



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – BISKRA

Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature et de la Vie

**Département d'informatique**

N° d'ordre : Numéro/M2/2019

## **Mémoire**

Présenté pour obtenir le diplôme de master académique en **Informatique**

Parcours : **Image et vie artificielle**

---

# **La Neuro-évolution pour l'apprentissage de réseaux de Neurones et le contrôle d'un robot Bipède**

---

**Par :**

**OUANIS HOUDA**

Soutenu le 11 juillet 2019, devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Président
Nom et prénom	Grade	Rapporteur
Nom et prénom	Grade	Examineur

## **Remerciement**

Notre cher défunte Dr Nesrine OUANNES que Dieu t'accorde miséricorde et t'héberge dans son vaste paradis.

Je voudrai remercier Monsieur le Professeur NourEddineDjedi pour son soutien et son aide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie par la suite monsieur Abdenour Ghenaiia et mes amies Amine Sadi et Djalal Messerhi pour leurs aides

Par la suite je remercie les membres du jury de nous avoir accordé l'honneur d'examiner et de valoriser notre travail

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A celui qui restera a toujours le support de ma vie de ses bonnes actions... Mon père Nadir qu'ALLAH t'accorde miséricorde et t'accepte dans son vaste paradis

A mon père et mes deux chères sœurs Imane,Chaima et mon cher Tahar toute personne qui a su m'encourager à prendre les bonnes décisions ainsi que toute ma famille.

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 1:</b>	
1. Introduction : .....	3
2. Introduction à la vie artificielle : .....	3
2.1 La vie : .....	3
2.2 La vie artificielle : .....	4
2.2.1 Où trouve-t-on la vie artificielle ? .....	5
2.2.2 Domaine d'application : .....	5
2.2.3 Principaux concepts de la vie artificielle : .....	5
3. Les techniques de La vie artificielle : .....	6
3.1 Les systèmes générateurs : .....	6
• Modèle réaction-diffusion : .....	6
• Automates cellulaires : .....	7
• L-Systèmes : .....	7
3.2 Les systèmes d'évolution : .....	8
3.3 Les systèmes d'apprentissage : .....	11
4. Les créatures artificielles .....	12
4.1 Morphogénèse artificielle : .....	13
4.1.1 Evolution de la morphologie seule : .....	13
4.1.2 Evolution de la morphologie et du contrôleur : .....	14
4.1.2.1 Les créatures de Karl Sims : .....	14
4.1.3 Evolution du contrôleur avec une morphologie figée : .....	17
4.1.3.1 Les créatures de Bongard et Lipson : .....	17
4.14 Evolution du contrôleur avec une morphologie de bipède : .....	19
4.14.1.1 Les bipèdes de Krister Wolff : .....	19
4.15 Embryogénèse artificielle : .....	20
4.15.1 Les créatures d'Arturo Chavoya : .....	20
4.16 La robotique évolutionniste : .....	21
4.16.1 Le Projet Golem de Hod Lipson : .....	21
Conclusion .....	22

## Chapitre 2:

1.1	Introduction.....	24
1.2	Historique de Réseau de neurone .....	24
1.3	Les avantages de réseau de neurone .....	24
1.4	Domaine d'application :.....	24
1.5	L'aspect biologique du neurone : .....	25
1.5.1	Neurone biologique :.....	25
1.5.2	Les Neurones artificielle : .....	25
1.6	Le perceptron : .....	26
1.7	Structure d'interconnexion d'un réseau de neurone : .....	27
1.8	Différents type d'apprentissage dans les réseaux de neurones :.....	28
1.8.1	Apprentissage supervisé :.....	29
1.8.2	Apprentissage non supervisé : .....	29
1.8.3	Apprentissage par compétition :.....	29
1.9	Réseau de neurone et algorithme évolutionniste :.....	30
1.10	Types de réseau de neurone :.....	31
1.10.1	Le réseau NEAT (Neuro-évolution of augmenting topologies) : .....	31
1.10.2	Les réseaux NEAT dans le contrôle de créature artificielle : .....	32
1.10.3	Les réseaux artificiels de régulation de gènes (GRN Gene Régulation Network).....	32
<b>2</b>	<b>Les algorithmes génétiques .....</b>	<b>33</b>
2.1	Introduction :.....	33
2.2	Philosophie des algorithmes génétiques : .....	34
2.3	Fonctionnement des algorithmes génétiques : Les algorithmes génériques ont pour objectifs contradictoires : .....	34
2.4	Caractéristique des algorithmes génétiques : .....	34
2.5	Domaine d'application : Les domaines d'application des algorithmes génétiques sont relativement variés, ils concernent notamment les disciplines suivantes .....	34
2.6	Les différences des algorithmes génétiques par rapport aux autres paradigmes : .....	34
2.7	La description d'un algorithme génétique : .....	35
2.7.1	Génome des individus : Un algorithme fait son travail en parallèle sur une population qui est un ensemble d'individus ou chromosome. ....	35
2.7.2	Le codage :On a trois principaux types de codage utilisables : .....	37
2.7.3	Sélection :.....	37
2.7.4	Croisement : .....	39
2.7.5	Mutation :.....	41

2.7.6	Remplacement :	42
2.8	Critère d'arrêt :	43
2.9	Les paramètres d'un algorithme génétique :	44

### Chapitre 3:

1	Introduction .....	45
2	Le contrôleur d'un humanoïde .....	45
3	Environnement virtuel et Moteur physique .....	50
4	Architecture globale du système :.....	50
Conclusion .....		564

### Chapitre 4

1	Introduction .....	58
2	Résultats de la locomotion : .....	58
3	Discussion des résultats : .....	61
4	Evaluation du Modèle : .....	62
5	Evaluation de la morphologie .....	62
Conclusion General .....		64

## Table de Figure :

Figure 1:Les boucles de LANGTON un automate cellulaire auto-réplicateur.....	5
Figure 2:Exemple d'image obtenue par modèle Réaction-Diffusion.....	7
Figure 3 : Exemple d'image obtenue par un modèle de L-Système .....	8
Figure 4:Principe de base d'un système évolutionniste .....	9
Figure 5:Une S-expression de « $2x+3$ ».....	10
Figure 6:Un croisement arithmétique .....	11
Figure 7:Un neurone artificielle en fonctionnement binaire et un seuil abrupt .....	11
Figure 8:Plante virtuelle. (a) [Jac, 1996]. (b) [Tou, 2003]. (c) [Bor, 2008].....	14
Figure 9:(a) Exemples de graphes de génotype et des morphologies .....	16
Figure 10:Les créatures évoluées de Karl Sims peuvent sauter, nager, marcher, entrer en compétition ou suivre un point lumineux. ....	17
Figure 11:(a) Morphologie de la créature comportant quatre pattes, huit actionneurs et un capteur de contact par patte.....	18
Figure 12: Les meilleurs résultats obtenus par les bipèdes de Krister Wolff dans un Environnement 3D. [WBH+, 2006]. ....	19
Figure 13:Travaux d'Yves Duthen et Arturo Chavoya [CD, 2007] l'utilisation des AG Pour faire évoluer les réseaux de normalisation artificielle (ARNs) pour les modèles Colorés désirés : .....	20
Figure 14:(a) Schéma d'illustration d'un robot évolutif. ....	22
Figure 15:Neurone biologique.....	25
Figure 17:Le neurone formel.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 18:Le perceptron.....	27
Figure 19:Réseau de neurone à trois couches.....	27
Figure 20:Réseau de neurone à connexion locale.....	28
Figure 21:Réseau de neurone à connexion récurrentes .....	28
Figure 22:Le scalaire $w_{ij}$ représente le poids associé à la connexion entre les neurones $i$ et $j$ . ....	29
Figure 23:Boucle d'évolution d'une population au sien d'un réseau de neurones ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 24:Illustration de la structure classique d'un gène .....	33
Figure 25:Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique. ....	36
Figure 26:Un chromosome selon Holland.....	36
Figure 27:illustration schématique du codage des variables réelles .....	37
Figure 28:la méthode de sélection de la loterie biaisée.....	38

Figure 29:Croisement avec un point de coupe. ....	40
Figure 30:Croisement avec deux points de coupe. ....	41
Figure 31:Croisement uniforme.....	41
Figure 32:Une mutation .....	42
Figure 33: Le monde d'ode (ODE).....	47
Figure 34: Les types de joints [ODE, 2006].....	48
Figure 35:Le modèle de la créature humanoïde simulée par ODE. ....	51
Figure 36:Echange de données sensorielles.....	53
Figure 37:Fonction d'activation .....	54
Figure 38:fonction d'activation .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure 39 : Morphologie de Robot simulée dans ODE. ....	58
Figure 40:Locomotion de la créature sur les premières générations. ....	59
Figure 41:Locomotion de la créature après plusieurs générations. ....	60
Figure 42: Graphe de fitness. ....	61

**Liste des tables :**

**Tableau 1:** Les paramètres de simulation de la créature humanoïde.....51

**Liste des schémas :**

**Schéma 1 :** Boucle d'évolution d'une population au sien d'un réseau de neurones.....31

**Schéma 2 :** Echange de données sensorielles .....52

# **Introduction générale**

## Introduction générale

De tous temps, l'homme n'a cessé de recréer les mécanismes de la nature. D'abord, il s'est servi de ce que la nature lui fournissait. Ensuite, lorsque l'exploitation de la nature devient excessive, il a trouvé un moyen de se débrouiller par lui-même, pour obtenir ce qu'il désirait pour cela le domaine de vie artificielle ouvre grand ces portes à cette course vers une gloire certaine.

Le cerveau est le principal organe des êtres vivants, il supervise les autres systèmes d'organes du corps. Il assure des fonctions, telles que la coordination des mouvements volontaires et toutes autres fonctions. Ce qui a poussé les chercheurs à penser de doter les créatures artificielles par un contrôleur qui joue le rôle d'un cerveau afin de garantir la coordination des mouvements des créatures artificielles.

L'un de ces contrôleurs proposés le réseau de neurone NEAT « neuro-évolution of augmenting topologies » a été mis en œuvre afin de garantir l'émergence de comportements de locomotion de la créature artificielle simulée. Le processus évolutif au sein du réseau utilise les propriétés physiques des créatures virtuelles et une fonction de fitness objective externe qui mèneront aux comportements espérés (la locomotion).

L'expérience consistant à modéliser une morphologie de créature virtuelle dans un moteur physique ODE « Open Dynamics Engine » qui fait évoluer des capacités de locomotion par l'utilisation d'un réseau de neurone NEAT qui fait évoluer tout fois la structure du réseau et les poids de connexion.

Ce mémoire sera organisé à travers les différents chapitres qui le compose est comme suit :

Après une introduction à la vie artificielle, après en citant les principaux concepts de la vie artificielle Ce chapitre fournit également les techniques de la vie artificielle qui contient description des systèmes évolutionnaires qui sont dans le cadre de la problématique donnée, joue un rôle primordial dans la conception du système de contrôle pour les créatures artificielles qu'on va les parler à la fin et ces travaux.

Dans le deuxième chapitre nous commençons par introduire les réseaux de neurones et ses rôles dans les contrôles des créatures artificielles par la suite on va parler sur les algorithmes génétiques.

## Introduction générale

---

Le troisième chapitre introduit les détails de la morphologie de notre créature, a modélisé ainsi que celui du contrôleur proposé NEAT, de l'environnement virtuelle dans le quelles créatures vont évoluer, et comment ses différentes parties communiquèrent entre eux.

