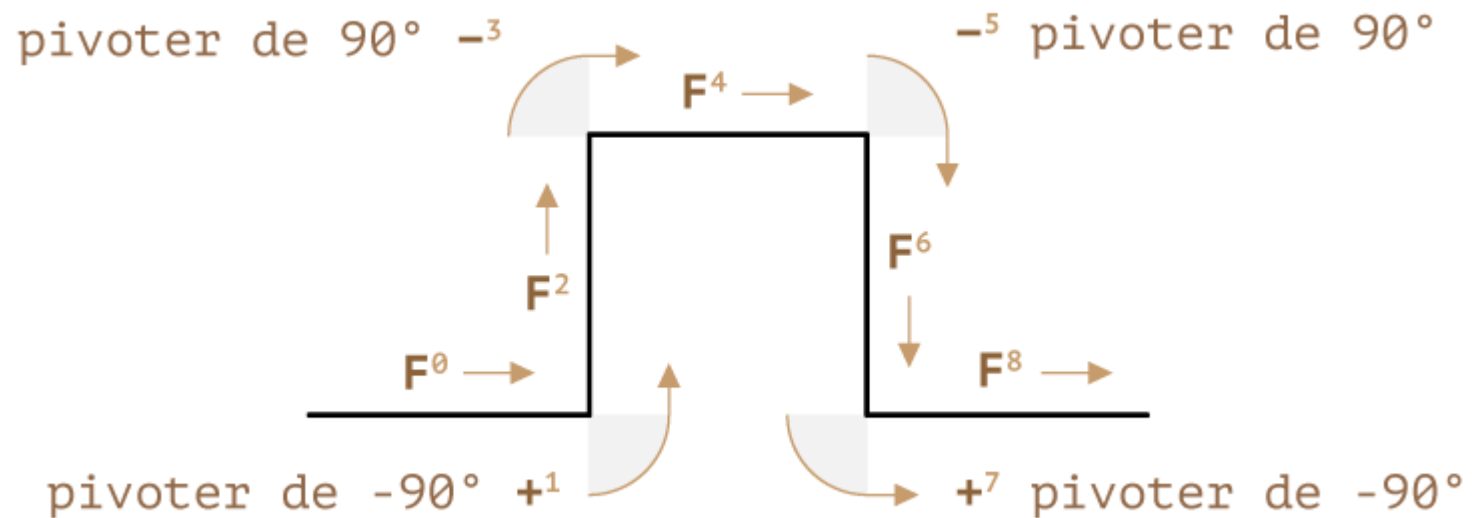
F+F-F-F+F+F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F-F +

F+F-F-F+F+F-F-F-F+F-F-F-F+F-F+F-F-F+F+F+F-F-F+F



Exemple de la courbe de KOCH

$F+F-F-F+F$



L-Systèmes(exemples de plantes)