Pour finir nous présenterons et on discutera les résultats obtenus au cours de la simulation et de l'évolution de la solution. Et pour conclure nous citerons quelque perspective ouverte dans le cadre du contrôle de créature artificielle par les réseaux NEAT.

# **Chapitre 1 :**

## **La vie artificielle**

## 1. Introduction :

Comme une expression, la Vie artificielle éveille les plus anciens fantasmes de l'humanité, l'homme s'est toujours interrogé sur sa capacité à créer la vie. Depuis une quinzaine d'années, des chercheurs d'horizons divers contribuent à ce nouveau domaine qu'ils ont baptisé Artificiel Life. Plus qu'une discipline scientifique au sens strict, la vie artificielle est un regroupement de travaux hétérogènes, ayant pour point commun de s'inspirer directement et explicitement des caractéristiques du vivant.

À partir du XVIIIe siècle, principalement sous l'impulsion des philosophes français, une nouvelle vision de la vie a progressivement émergé :

« Ceux qui connaissent les automates, considèrent le corps comme une machine qui, ayant été faite des mains de Dieu, est incomparablement mieux ordonnée, et a en soi des mouvements plus admirables, qu'aucune de celles qui peuvent être inventées par les hommes [...] s'il y avait de telles machines qui eussent les organes et la figure d'un singe ou de quelque autre animal sans raison, nous n'aurions aucun moyen pour reconnaître qu'elles ne seraient pas en tout de même nature que ces animaux (...)» [12]

Dans ce chapitre on va citer les principaux concepts de la vie artificielle et on parle sur les techniques de la vie artificielle qui contient une description des systèmes évolutionnaires qui sont dans le cadre de la problématique donnée et en finalisant par les créatures artificielle

## 2. Introduction à la vie artificielle :

### 2.1 La vie :

En fait, la vie peut être définie comme étant un 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)

D'après cette définition, le fait d'être vivant implique :

- ✓ La capacité de nutrition : autrement dit la recherche de sources d'énergie ;
- ✓ La capacité d'assimilation : c'est à dire la transformation de cette énergie en vue de reconstituer et de développer son corps matériel.
- ✓ La capacité de croissance : la faculté de se développer, de grandir...

## 2.2 La vie artificielle :

La vie artificielle est un ensemble de travaux s'inspirant de la vie réelle, l'idée est basée sur la capacité à créer la vie. Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'idée de la création d'une sorte de vie a vu le jour où une conférence internationale sur la vie artificielle fut organisée par Christopher Gale Langton, illustrant un modèle virtuel semblable au vivant.

En 1987, s'est tenue à Santa Fe au Nouveau Mexique la première conférence internationale sur la vie artificielle. Son jeune organisateur (Christopher Gale LANGTON) déclarait alors en prélude :

« La vie artificielle est l'étude des systèmes construits de mains d'hommes qui exhibent des comportements caractéristiques des systèmes naturels vivants. Elle vient en complément des sciences biologiques traditionnelles qui analysent les organismes vivants, en tentant de synthétiser des comportements semblables au vivant au sein d'ordinateurs et d'autres substrats artificiels. En étendant les fondements empiriques sur lesquels la biologie est basée au-delà de la vie à base de carbone qui a évolué sur Terre, la vie artificielle peut contribuer à la biologie théorique en positionnant la vie telle que nous la connaissons au sein d'un espace plus large : la vie telle qu'elle pourrait être. »

L'objectif de LANGTON était plus ambitieux encore :

« Le but ultime de la vie artificielle serait de créer la « vie » dans un autre substrat, idéalement un substrat virtuel où l'essence de la vie aurait été abstraite des détails de sa mise en œuvre dans quelque substrat que ce soit. Nous aimerions construire des modèles qui sont si semblables au vivant qu'ils cesseraient d'être des simulations de la vie pour en devenir des exemples. »

Les idées de Langton ont été mises en pratique par Alonzo Church et Alan Turing. La machine de Turing qui fut l'origine de l'ordinateur pourrait reproduire le comportement physique de n'importe quel système.



**Figure 1:** Les boucles de LANGTON un automate cellulaire auto-réplicateur.

### 2.2.1 Où trouve-t-on la vie artificielle ?

On peut considérer aujourd'hui que la vie artificielle est partout autour de nous.

- ✓ Ce ne sont plus des hommes qui conçoivent les avions, ce sont des algorithmes génétiques qui s'en occupent à leur place ;
- ✓ La reconnaissance vocale, de la reconnaissance des visages et autres systèmes de sécurité ;
- ✓ L'étude du comportement des foules dans les immeubles contribue à la fluidification de la circulation automobile.

On peut affirmer aujourd'hui, qu'on les retrouve partout. Ils tendent par ailleurs à envahir davantage notre quotidien après avoir envahi le secteur de l'industrie de pointe.

### 2.2.2 Domaine d'application :

- ✓ La robotique autonome.
- ✓ La vie computationnelle (les mondes virtuels, les automates cellulaire).
- ✓ L'exobiologie.
- ✓ Le hardware évolutif...

### 2.2.3 Principaux concepts de la vie artificielle :

#### a) Influence des comportements de la vie réelle :

La définition de Langton qui, de nos jours reste la base de la vie artificielle, traduit l'analogie entre les systèmes réalisés par l'homme et qui présentent des similitudes en termes de comportement caractéristiques avec les systèmes vivants naturels.

Quelques propriétés caractéristiques définissant ce domaine :

- ✓ L'être humain est à l'origine de toute vie artificielle.
- ✓ Un système de vie artificielle est autonome.

- ✓ Un système de vie artificielle a une perception de son environnement permettant l'apparition d'interactions.
- ✓ Un système de vie artificielle peut se reproduire.
- ✓ Un système de vie artificielle possède la capacité d'adaptation dans ses comportements.
- ✓ On observe dans de tels systèmes l'émergence de propriétés non prévues.

#### **b) La vie artificielle au service du vivant virtuel :**

La vie artificielle est l'étude des propriétés émergentes dans les systèmes par opposition aux systèmes déterministes. Le comportement individuel n'affecte pas l'esprit du groupe, d'où l'importance des travaux sur l'évolution de la structure vis à vis des changements des conditions initiales.

### **3. Les techniques de La vie artificielle :**

#### **3.1 Les systèmes générateurs :**

Permettent la création de nouveaux individus par incrémentation.

- **Modèle réaction-diffusion :**

- ✓ Inspiré de réactions chimiques existantes 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 ».

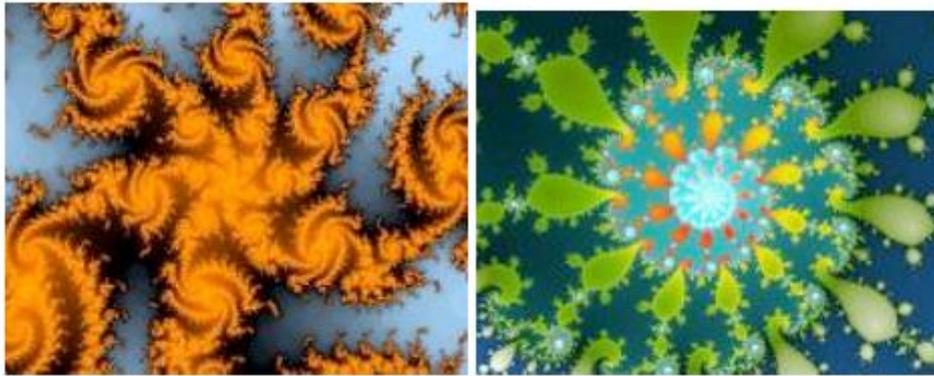
La réaction chimique qui a alors lieu est décrite localement par deux composantes :

**La réaction :** une réaction chimique mettant en jeu les deux réactifs qui se produit

Localement ;

**La diffusion :** indépendamment l'un de l'autre des deux réactifs se produit un phénomène de diffusion.

Ils sont utilisés pour la production de textures naturelles ou pour simuler le comportement d'insectes sociaux.



**Figure 2:**Exemple d'image obtenue par modèle Réaction-Diffusion.

- **Automates cellulaires :**

La plate-forme de base sur laquelle se produit la réaction des deux produits peut être continue ou discrète, un exemple concret celui de la vie qui était inventé par John Horton Conway en 1970, alors qu'il était professeur de mathématiques à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni.

On précise que le jeu de la vie n'est pas vraiment un jeu 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 préétablies.

- **L-Systèmes :**

- ✓ LINDENMAYER a proposé la méthode des L-Systèmes mise en œuvre graphiquement par P. PRUNSINKIEWICZ,
- ✓ C'est une méthode de description formelle de la structuration des plantes basée sur une forme récursive de grammaire générative.
- ✓ Un L-système est un ensemble de règles et de symboles qui modélisent un processus de croissance d'êtres vivants comme des plantes ou des cellules.
- ✓ Le concept L-systèmes est la notion de réécriture qui est une technique pour construire des objets complexes en remplaçant des parties d'un objet initial simple en utilisant des règles de réécriture.
- ✓ La grammaire à l'origine de l'évolution de cette vie artificielle se divise en deux types :  
**Une grammaire paramétrée :** conditionner l'activation des règles. A travers ces conditions, l'environnement de l'évolution peut exprimer ces contraintes comme l'éclairage dans les cas d'une croissance de plantes

**Une grammaire stochastique :** éviter une présence trop marquée de symétrie. Avec un bon compromis entre les deux types de grammaire, une simulation pourra être orientée sans pour autant perdre son caractère imprévisible.

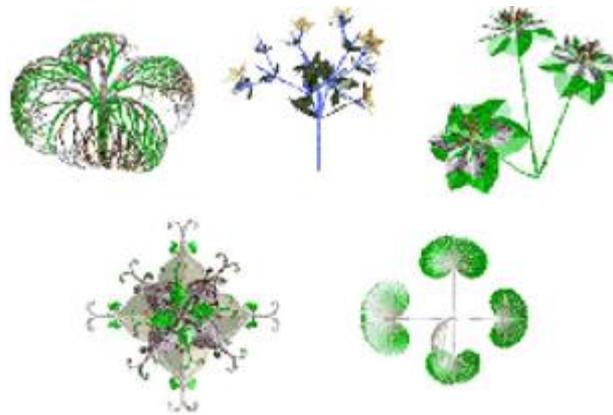
Un L-système est décrit par :

Alphabet :  $V = \{A, B\}$

Constantes :  $S = \{\}$

Axiome de départ :  $w = A$

Règles :  $(A \rightarrow AB), (B \rightarrow A)$



**Figure 3 :** Exemple d'image obtenue par un modèle de L-Système

### 3.2 Les systèmes d'évolution :

Qui sont à l'origine de l'évolution d'une population contrainte dans un environnement.

- ✓ Ils ont été introduits dans les années 70 ;
- ✓ Il s'agit de la simulation du processus d'évolution darwinienne appliquée à un environnement virtuel ;
- ✓ Il s'agit d'une sélection d'individus au détriment d'autres suivant des objectifs qui ne sont pas forcément la survie tel que l'explique la théorie de Darwin ;
- ✓ Le système a un objectif et l'évolution de ses individus converge vers une solution possible ;
- ✓ L'évolution se fait par l'intermédiaire d'opérations similaires aux opérations génétiques portant sur l'ADN, la population est composée de génotypes représentant des solutions potentielles ;
- ✓ Les systèmes d'évolution exploitent trois opérations :
  - a) L'évaluation : définit de la convergence ;

b) La sélection : permet le choix des meilleurs individus ;

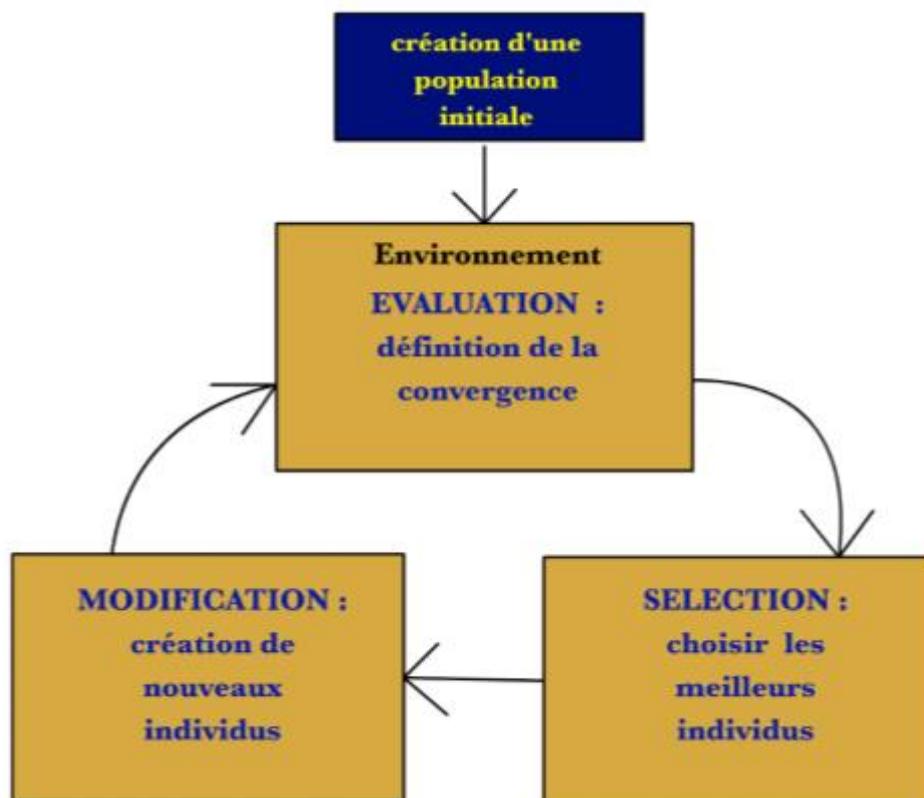
c) La modification : La création de nouveaux individus, On distingue :

- **Les algorithmes génétiques :**

Une technique évolutionniste créée en 1975 par John Holland, ayant la même terminologie de tous les systèmes évolutionnistes.

Elle est utilisée pour un système évoluant dans le temps qui a pour objet :

- Optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues, multimodales, bruitées ...) ;
- Traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects ...) ;
- Optimisation d'emplois du temps ;
- Optimisation de design ;
- Contrôle de systèmes industriels.



**Figure 4:**Principe de base d'un système évolutionniste.

- **La programmation génétique :**

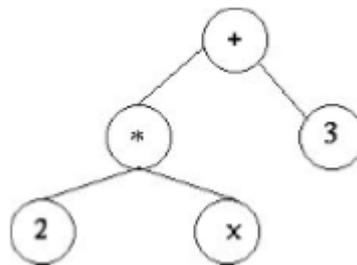
- ✓ Il s'agit donc d'un nouveau paradigme génétique dont le principal promoteur est J. KOZA depuis 1992.
- ✓ Les techniques fondamentales restent les mêmes qu'en algorithmes génétiques, ainsi une fitness est calculée pour chaque arbre, et les individus les plus adaptés au contexte peuvent se reproduire.
- ✓ L'amélioration de la représentation des individus qui impose une connaissance a priori de la forme de la solution.
- ✓ Deux principes de base sont à noter en ce qui concerne les croisements ou les mutations, qui les rendent très efficaces :

**La stratégie de conservation :** du meilleur chromosome dans la population suivante ;

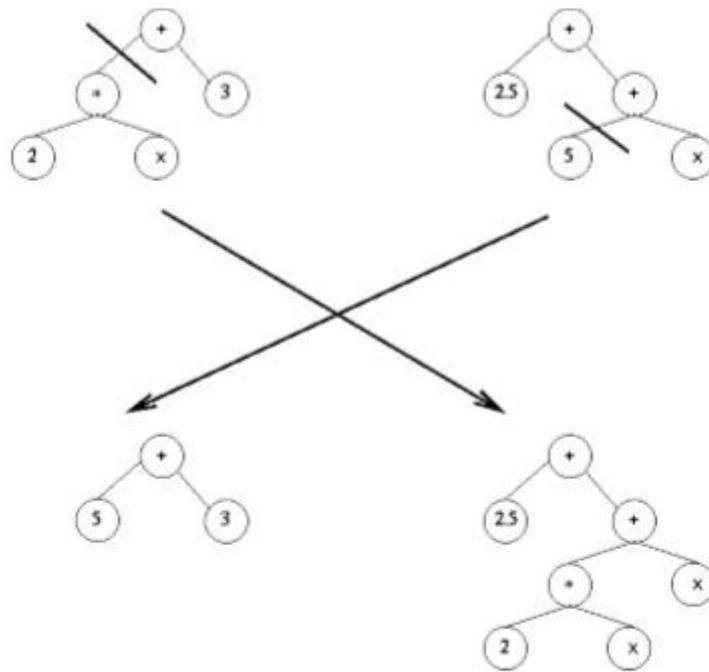
**La stratégie de la population sans double :** qui se résume à ne rajouter un chromosome que si l'individu en question reste unique.

**La stratégie de conservation :** du meilleur chromosome dans la population suivante ;

**La stratégie de la population sans double :** qui se résume à ne rajouter un chromosome que si l'individu en question reste unique.



**Figure 5:** Une S-expression de « $2x+3$ »



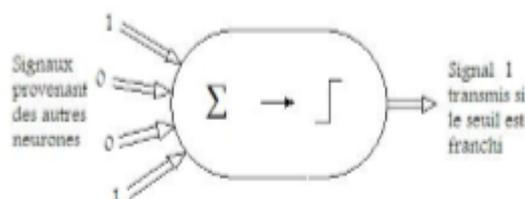
**Figure 6:**Un croisement arithmétique

**3.3 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 réseaux de neurones :**

- ✓ Inspiré du fonctionnement du cerveau, En 1943 McCulloch et Pitts ont effectué cette recherche pour modéliser mathématiquement ces fonctions.
- ✓ Le fonctionnement d'un neurone se traduit par l'application d'un seuil à une somme de signaux entrants. L'implémentation du seuil la plus courante est la fonction sigmoïde. Ainsi si la somme dépasse le seuil la sortie du neurone sera égale à 1 sinon 0.
- ✓ L'apprentissage du réseau se traduit par la modification des poids de connections entre tous les neurones.



**Figure 7:**Un neurone artificielle en fonctionnement binaire et un seuil abrupt

- **Les systèmes de classeurs :**

La base théorique de ces systèmes d'apprentissage, a été posée par Holland en 1975, il implémenta en 1978 avec Rickell le premier classifieur.

Il s'agit d'un système d'apprentissage incrémental adapté à l'apprentissage supervisé ou par renforcement, ces systèmes sont basés sur les algorithmes génétiques, ils fonctionnent sur l'établissement de règles.

Une population de règles de productions prend la forme suivante : SI «condition» ALORS «action». Ces règles sont activées par des messages.

Les messages et les règles sont codés en binaire étendu :

- Présence d'un caractère de généralisation : # ;
- Les messages ont ce type de code : 01110010 ;
- Les classifieur : 01#1##10 : : 01111010 (condition : : action).

Ce système repose sur une double action : la génération et l'arbitrage.

**L'arbitrage** consiste à évaluer l'utilité d'un classifieur par un scalaire qu'on appelle force ou fitness.

**Les générations de règles**, sont effectuées par des algorithmes génétiques qui sont aussi à la source d'une évaluation des règles. Et de la même manière ils gardent les règles qui ont les plus hauts fitness et élimine les autres.

Le principe de fonctionnement peut se développer dans un ordre défini :

- ✓ Le système reçoit un message ;
- ✓ Ensuite, le système crée un ensemble de règles correspondant au message ;
- ✓ On sélectionne ensuite dans cet ensemble les règles qui ont donné le résultat le plus pertinent ;
- ✓ Exécution de l'action et distribution aux règles ayant permis de générer l'action ;
- ✓ Application de l'algorithme génétique pour améliorer la population de règles.

L'amélioration de ce système a permis d'alléger son exécution. Divers changements tels que la création dynamique de règles, ont permis à ce système d'apprentissage d'être aussi performant que les réseaux de neurones.

#### **4. Les créatures artificielles**

Une créature artificielle évolutionniste est une entité virtuelle ou réelle qui possède une morphologie et un comportement dont le processus est évolutionniste.

Les propriétés minimales d'une créature artificielle :

- ✓ Une créature artificielle est une unité ;

- ✓ Une créature artificielle possède une morphologie ;
- ✓ Une créature artificielle doit interagir avec son environnement ;  
Les propriétés suivantes ne sont pas indispensables ;
- ✓ Une créature artificielle est autonome ;
- ✓ Une créature artificielle s'auto produit ;
- ✓ Une créature artificielle peut se reproduire elle-même.

#### **4.1 Morphogénèse artificielle :**

La simulation comportementale concerne les morphologies figées. En effet, la morphogénèse permet de faire évoluer la morphologie et le comportement des créatures en assemblant différents blocs fonctionnels.

La simulation comportementale travaille sur le comportement global d'humanoïdes et l'évolution conjointe de la morphologie et du comportement permet de retrouver par évolution des comportements basiques tels que la marche ou la nage, ces derniers sont basés sur des réseaux de neurones ou des systèmes de classeurs.

L'évolution de la morphologie implique une représentation logique de celle-ci permettant son codage dans un génome. Ainsi, un algorithme évolutionnaire peut faire évoluer cette morphologie et son comportement dans l'environnement.

L'objectif des travaux sur la morphogénèse est de générer des créatures artificielles adaptées à leur environnement.

On peut citer à titre exemple les travaux de Karl Sims [Sim94a] qui exploitent des blocs possédant différentes propriétés telles que la taille, la forme et la position des différents capteurs de contact.