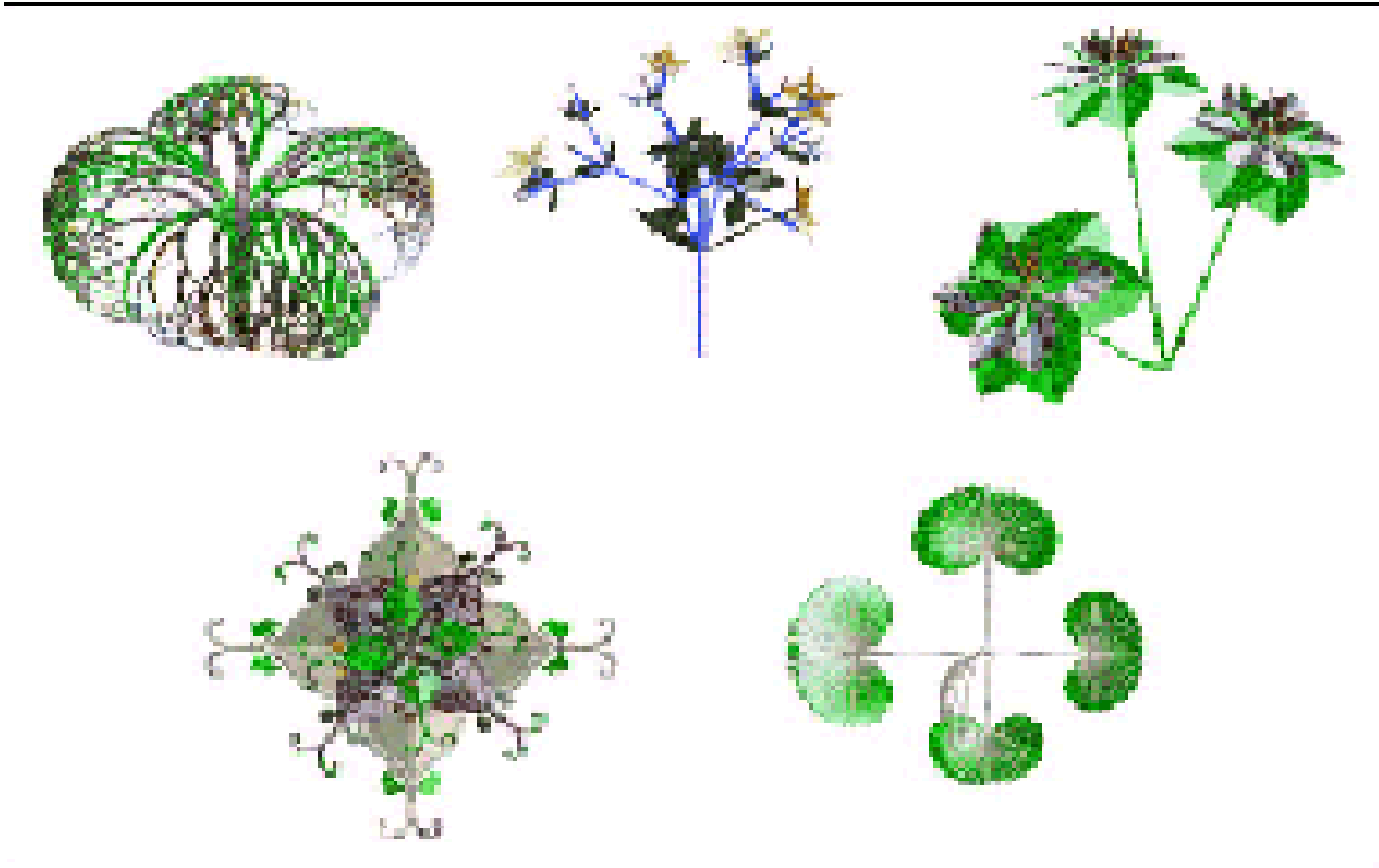
Deux exemplaires de la plante
à sa quatrième itération