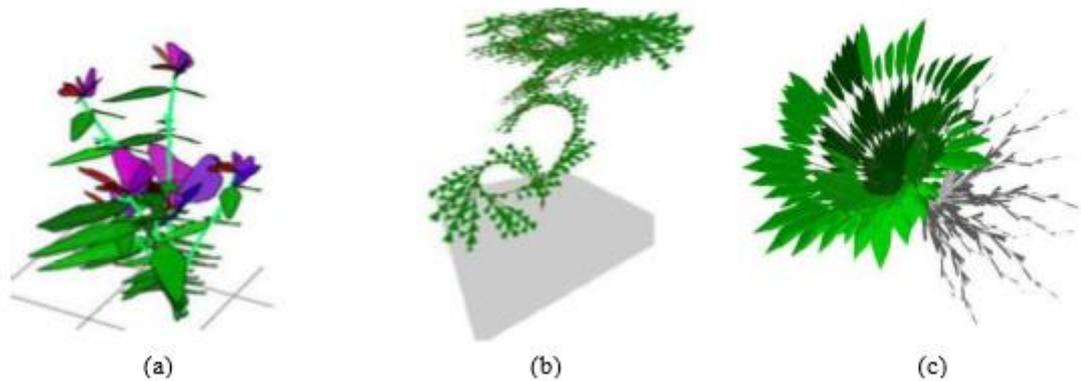
Enfin, le processus d'évolution peut s'appliquer à la morphologie des créatures comme il peut s'appliquer conjointement à la morphologie et au contrôle.

##### **4.1.1 Evolution de la morphologie seule :**

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'évolution de la morphologie seule. Parmi ces travaux, nous pouvons citer ceux qui se sont intéressés à l'embryogénèse, ceux-ci se sont consacrés uniquement au processus de développement des formes tels que les travaux de Chavoya.

D'autres travaux se sont, par ailleurs, consacrés à l'évolution de plantes virtuelles mais qui ont été classés à part, car une équivoque existerait quant à la considération des plantes

artificielles en qualité de créatures artificielles, du fait qu'elles ne génèrent pas de mouvements car elles sont immobiles [Bor, 2008], [Jac, 1996a], [Tou, 2003].



**Figure 8:**Plante virtuelle. (a) [Jac, 1996]. (b) [Tou, 2003]. (c) [Bor, 2008].

#### 4.1.2 Evolution de la morphologie et du contrôleur :

##### 4.1.2.1 Les créatures de Karl Sims :

Une compensation classique, dans le domaine de l'infographie et de l'animation, est celle de la complexité par rapport au contrôle.

Il est difficile de construire des entités virtuelles intéressantes ou réalistes et d'assurer et maintenir toujours leur contrôle.

Il est, également difficile de construire tout un monde virtuel complexe, s'il est nécessaire de concevoir, modéliser et assembler chaque composant.

- **Le concept de génotype et de phénotype :**

Quand on parle de l'évolution artificielle, on utilise les termes biologiques spécifiques, le **phénotype** et le **génotype**, ce dernier est une représentation codée d'une solution possible d'individus ou de problèmes. Dans les systèmes biologiques, un génotype est représenté par l'ADN et contient les instructions pour le développement d'un organe ou d'un organisme.

Les algorithmes génétiques emploient typiquement des populations de génotypes qui se composent de séries de nombres binaires ou de paramètres. Ceci, pour produire les **phénotypes** qui sont alors évalués selon quelques critères de fitness et reproduits selon un processus sélectif. De nouveaux génotypes sont générés en copiant, mutant, et/ou combinant les génotypes des individus les plus adaptés. Pendant que le cycle se répète, la population devrait monter à des niveaux de comportements plus évolués et plus élevés traduits par un haut niveau de la fitness.

- **Le contrôleur de la créature** : c'est un «cerveau» virtuel qui en détermine et contrôle le comportement.
- **Le cerveau** : est un système dynamique qui accepte les valeurs des senseurs d'entrée et fournit des valeurs aux effecteurs de sortie. Les valeurs de sortie sont appliquées comme des forces ou des moments de rotation appliquées au niveau des degrés de liberté des joints associés au corps.
- **Les senseurs, les effecteurs, et les signaux internes des neurones** : sont représentés ici par des scalaires continuellement variables qui peuvent être positifs ou négatifs.

Dans les travaux de Sims, nous pouvons remarquer que:

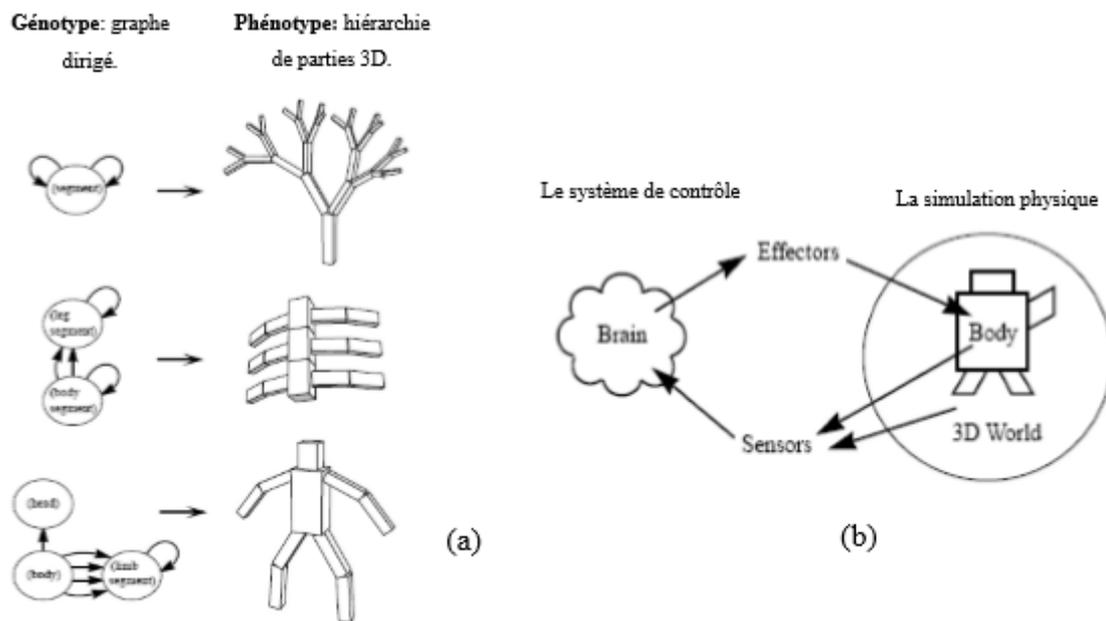
- ✓ Les corps des créatures sont tridimensionnels possédant des mécanismes physiques.
- ✓ La structure physique tridimensionnelle d'une créature peut s'adapter à son système de contrôle, et vice versa, puisqu'ils évoluent Ensemble.
- ✓ Les systèmes nerveux des créatures sont déterminés par optimisation: le nombre de nœuds internes, la connectivité et le type de fonction que chaque nœud neuronal exécute, est inclus dans la description génétique de chaque créature. Ces derniers peuvent se développer dans la complexité pendant qu'une évolution se produit.
- ✓ Les nœuds éliminent la nécessité pour qu'un utilisateur fournisse n'importe quelle information spécifique sur la créature telle que la forme, la taille, les contraintes de joint, les senseurs, les actionneurs, ou les paramètres neuronaux internes. Ainsi, ici un processus de développement est employé pour produire des créatures et leurs systèmes de contrôle, et permet à des composants semblables
- ✓ La représentation génétique de cette morphologie est un graphe dirigé de nœuds et de connections. Chaque graphe contient les instructions de développement pour la croissance d'une créature, et fournit une manière de réutiliser des instructions pour générer des composants semblables ou récursifs dans une créature.

Un type de joint détermine les contraintes sur le mouvement relatif entre la présente partie et ses parents en définissant le nombre de degrés de liberté du joint et du mouvement permis.

Les différents types de joint permis sont: rigide, révoluté-twist, universel, bend-twist, twist-bend ou sphérique.

- ✓ Le placement d'une partie d'un enfant par rapport à son parent est décomposé selon la position, l'orientation, l'échelle et la réflexion. Ainsi, chacun peut être muté indépendamment. La position de l'attachement est forcée pour être sur la surface de la partie du parent.

- ✓ Il y a plusieurs composants de la simulation physique utilisée dans le travail de Karl Sims, tels que dynamique articulée du corps, intégration numérique, détection de collisions, réponse aux collisions, frottements ainsi qu'un effet liquide visqueux facultatif.



**Figure 9:(a)** Exemples de graphes de génotype et des morphologies

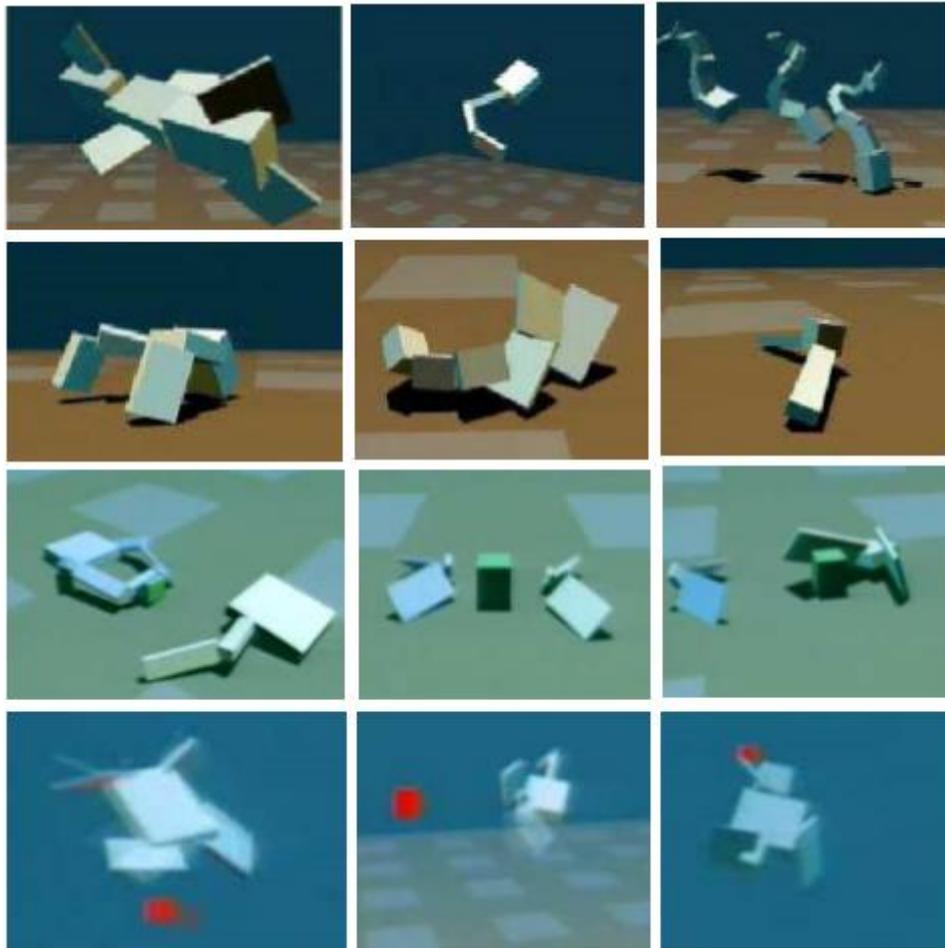
Correspondantes de créatures de Karl Sims.

(b)Le cycle des effets entre le cerveau, le corps de la créature et L'environnement.

- ✓ Les créatures virtuelles peuvent évoluer grâce à un processus d'optimisation pour une tâche ou un comportement spécifique.
- ✓ Une créature est développée à partir de sa description génétique comme précédemment expliqué, elle est placée ensuite dans un monde virtuel dynamiquement simulé.
- ✓ Le contrôleur fournit les forces effectrices qui déplacent des parties de la créature.
- ✓ Les senseurs rapportent les aspects du monde et le corps de la créature les transmettent au cerveau, après quoi, le comportement physique résultant de la créature est évalué. Après une durée donnée de temps virtuel, une valeur de fitness est assignée.