Trois exemplaires d'une plante plus réaliste



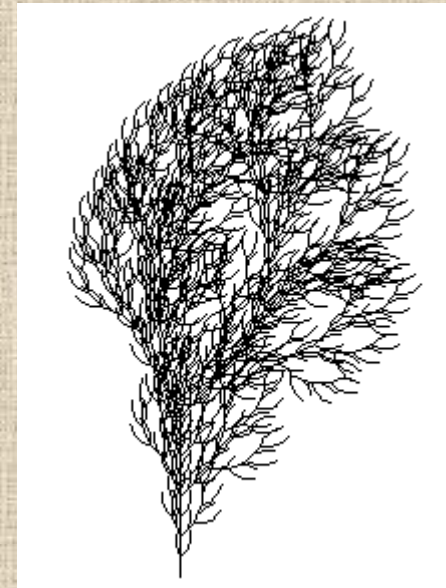
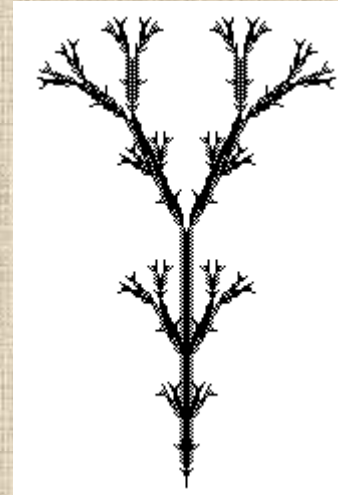
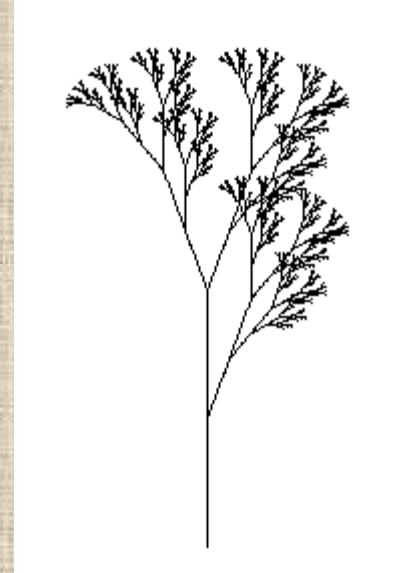
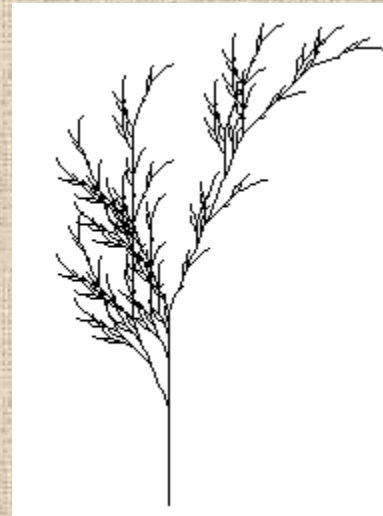
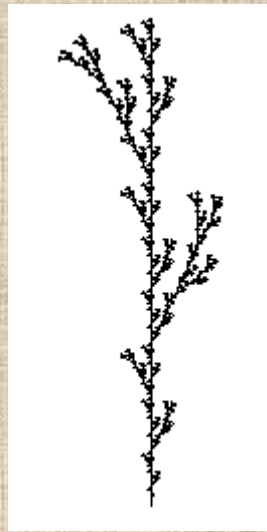
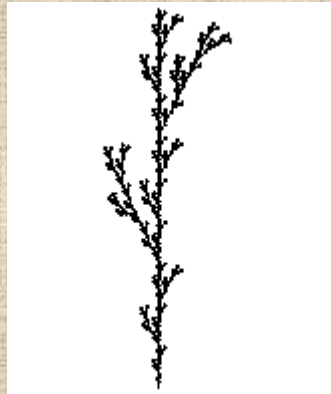
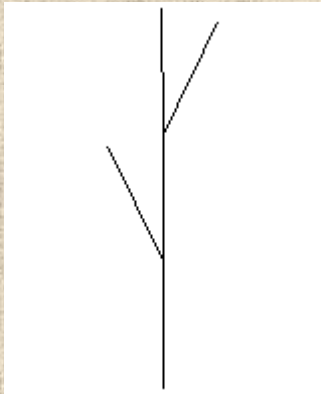
L-Systèmes



Exemple d'image obtenue par un modèle de L-Système

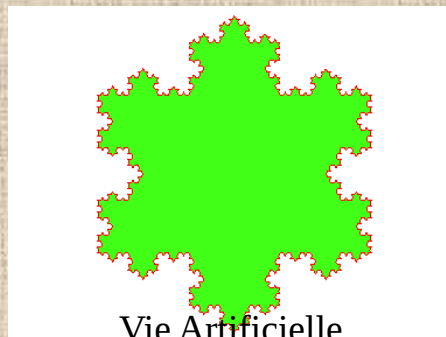
L-Systèmes

- Lindenmayer
- Principe: idem fractales
 - Initiateur : F
 - Générateur : $F[+F]F[-F]F$
 - Angle : 22.5



L-systèmes(autre exemple)

- Basé sur l'inférence grammaticale(les grammaires de **Chomsky**.)
- Un système de **Lindenmayer** (L-système) : Un ensemble E d'objets et une transformation f qui à un objet de E associe une suite finie d'objets de E . Partant d'un objet x de E , on lui applique f : on obtient la suite d'objets de E à l'étape 1 notée S_1 , à l'étape 2 S_2 . On réitère ce processus à l'infini, jusqu'à obtenir une suite infinie S , appelée "point fixe" du système. Si on remplace chaque élément de S par son transformé par f , la suite reste inchangée.
- Si $E=\{0,1\}$ et $f(0)=01$, $f(1)=10$, on obtient
 $S_0 = 0$
 $S_1 = 01$
 $S_2 = 0110$
 $S_3 = 01101001$
- dont le point fixe $S = 01101001100101101001011001101001$ est appelé suite de **Thue-Morse**. Création de figures fractales proches des formes créées par la nature (organes, nuages...). Permet la modélisation de la **morphogenèse** de nombreux végétaux..



Vie Artificielle



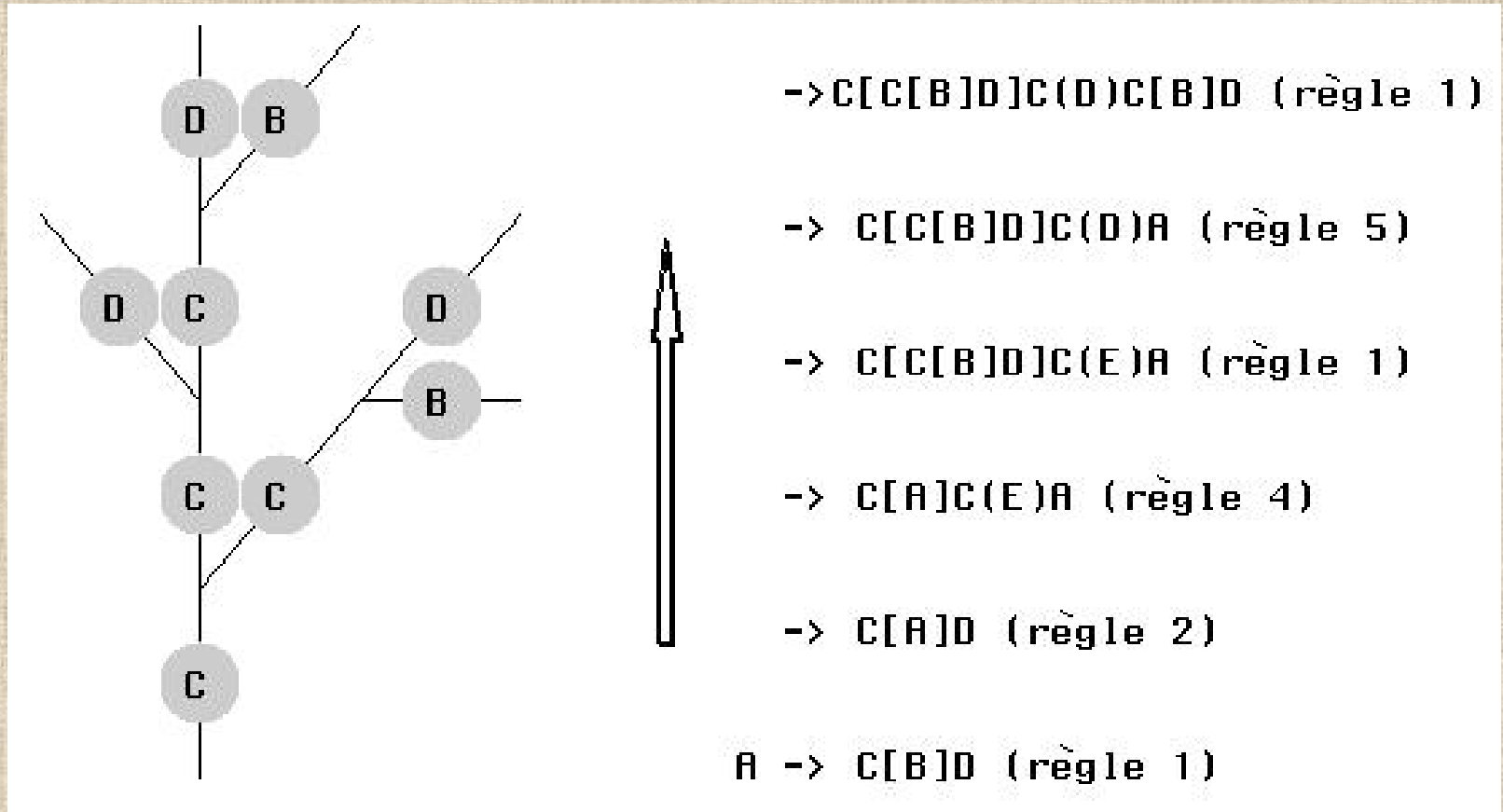
Exemple

- Soit la grammaire génératrice du L-Système:
 - 1. $A \rightarrow C[B]D$
 - 2. $B \rightarrow A$
 - 3. $C \rightarrow C$
 - 4. $D \rightarrow C(E)A$
 - 5. $E \rightarrow D$
- A: Axiome
- (: branchement à gauche
- [: branchement à droite
- On peut avoir d'autres paramètres d'orientation, d'angles, de couleur