Durant la simulation, les créatures sont évaluées pour une tâche spécifique dans L'environnement tridimensionnel. Les résultats obtenus sont les suivants, après plusieurs heures de calcul et plusieurs simulations sur une Connexion Machine, l'évolution sélectionne différent individus pouvant se mouvoir en rampant, nageant ou en sautant (Figure3).

La créature la plus élaborée peut suivre une source de lumière en nageant. Les résultats obtenus offrent une grande diversité de créatures ayant des stratégies très différentes.



**Figure 10:** Les créatures évoluées de Karl Sims peuvent sauter, nager, marcher, entrer en compétition ou suivre un point lumineux.

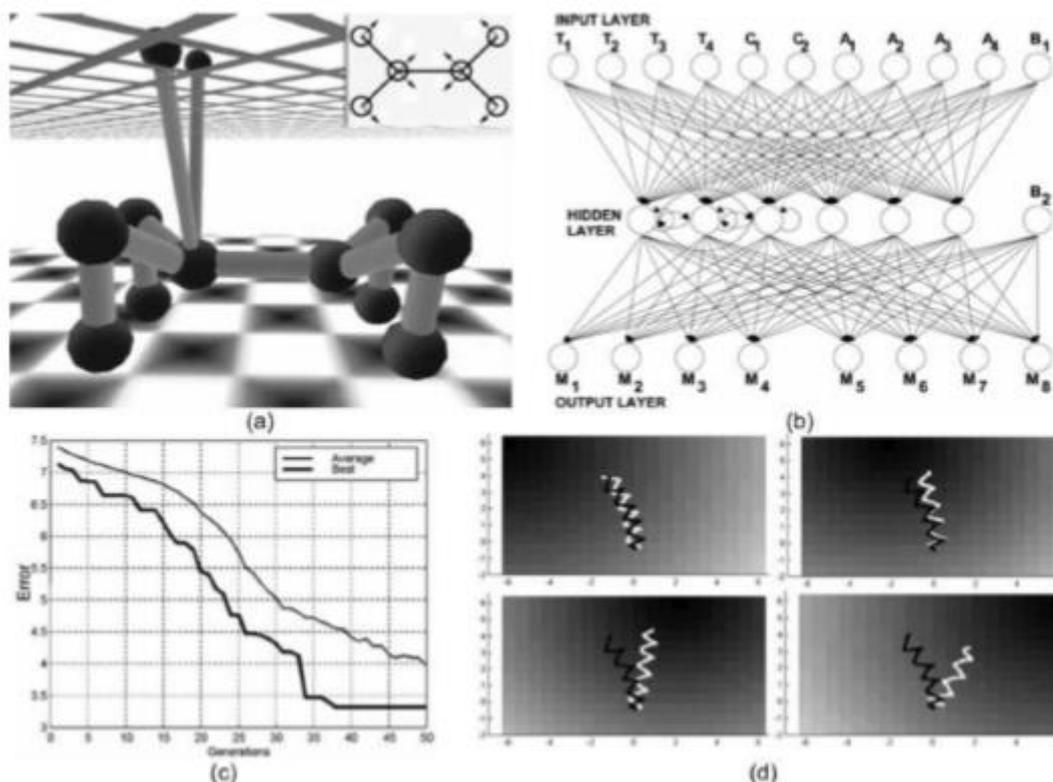
#### 4.1.3 Evolution du contrôleur avec une morphologie figée :

Parmi les premiers à réaliser un contrôleur pour une entité évoluant dans un environnement physique sont McKenna et Zeltzer et on a des travaux sur l'évolution de contrôleurs pour une morphologie figée existante Comme ceux de LjSpeert, Lee, van de Panne.

##### 4.1.3.1 Les créatures de Bongard et Lipson :

- ✓ Les travaux de Bongard et Lipson [BL, 2004a; BL, 2004b et Lip, 2005] portent sur le contrôle de créatures à pattes. Celles-ci réalisent par évolution un contrôleur qui permet à la créature de se déplacer

- ✓ La créature appartient à un environnement physique réaliste. Elle possède, en outre, quatre pattes munies de capteurs de contact pour détecter le sol, de capteurs d'angle au niveau des articulations et de deux capteurs de phéromones.
- ✓ Le comportement de la créature est généré par un réseau de neurones. Au commencement de la simulation, les neurones relient les capteurs aux actionneurs.
- ✓ La simulation comporte deux cents individus. Au bout de cinquante générations, le contrôleur produit arrive à contrôler la créature pour qu'elle se déplace en ligne droite ou si on le désire qu'elle suive la piste de phéromones. L'évolution a ainsi produit un contrôleur avec deux fonctions indépendantes.



**Figure 11:**(a) Morphologie de la créature comportant quatre pattes, huit actionneurs et un capteur de contact par patte.

(b) Réseau de neurones reliant les capteurs aux actionneurs.

(c) La progression de l'erreur à travers les générations.

(d) En blanc, le chemin suivant quand les capteurs de phéromones sont captifs et en noir quand ils sont désactivés [Lip, 2005].

#### 4.1.4 Evolution du contrôleur avec une morphologie de bipède :

Un robot humanoïde (bipède) est un robot de forme humaine. La plupart des robots de science-fiction que nous voyons sur les écrans sont dotés d'une apparence humaine. C'est pourquoi, pour beaucoup de gens, le robot humanoïde est le robot par défaut. Du point de vue de la robotique, il est difficile d'affirmer qu'un robot créé effectuant les tâches de l'homme doit absolument être de forme humaine. Les avions, par exemple, n'ont pas l'apparence des oiseaux. Plus généralement, les tâches auxquelles un certain robot est destiné déterminent sa forme idéale.

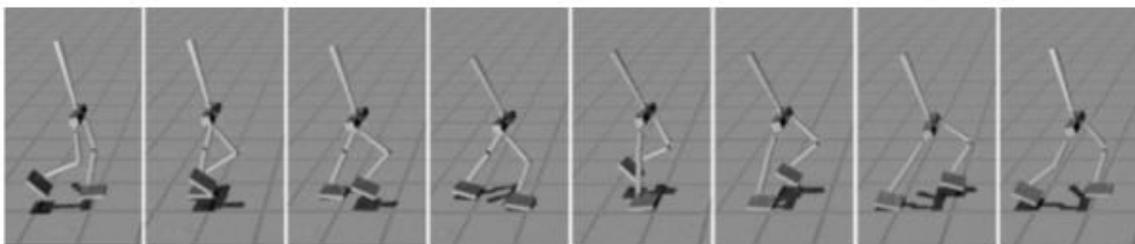
##### 4.1.4.1 Les bipèdes de Krister Wolff :

Réalisant une marche anthropomorphe, le travail de Krister Wolff et Jimmy Pettersson [WBH+, 2006], représente une étude abstraite pour un robot bipède simulé qui a été réalisé par le moyen de l'évolution artificielle d'un modèle de réseaux générateurs de patterns (CPGs).

L'approche a permis d'étudier par des simulations dynamiques de corps rigides 3D d'un robot bipède avec 14 degrés de liberté.

Le modèle CPG a été employé comme unité d'oscillateur, avec des chemins d'intercommunication entre les oscillateurs subissant des modifications structurales en utilisant un algorithme génétique.

En outre, l'algorithme génétique a fait évoluer les poids des interconnexions dans le réseau de rétroaction de la structure prédéfinie. De plus, une structure support a été ajoutée au robot afin de guider le processus évolutionnaire vers des démarches humaines. Plus tard, cette structure a été enlevée, et la capacité du meilleur contrôleur à produire une démarche bipède sans aide de la structure support a été testée et vérifiée. Des modèles stables et normaux de démarche ont été obtenus, avec une vitesse maximum de marche d'environ 0,9 m/s.



**Figure 12:** Les meilleurs résultats obtenus par les bipèdes de Krister Wolff dans un Environnement 3D. [WBH+, 2006].

## 4.2 Embryogénèse artificielle :

L'embryogénèse est l'une des voies prometteuses pour les créatures artificielles. Elle consiste à s'inspirer une fois de plus du vivant pour générer la morphologie, le but étant de développer une créature à partir d'une cellule œuf.

Les premiers travaux d'embryogénèse artificielle furent ceux d'Hugo de Garis [dG, 1999]. En utilisant un automate cellulaire, il développa des formes bidimensionnelles. Les règles de cet automate furent déterminées à l'aide d'un algorithme génétique. Le but était générer des formes ressemblant à des lettres et la simulation des mécanismes de spécialisation cellulaire dont différents travaux existent sur ce sujet.

### 4.2.1 Les créatures d'Arturo Chavoya :

Arturo Chavoya a introduit un autre modèle dans lequel le système de régulation génétique est codé au début du génome [CD, 2007], la production de chaque protéine est conditionnée par les sites d'inhibition et d'activation. La concentration finale de cette protéine détermine l'activation ou non d'une certaine fonction de la cellule. Si la concentration de la protéine est supérieure à un certain seuil, le gène est activé et de ce fait sa fonction correspondante l'est également (figure 13).



**Figure 13:** Travaux d'Yves Duthen et Arturo Chavoya [CD, 2007] l'utilisation des AG Pour faire évoluer les réseaux de normalisation artificielle (ARNs) pour les modèles Colorés désirés :

- (a) modèle carré de Trois-couleur.
- (b) modèle carré de Quatre-couleur.
- (c) un modèle du Drapeau français avec un poteau.

### 4.3 La robotique évolutionniste :

On peut désormais définir les robots comme étant des créatures artificielles construites à partir de la définition des créatures artificielles et des propriétés minimales.

La robotique évolutionnaire est un sous domaine de la robotique dans lequel les algorithmes évolutionnaires sont utilisés pour la construction de robots [Weh, 2005], [Nol, 2000].

#### 4.3.1 Le Projet Golem de HodLipson :

Les travaux de Lipson et Pollack [LP, 2000], [PHLF, 2003] sont certainement les plus finalisés par le fait que leurs créatures ont été par la suite effectivement réalisées (figure 7-d). Ce sont les seules à avoir suivi tout le processus d'évolution jusqu'à leur réalisation physique.

- ✓ Les créatures sont composées essentiellement d'éléments dit 1D de tubes et de pistons (figure 14). Elles ne comportent pas de capteurs.
- ✓ Les créatures peuvent se mouvoir en compressant leurs pistons.
- ✓ Les joints entre les pistons peuvent être rigides ou permettre un certain degré de liberté.
- ✓ Les actionneurs sont contrôlés par un réseau de neurones produisant des fonctions sinusoïdales et permettant des topologies récurrentes.
- ✓ L'évolution permet de modifier la morphologie des créatures ainsi que leurs contrôleurs

Au début de la simulation, la population est de deux cents individus sans tubes et sans neurones. Les mutations sont alors la seule issue pour ajouter de nouveaux éléments aux créatures. La fonction de fitness détermine leur habilité à se déplacer en mesurant la distance parcourue par les créatures à partir de leur centre de gravité. La sélection permet aux créatures ayant le plus de potentiel de se reproduire. Ce processus est reconduit de trois cents à six cents fois. Après plusieurs dizaines de générations, les premiers mouvements de créatures apparaissent. Les patterns des morphologies et des neurones permettant de se mouvoir sont ensuite répondus dans la population par le processus de sélection et de croisement. L'évolution des populations de leur génotype fait apparaître des diversifications et des extinctions.

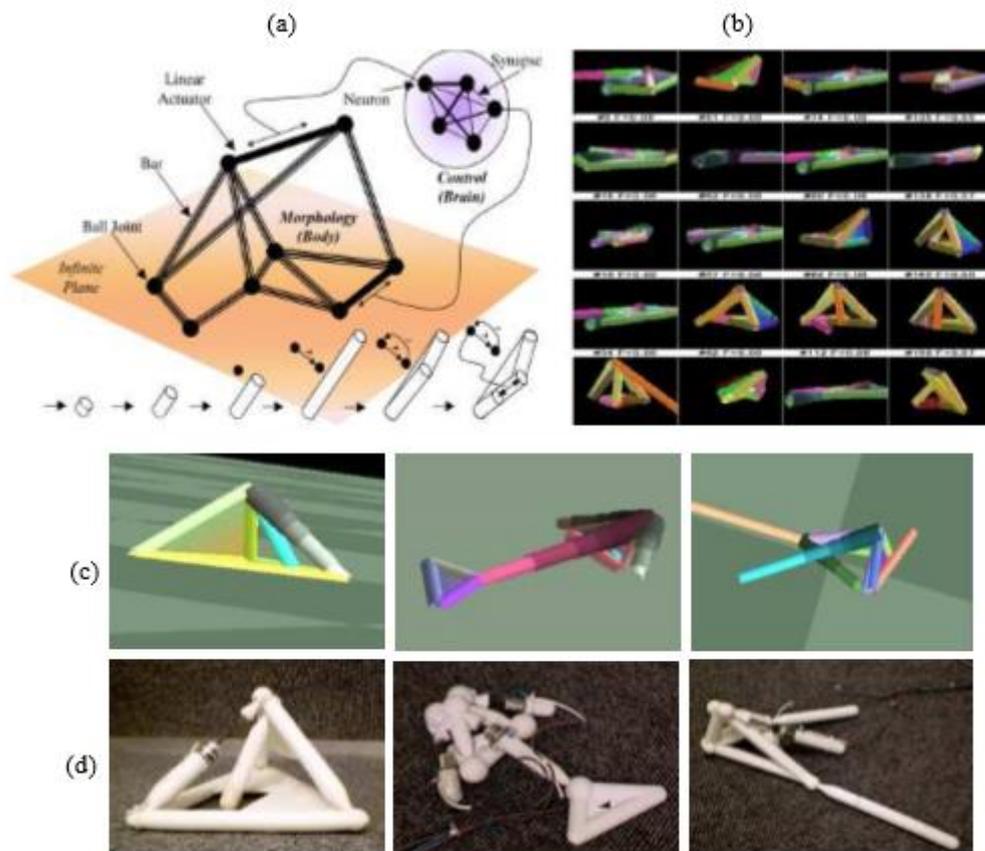


Figure 14:(a) Schéma d'illustration d'un robot évolutif.

(b) Des instances différentes de la génération entière.

(c) Trois évolutions du robot, dans la simulation

(d) les trois robots reproduits en réalité physique en utilisant un

Prototype rapide [LP, 2000].

## Conclusion

La vie artificielle est exploitée dans le but de créer une vie synthétique sur ordinateur afin d'étudier, simuler et de comprendre les systèmes vivants, la définition et les caractéristiques de la vie artificielle sont représentées par l'application de ses études dans différents domaines, en règle générale les domaines d'application comprennent le contrôle, la fabrication et la mise en œuvre des systèmes de contrôle pour robots dans la grande partie est consacré à la locomotion, dispositif de développement des neuro-prothèses cependant d'une manière plus significative la VA permet de simuler un nombre de processus naturels qui caractérisent seulement les systèmes vivants y compris la naissance et la mort la croissance et le développement, la sélection naturelle, l'évolution, la perception, la locomotion la manipulation, le

comportement adaptatif . L'apprentissage et l'intelligence, pour autant la vie artificielle a donné naissance à plusieurs des principales voies de recherche et de développement qui attire de plus en plus l'attention.

**Chapitre 2 :**

**Réseau de neurone.**

**&**

**Algorithme génétique.**

## 1. Réseau de neurone

### 1.1 Introduction

Le réseau de neurone est à la base une représentation du comportement intelligent du cerveau plus précisément tenté de limiter.

Dans ce chapitre nous commençons par introduire les réseaux de neurones et ses rôles dans les contrôles des créatures artificielles par la suite on va parler sur les algorithmes génétiques

### 1.2 Historique de Réseau de neurone

Les chercheurs ont un objectif de construire une machine capable de reproduire certains aspects de l'intelligence humaine.

En 1943 Mac Culloch et Pitts ont proposé des neurones formels inspirés des neurones biologiques qui sont capable de mémoriser des fonctions booléennes simples.

En 1949 Donald Hebb [heb, 1949] propose son modèle de synapse qui permet de rendre compte de processus d'apprentissage mis en œuvre.

### 1.3 Les avantages de réseau de neurone

Ils sont conçus pour reproduire certaines caractéristiques des mémoires biologiques par le fait qu'ils sont :

- ✓ Le traitement parallèle et distribué des informations servant à la commande ;
- ✓ Des facultés simples d'apprentissage et d'adaptation ;
- ✓ L'absence presque totale de restrictions sur les non-linéaires du processus ;
- ✓ La possibilité de débiter la conduite avec un minimum d'information a priori sur le processus ;
- ✓ La rapidité du traitement grâce à une mise en œuvre parallèle possible ;
- ✓ La robustesse par rapport un bruit et défaillance internes.

### 1.4 Domaine d'application :

- ✓ Traitement d'images : reconnaissance de caractère, signatures et de forme, compression d'image, cryptage ;
- ✓ Traitement du signal : filtrage, classification, identification de sources, traitement de la parole ;
- ✓ Contrôle : commande de processus, diagnostic de pannes, contrôle qualité, robotique ;

✓ Optimisation : planification allocation de ressources, tournée de véhicule ;

### 1.5 L'aspect biologique du neurone :

**Le cerveau** : se compose d'environ  $10^{12}$  neurones et jusqu'à 10000 connexion par neurones ;

**Le neurone** : c'est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau.

#### 1.5.1 Neurone biologique :

**Le corps cellulaire** : qui se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites ;

**Les dendrites** : qui vont servir de capteurs, permettant au neurone d'acquérir des informations ;

**L'axone** : qui permet de transmettre les signaux émis par le corps cellulaire aux autres neurones ;

**Les synapses** : qui permettent aux neurones de communiquer avec les autres via les axones et les dendrites.

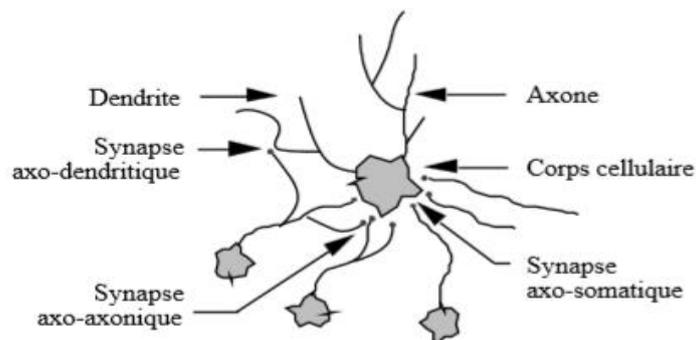


Figure 15: Neurone biologique

#### 1.5.2 Les Neurones artificielle :

✓ Chaque neurone artificiel est un processus élémentaire, reçoit un nombre variable d'entrées en provenance des neurones en amont ;

✓ Chacune de ces entrées est associée à un poids ( $w$ ) représentatif de la force de la connexion ;

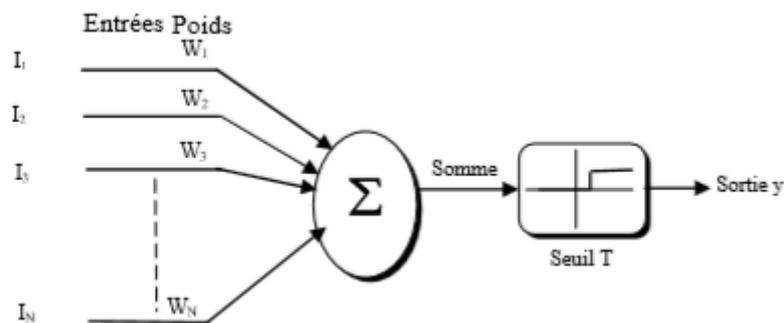
✓ Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval.

**a) neurones artificiels :**

- ✓ La reproduction des mécanismes liés au fonctionnement inspiré du neurone naturel, ils sont composés par un nombre infini de neurones formel ;
- ✓ La simulation du comportement d'un neurone en calculant ses valeurs de sortie en fonction de ses valeurs d'entrée ;
- ✓ Les entrées et les sorties étant bien entendu liées à d'autres neurones ou aux capteurs et effecteurs de l'entité considérée.

**b) Le neurone formel :**

- ✓ Le neurone formel est une abstraction mathématique du neurone biologique, qui est le maillon élémentaire de la transmission du signal au sein du réseau.



**Figure 16:**Le neurone formel

**1.6 Le perceptron :**

Le perceptron comporte une couche d'entrée constituée de  $n$  neurones élémentaires où la fonction d'activation est linéaire et une couche de sortie constituée d'un ou de plusieurs neurones.

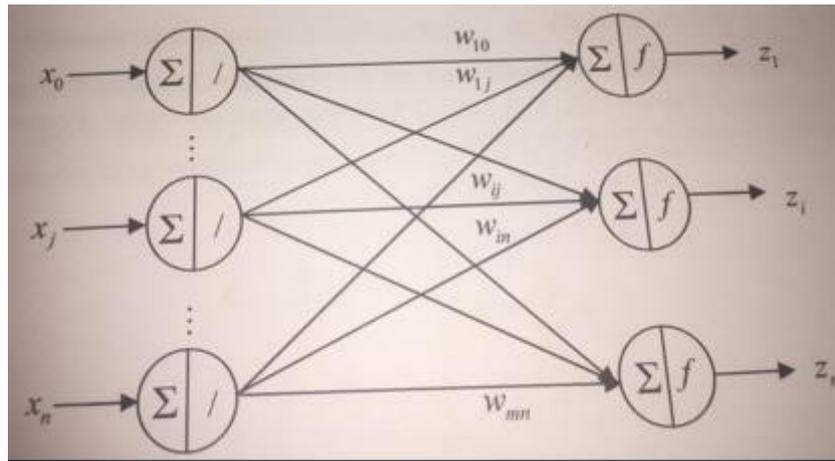


Figure 17:Le perceptron

**1.7 Structure d'interconnexion d'un réseau de neurone :**

**a) Réseau multicouche :**

- ✓ Ce réseau a au moins trois couches : une couche d'entrée, une ou plusieurs couche (s) cachée (s) et une couche de la sortie.
- ✓ Il n'y a pas de connexion entre neurone d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales.
- ✓ L'information circule de l'entrée vers la sortie à travers les couches cachées