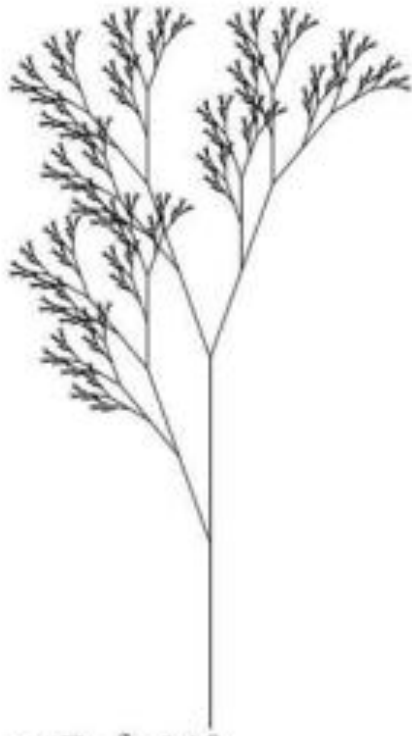
- Le développement aboutit à la chaîne suivante:
 - 1. A (donnée initiale)
 - 2. C[B]D règle 1
 - 3. C[A]C(E)A règle 3,2,4
 - 4. C[C[B]D]C(D)C[B]D règle 3,1,3,5,1

- Ce qui donne une représentation 2D

Interprétation graphique



Exemples de grammaires de L-Systèmes



$n=7, \delta=20^\circ$

X

$X \rightarrow F[+X]F[-X]+X$

$F \rightarrow FF$

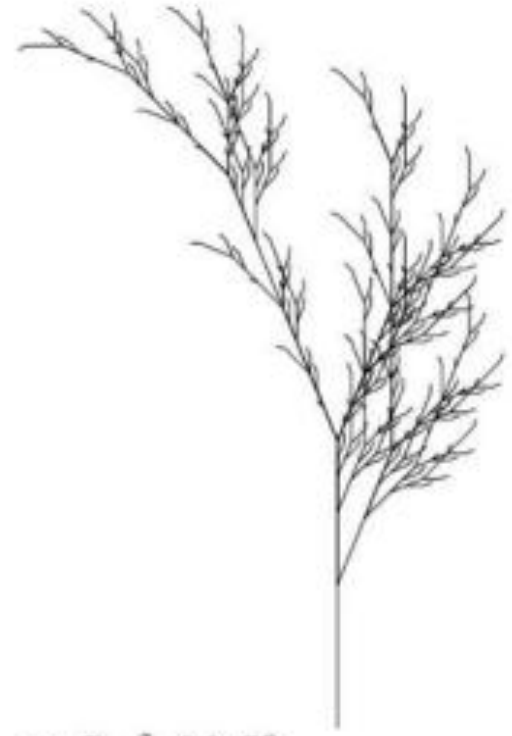


$n=7, \delta=25.7^\circ$

X

$X \rightarrow F[+X][-X]FX$

$F \rightarrow FF$



$n=5, \delta=22.5^\circ$

X

$X \rightarrow F-[[X]+X]+F[+FX]-X$

$F \rightarrow FF$

Exemple de L-System simple

Voici « l'algue de Lindenmayer », un L-système d'Aristid Lindenmayer qui servait à décrire le développement d'une algue :

- Alphabet : $V = \{A, B\}$
- Constantes : $S = \{\}$
- Axiome de départ : $w = A$
- Règles : $(A \rightarrow AB), (B \rightarrow A)$

Notation abrégée : `Algue { Axiom A ; A=AB, B=A }`

Une équation comme $A=AB$ est à comprendre comme : tout symbole A devient un « mot » AB à la génération suivante. Voici le résultat sur six générations :

- $n=0$, A
- $n=1$, AB
- $n=2$, AB A
- $n=3$, AB A AB
- $n=4$, AB A AB AB A
- $n=5$, AB A AB AB A AB A AB
- $n=6$, AB A AB AB A AB A AB AB A AB AB A

Si on compte le nombre de symbole à chaque itération, on obtient la suite de Fibonacci, au premiers termes près.

$$F_{n+2} = F_{n+1} + F_n$$

Interprétation des paramètres

F : Se déplacer d'un pas unitaire ($\in V$) ;
+ : Tourner à gauche d'angle α ($\in S$) ;
- : Tourner à droite d'un angle α ($\in S$) ;
& : Pivoter vers le bas d'un angle α ($\in S$) ;
^ : Pivoter vers le haut d'un angle α ($\in S$) ;
< : Roulez vers la gauche d'un angle α ($\in S$) ;
> : Roulez vers la droite d'un angle α ($\in S$) ;
| : Tourner sur soi-même de 180° ($\in S$) ;
[: Sauvegarder la position courante ($\in S$) ;
] : Restaurer la dernière position sauvée ($\in S$).

On imagine qu'une main tient un crayon qui se déplace sur la feuille selon des instructions:

Les symboles appartenant à V sont des parties d'une plante, comme une branche ou une portion de branche tout simplement.