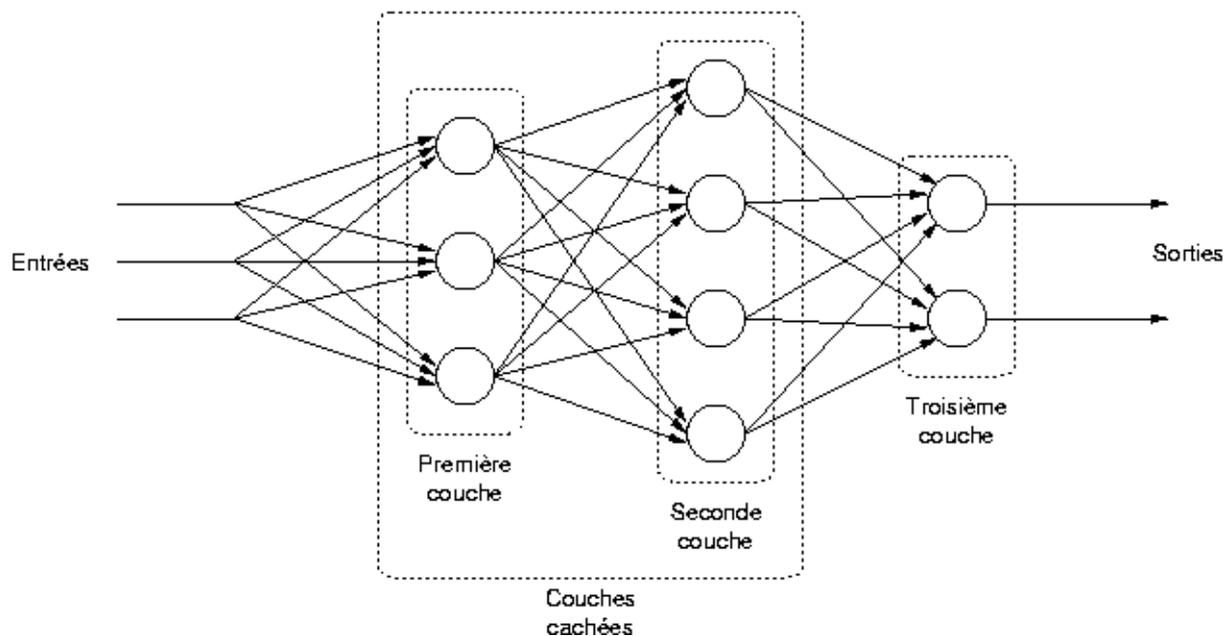


Figure 18:Réseau de neurone à trois couches.

**b) Réseau à connexions locales :**

- ✓ Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui a l'image de la rétine ;

- ✓ Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche en aval.

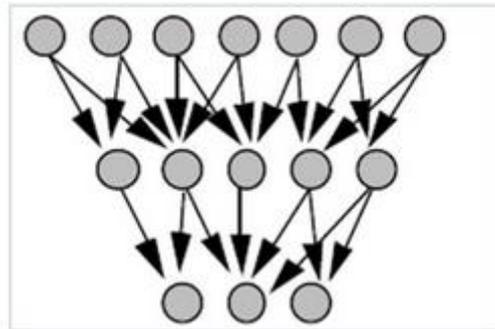


Figure 19: Réseau de neurone à connexion locale

c) **Réseau à connexion récurrentes :**

- ✓ Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche ;
- ✓ On a deux types : **totalemment bouclé et partiellement bouclé**, parmi ces derniers les réseaux boucles extérieurement sont souvent utilisés pour décrire les systèmes dynamiques, continus ou discrets.

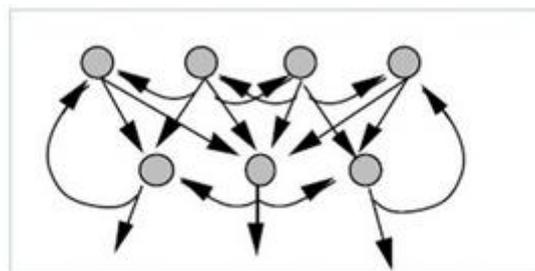
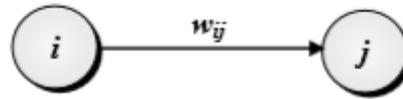


Figure 20: Réseau de neurone à connexion récurrentes

### 1.8 Différents type d'apprentissage dans les réseaux de neurones :

Les connaissances dans un réseau sont codées dans les poids des connexions entre les neurones. Le principe d'apprentissage repose sur la modification de ces poids.

Considérons une connexion entre deux neurones  $i$  et  $j$ , les changements s'opèrent sur le poids de cette connexion et de manière incrémentale, ou dichotomique.



**Figure 21:** Le scalaire  $w_{ij}$  représente le poids associé à la connexion entre les neurones  $i$  et  $j$ .

### 1.8.1 Apprentissage supervisé :

- ✓ On détermine les variables de sortie ;
- ✓ On fait apprendre au réseau par itération successives à modifier ces paramètres internes de façon à reconnaître ces variables.

### 1.8.2 Apprentissage non supervisé :

- ✓ Pour ce type on ne détermine pas des variables de sortie, le réseau va de lui-même catégoriser les variables d'entrée.

#### ❖ Types de règles d'apprentissage :

**a) Correction d'erreur :** Si  $d$  est la sortie désirée et  $y$  la sortie obtenue, la modification des poids se fait en fonction de  $(d-y)$

#### • Algorithme de retro-propagation

Algorithme d'apprentissage du perceptron:

- Initialisation des poids et du seuil à de petites valeurs aléatoires
- Présenter un vecteur d'entrées  $x^{(p)}$  et calculer sa sortie
- Mettre à jour les poids:  $w_j(t+1) = w_j(t) + \eta (d - y) x_j$  avec  $d$  la sortie désirée,  $w$  vecteur des poids

#### b) Apprentissage de Boltzmann :

Une machine de Boltzmann est composée d'une couche de neurones qui reçoit l'entrée, ainsi que d'une couche de neurones cachée. Si on suppose que les neurones d'une même couche sont indépendants entre eux, on appelle cette configuration une machine de Boltzmann restreinte (RBM).

#### c) Règle de Hebb :

Si deux neurones basés interconnectés sont simultanément activés, alors le poids de la connexion qui les relie doit être renforcé  $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mu z_i(t) z_j(t)$

**1.8.3 Apprentissage par compétition :** Son objectif est de permettre la réalisation de la classification automatique

**1.9 Réseau de neurone et algorithme évolutionniste :**

Le réseau de neurone sert à trouver une solution à un problème donné dans un temps minimum. On a deux critiques pour l'obtention d'un tel réseau qui sont l'optimisation et l'apprentissage.

**a) L'optimisation :**

Consiste à réduire les caractéristiques optimales d'un réseau de neurone pour la résolution d'une tâche précise, par la suite des contraintes sont imposées à la conception, telles que la taille du réseau, sa topologie ainsi que la précision des poids de ses liaisons.

**b) L'apprentissage :**

On a déjà parlé qu'il porte le plus souvent sur les valeurs des poids du réseau ou sa topologie ou bien les deux.

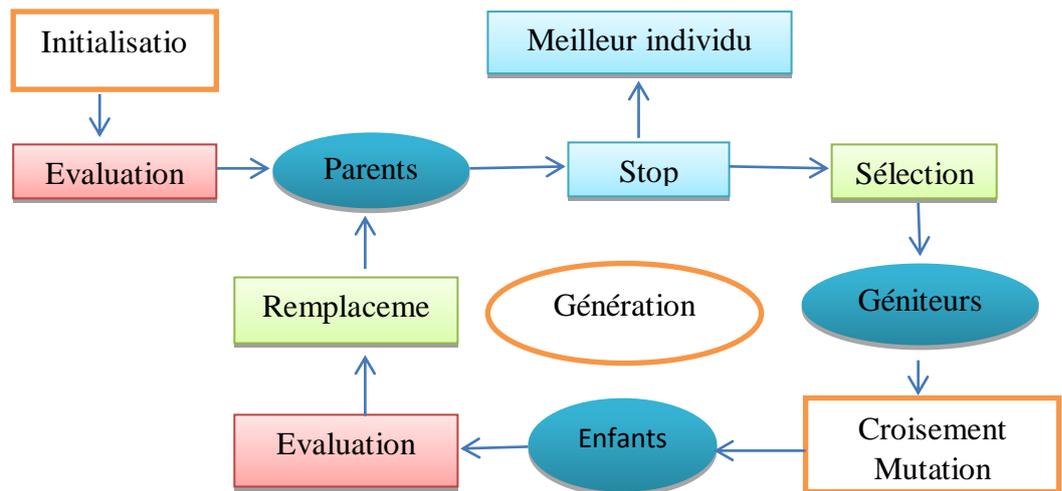
Il existe deux classes d'apprentissage, les méthodes déterministes et les méthodes évolutionnistes.

**a.1) Les méthodes déterministes :**

Basées sur le calcul de la dérivée de critère d'évaluation par rapport à ses paramètres, ces méthodes sont à la merci d'éventuels optima locaux.

**a.2) les méthodes évolutionnistes :**

- ✓ Ne nécessitent aucune précondition sur le réseau ;
- ✓ Définit par une représentation adéquate ;
- ✓ Si on propose un nombre suffisant d'itérations, on atteint avec une probabilité élevée un optimum global indépendamment de la population initiale ;
- ✓ On retiendra que les opérateurs génétiques mutation et recombinaison agissent sur la représentation chromosomique d'un individu et l'évaluation affectés sur leur décodage ;
- ✓ La fonction qui doit attribuer un fitness à chaque réseau de neurones dépend directement et uniquement du problème posé.



**Schéma 1** : Boucle d'évolution d'une population au sien d'un réseau de neurones

### 1.10 Types de réseau de neurone :

L'utilisation des algorithmes évolutionnistes pour la génération des réseaux de neurones les rend très flexibles. La topologie est choisie pour les réseaux en évolution avant le début de l'expérience dans l'évolution des poids de la connexion d'une topologie fixe. Cette dernière est une seule couche cachée de neurones, avec chaque neurone caché connecté à chaque entrée du réseau et chaque sortie réseau. Au contraire des nouvelles techniques, elle offre aux réseaux de neurones la possibilité d'évolution des solutions plus complexes au fil des générations.

Parmi les premières techniques de neuro-évolution qui a évolué la topologie d'un réseau de neurone était la technique Cellular encoding (CE) (Gruau, 1996).

#### 1.10.1 Le réseau NEAT (Neuro-évolution of augmenting topologies) :

Ce sont des algorithmes évolutionnaires puissants capables de trouver des solutions à des problèmes complexes, ils procèdent par coévolution coopérative des neurones dans un réseau, cette façon crée des réseaux beaucoup plus petits.

Les réseaux de neurones NEAT commencent leur recherche avec de petits réseaux pendant que les autres réseaux auparavant commencent à partir des réseaux semblables et élémentaires.

#### Domaine d'application :

- ✓ Le problème de balancement de pole ;
- ✓ Les systèmes de contrôle et d'avertissement des véhicules ;
- ✓ La course automobile ;
- ✓ Le contrôle en robotique ;

✓ Les jeux.