Les symboles appartenant à S sont des ordres que l'on donne à notre main virtuelle qui dessine la plante, ils servent à déterminer une direction à prendre, tandis que les symboles de V dessinent dans cette direction.

Questions ?

- *La différence entre une grammaire formelle et une grammaire L-système?*
- La différence avec une grammaire formelle est dans l'application des règles : dans un L-système, à chaque étape toutes les variables sont substituées, alors que dans une grammaire, une seule variable est remplacée

Le formulaire ci-dessous permet tester tout cela pour des L-systèmes (avec au plus 4 variables en plus de F et G). Cliquer sur les boutons pour obtenir des L-systèmes correspondant à quelques fractales classiques.

- <http://mpechaud.fr/scripts/courbeHilbert2/hc.html>
- 1)Triangle de Sierpinski 2)Courbe de Koch avec angles droits 3)Flocon de Koch 4)Courbe du dragon 5)Courbe de Hilbert 6)Algue de Lindenmayer 7)Autre plante 8) Arbre binaire 9) Ensemble de Cantor/Escalier du diable 10) Courbe de Lévy

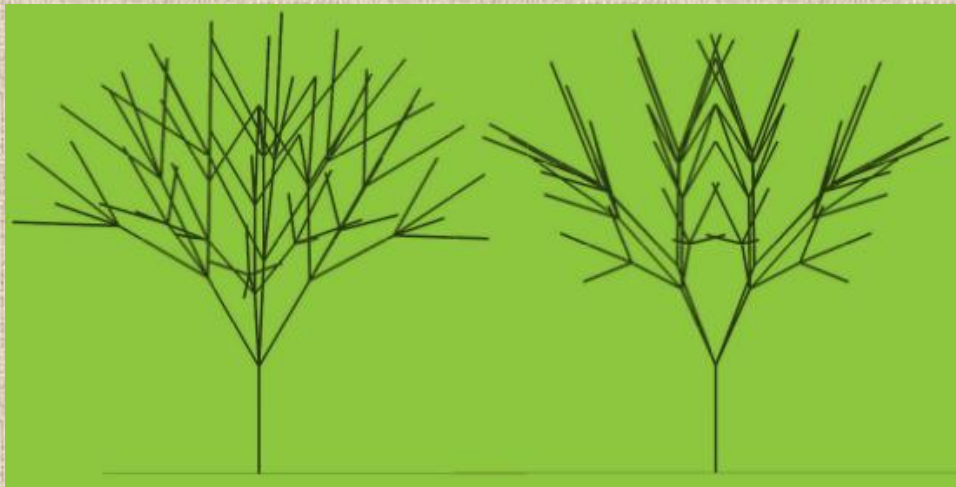
L-systèmes

- Une fois de plus, à partir de règles simples, itérées, on obtient des structures complexes. En faisant varier des paramètres et en introduisant une petite dose d'aléatoire, les figures sont extrêmement proches de ce que l'on trouve dans la nature.
- On retrouve le concept d'**invariance d'échelle**. Si on change l'échelle de la figure, cette dernière reste semblable à elle-même.
- Cette propriété est utilisée pour la croissance des plantes

L-Systèmes en 3D

Les L-Systèmes permettent aussi de modéliser des plantes et des arbres en trois dimensions. Pour ce faire, il faut de nouvelles consignes à donner à la tortue pour qu'elle puisse se diriger et s'orienter dans l'espace. En plus des consignes utilisées en 2D, il faut rajouter d'autres consignes:

Avec ces instructions, les possibilités sont beaucoup plus nombreuses. Par exemple, une plante où chaque branche donne naissance à quatre autres branches aurait les règles de l'encadré en bas à droite.

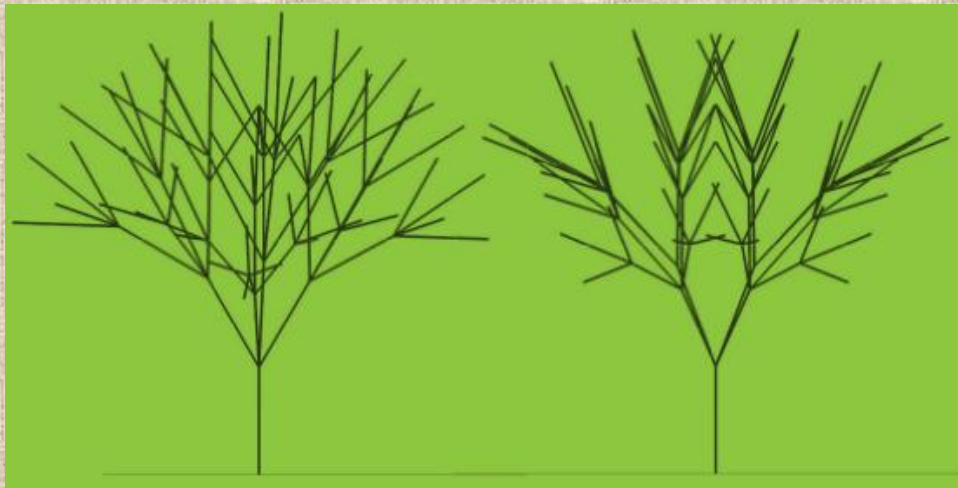


& : Se pencher vers le bas
^ : Se pencher vers le haut
< : Rouler à gauche
> : Rouler à droite
| : Faire demi-tour

Départ : F
Règle 1 : F → S[&F]<<<[&F]
 <<<[&F]<<<[&F]
Angle : 30°

L-Systèmes en 3D

La tortue trace la tige mère S, S, puis elle se penche vers le bas d'un angle de 30° pour tracer la première branche, [&F].[&F]. De retour à l'extrémité de la tige principale, la tortue roule autour de celle-ci d'un angle de 90° , <<<, <<<, puis s'incline vers le bas pour tracer la deuxième branche, [&F].[&F]. Le processus continue jusqu'à en avoir tracé quatre. Après trois itérations, nous obtenons la plante ci-dessous, vue de deux angles différents.



& : Se pencher vers le bas
^ : Se pencher vers le haut
< : Rouler à gauche
> : Rouler à droite
| : Faire demi-tour

Départ : F
Règle 1 : F → S [&F] <<< [&F]
 <<< [&F] <<< [&F]
Angle : 30°

Exercice 1

Variable : $V = \{F, X\}$

Constantes : $S = \{+, -, [,]\}$

Axiome : $w = X$

Règles : $(X \rightarrow F[+X]F[-X]+X) \wedge (F \rightarrow FF)$

Notation symbolique : Plante { angle 20 axiome X ;
 $X=F[+X]F[-X]+X$; $F=FF$ }

angle 20 détermine de quel angle on tourne avec les symboles + et -. Voici le résultat sur deux générations :

Exemple d'un De L-système

Variable : $V = \{F, X\}$

Constantes : $S = \{+, -, [,]\}$

Axiome : $w = X$

Règles : $(X \rightarrow F[+X]F[-X]+X) \wedge (F \rightarrow FF)$

Notation symbolique : Plante { angle 20 axiome X ; $X=F[+X]F[-X]+X$; $F=FF$ }

angle 20 détermine de quel angle on tourne avec les symboles + et -. Voici le résultat sur deux générations :

$n=0, X$

$n=1, F[+X]F[-X]+X$

$n=2, FF[+F[+X]F[-X]+X]FF[-F[+X]F[-X]+X]+F[+X]F[-X]+X$

Exercice 2

- Variable : $V = \{F, X\}$
- Constantes : $S = \{+, -, [,]\}$
- Axiome : $w = X$
- Règles : $X \rightarrow F[++X]F[-X]+X$; $X \rightarrow F[+X]F[-X]+X$; $F \rightarrow FF$
- Les règles $X \rightarrow F[++X]F[-X]+X$ et $X \rightarrow F[+X]F[-X]+X$ sont appliquées avec une probabilité 0,2 et 0,8 respectivement.
- Voici un résultat possible sur deux générations :
 - $n=0, X$
 - $n=1, F[++X]F[-X]+X$
 - $n=2, FF[++F[+X]F[-X]+X]FF[-F[+X]F[-X]+X]+F[+X]F[-X]+X$
- Voici un autre résultat possible sur deux générations :
 - $n=0, X$
 - $n=1, F[+X]F[-X]+X$
 - $n=2, F[+F[++X]F[-X]+X]F[-F[++X]F[-X]+X]+F[++X]F[-X]+X$
- Il y a $2^2 = 4$ possibilités possibles sur deux générations, avec des probabilités différentes.

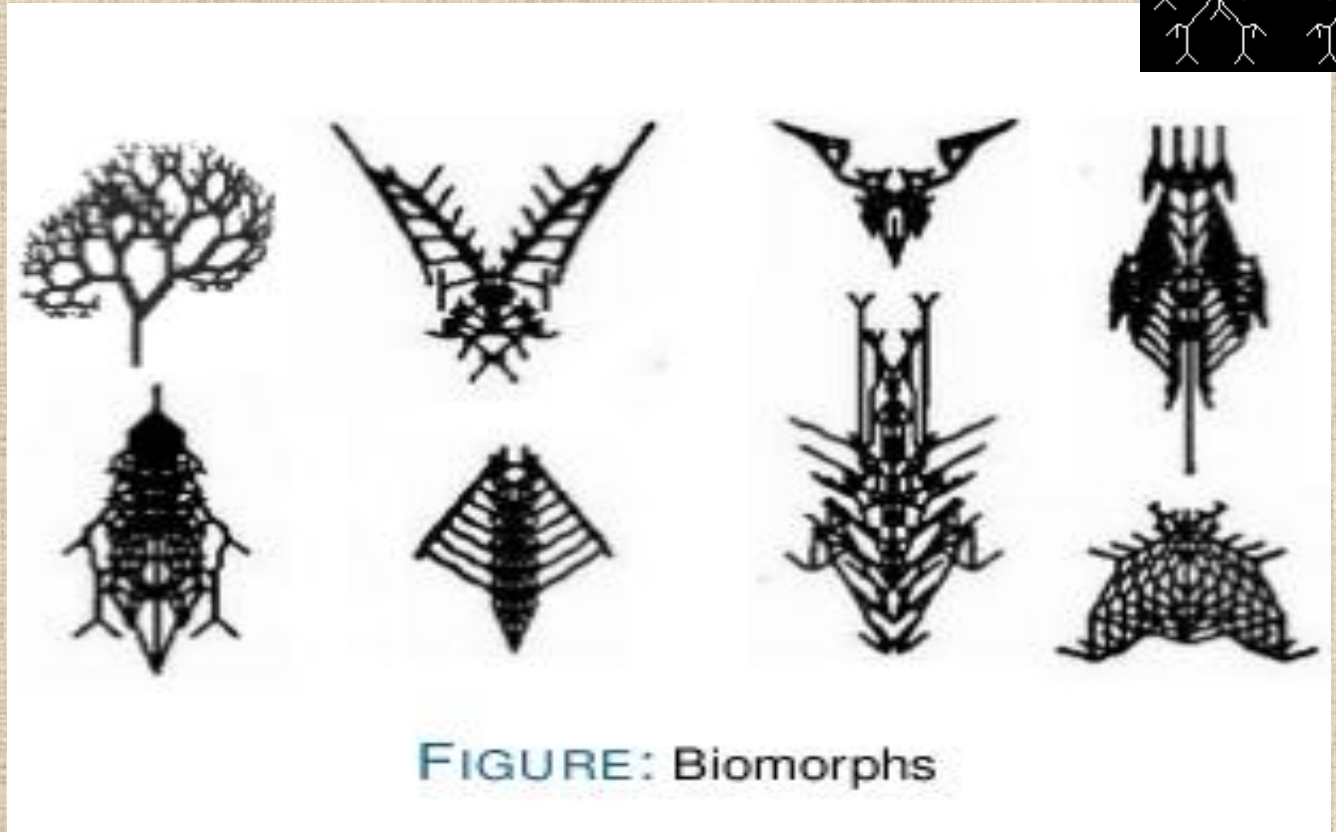
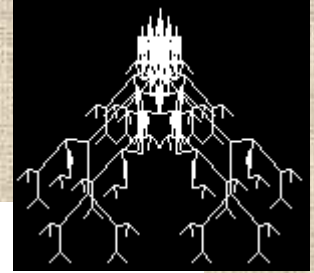
7- Biomorphs

Les biomorphs sont des créatures **numériques** bidimensionnelles. Elle ont été initialement créées par Richard Dawkins dans son fameux livre "**l'horloge aveugle**".

Le développement des biomorphs est basé sur un algorithme récursif; "l'horloge aveugle" dont le principe est très simple : à chaque itération un nouvel embranchement est généré.

L'objectif de Dawkins était de générer des formes **d'arbres** en partant d'un tronc, mais à sa grande surprise lors de l'utilisation de son algorithme démontré qu'il pouvait générer plusieurs catégories de formes **d'inspiration biologiques**.

7- Biomorphs



Cette figure montre une sélection parmi la grande diversité des formes engendrées par l'horloge aveugle de Dawkins, leurs formes troublantes nous rappellent celles de certains insectes et organismes microscopiques