### 1.10.2 Les réseaux NEAT dans le contrôle de créature artificielle :

- **(TIBERMACINE, 2015)** A conçu, deux approches évolutives une auto-conception d'un contrôleur. Parmi eux celle qui fournit deux caractéristiques principales se rattachent au NEAT
  - ✓ la topologie du contrôleur neuronal se développe progressivement en taille pour générer des comportements de plus en plus complexes,
  - ✓ le processus d'évolution ne nécessite que les propriétés physiques du modèle de la créature et une fonction de fitness simple.
- **(Kohl, 2006)** Fais évoluer les réseaux de neurone avec NEAT, pour faire l'alerte des accidents automobiles qui peuvent surgir dans le monde réel
  - ✓ former des réseaux d'alerte dans une simulation complexe et dynamique.
  - ✓ Différentes modalités de détection ont été évoluées, en utilisant uniquement des données de pixel brut à partir de caméra simulée. Cette approche a également été mise en œuvre sur un robot réel.
- **(Kohl, 2009)** Cette thèse évalue un algorithme de neuro-évolution, populaire NEAT, empiriquement sur un ensemble de problèmes tels ceux impliquant la prise de décisions stratégiques. Les résultats montrent que NEAT ne donne pas de bon résultat et la raison est que l'algorithme ne génère pas les régions de décisions locales. Pour arriver à des résultats concluants, deux algorithmes sont proposés :
  - ✓ RBF-NEAT sollicite la recherche structurelle
  - ✓ Cascade-NEAT limite en construisant une topologie en cascade.
  - ✓ Par la suite un méta-algorithme est développé pour combiner les forces de NEAT, RBF-NEAT, Cascade-NEAT.

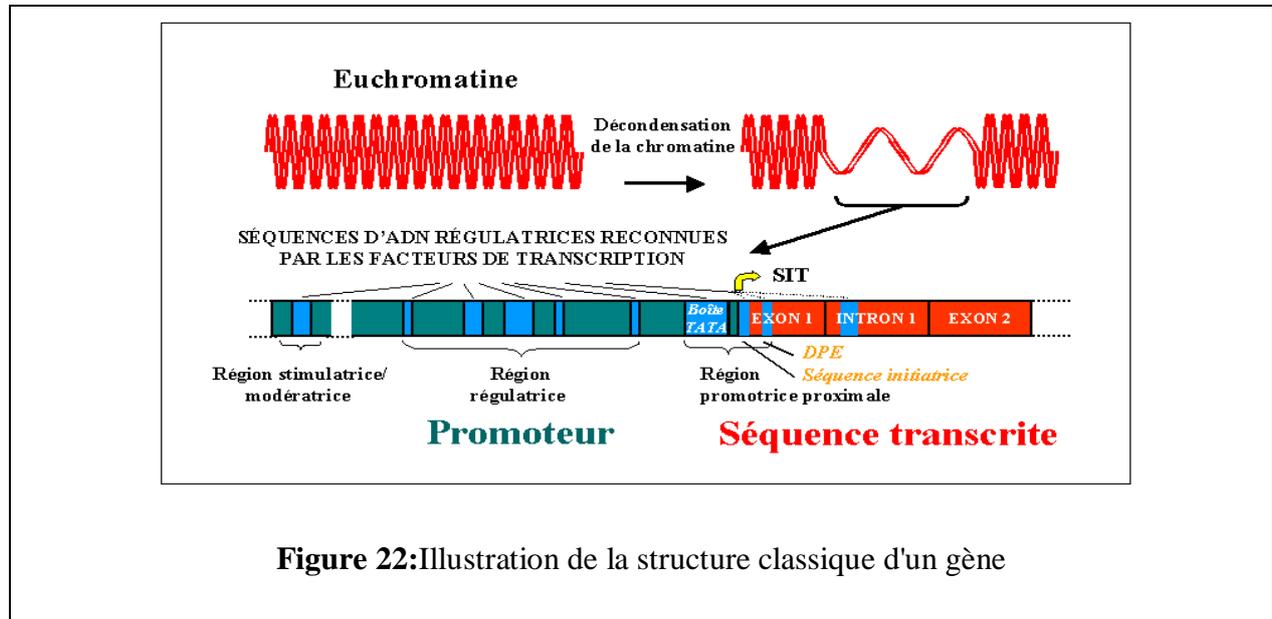
Une évaluation dans un ensemble de problèmes de référence montre qu'il est possible d'avoir de bonnes performances, une comparaison empirique finale de ces méthodes a révélé qu'elles peuvent évoluer jusqu'à des tâches du monde réel comme keepaway and half-field-soccer.

### 1.10.3 Les réseaux artificiels de régulation de gènes (GRN Gene Régulation Network)

Chez les êtres vivants, les cellules d'un même organisme ont différentes fonctions, celles-ci étant décrites dans le génome de l'organisme et contrôlées par un réseau de régulation (GRN) (Davidson Éric H., 2006)

On utilise pour les cellules des signaux de l'environnement extérieur grâce à des récepteurs protéiques.

A partir de l'ADN, un GRN détermine le comportement interne de la cellule en régulant l'expression des gènes dans sa structure par l'action de transcription.



### Domaine d'application :

- ✓ Simuler les réseaux de régulation génétique réels ;
- ✓ Contrôler les agents, les essaims réels et les robots modulaires.

## 2 LES ALGORITHMES GENETIQUES

### 2.1 Introduction :

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation, basées principalement sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection

Ont été définis par John Holland 1975 [hol1975], à cette époque la puissance de calcul des ordinateurs n'était pas suffisante pour l'utilisation des algorithmes génétique sur des problèmes réels de grande taille, alors que leur développement s'est accéléré à partir de 1989 grâce aux travaux de synthèse menés par David Goldberg [Gol1989].

**2.2 Philosophie des algorithmes génétiques :**

On a deux objectifs contradictoires :

- ✓ L'exploitation des meilleures solutions disponibles à un moment donné ;
- ✓ L'exploration robuste de l'espace des solutions possibles ;

Alors que l'algorithme est une classe de stratégie de recherche réalisant un compromis équilibré et raisonnable entre l'exploration et l'exploitation.

**2.3 Fonctionnement des algorithmes génétiques :** Les algorithmes génériques ont pour objectifs contradictoires :

- ✓ De fournir des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique ;
- ✓ De Permettre d'étudier des propriétés quasiment impossibles à étudier dans leur milieu naturel.

**2.4 Caractéristique des algorithmes génétiques :**

- ✓ Efficacité dans le traitement des problèmes d'optimisation ;
- ✓ Algorithmes robustes ;
- ✓ Valides pour l'optimisation numérique ;
- ✓ Faciles à mettre en œuvre ;
- ✓ Naturellement parallèles.

Les algorithmes évolutionnaires peuvent être qualifiés de synthétiques par rapport aux méthodes habituelles analytiques.

**2.5 Domaine d'application :** Les domaines d'application des algorithmes génétiques sont relativement variés, ils concernent notamment les disciplines suivantes

- ✓ Optimisation : optimisation de fonctions, planification.
- ✓ Apprentissage : classification, prédiction, robotique.
- ✓ Programmation automatique : programmes LISP, automates cellulaires.
- ✓ Étude du vivant, du monde réel : marchés économiques, comportements sociaux, systèmes immunitaires.

**2.6 Les différences des algorithmes génétiques par rapport aux autres paradigmes :**

- ✓ La représentation des caractéristiques d'une solution par un ensemble de gènes avec un codage qu'on la concatène on obtient une chaîne de caractères qui est spécifique à une solution bien particulière.

- ✓ Le traitement d'une population de solution en parallèle.
- ✓ L'évaluation de l'optimalité du système n'est pas dépendante vis-à-vis du domaine.
- ✓ L'utilisation des règles probabilistes

Un algorithme génétique générique à la forme suivante :

- 1) Initialiser la population initiale P.
  - 2) Évaluer P.
  - 3) Tant Que (Pas Convergence) faire :
    - a) P' = Sélection des Parents dans P
    - b) P' = Appliquer Opérateur de Croisement sur P'
    - c) P' = Appliquer Opérateur de Mutation sur P'
    - d) P = Remplacer les Anciens de P par leurs Descendants de P'
    - e) Évaluer P
- Fin Tant Que

Le critère de convergence peut être de nature diverse, par exemple :

- ✓ Un taux minimum qu'on désire atteindre d'adaptation de la population au problème,
- ✓ Un certain temps de calcul à ne pas dépasser

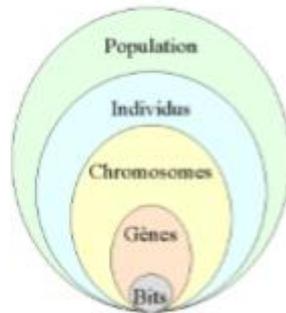
### **2.7 La description d'un algorithme génétique :**

Son but est l'optimisation d'une fonction définie par l'utilisateur, qui s'appelle fonction d'adéquation ou fitness.

**2.7.1 Génome des individus :** Un algorithme fait son travail en parallèle sur une population qui est un ensemble d'individus ou chromosome.

**Un chromosome :** est une suite de gène, chaque gène sera repérable par sa position

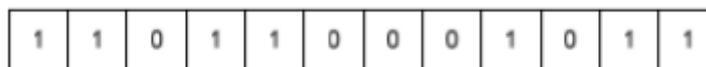
**Un individu :** est représenté par un ensemble de chromosome



**Figure 23:** Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.

**Le génome :** des individus d'un algorithme génétique est constitué par un chromosome unique de longueur fixe et composé de gène issus de l'alphabet binaire  $\{0,1\}$ .

Holland a choisi comme représentation « chaîne de bits » qui font référence au chromosome d'un individu, c'est la plus applicable à un grand nombre de problème



**Figure 24:** Un chromosome selon Holland.

#### **Le rôle de la chaîne de bits :**

- ✓ Former le code génétique des individus ce qui implique la nécessité d'une fonction de traduction du génome Simple dans le cas des entiers et des réels
- ✓ Afin qu'un algorithme génétique converge, le génome des doit permettre une représentation en plus toutes les solutions à l'aide des chromosomes des individus doivent correspondre à des solutions réalisable (principe de validité).

Finalement, Goldberg [Gol1989] donne deux principes de base pour la représentation des solutions les quelles

- **Bloc de construction :**

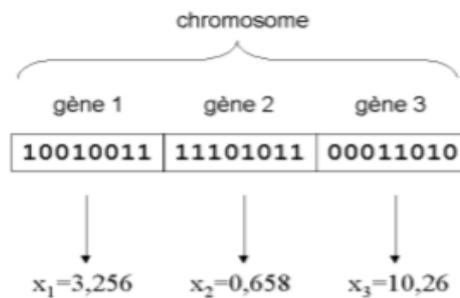
Est un groupe de gène qui ont co-évolué de façon à ce que son introduction dans un chromosome entraîne probablement une augmentation de la fitness d'un individu, la construction des blocs à comme une hypothèse c'est qui un algorithme réalise la formation

d'un grand nombre possible de blocs différents puis les recombine afin d'obtenir la fonction de fitness maximal.

- **L'idée de l'alphabet** : On l'utilise pour la construction des chromosomes qui doit être le plus petit permettant une expression naturelle du problème posé.

**2.7.2 Le codage** : On a trois principaux types de codage utilisables :

- Le codage binaire : C'est le plus utilisé, Chaque gène dispose du même alphabet binaire  $\{0,1\}$ .
- Le codage réel : Cela peut être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.



**Figure 25:** illustration schématique du codage des variables réelles

- **le codage de Gray** : Est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément  $n$  et un élément  $n + 1$ , donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère.

**2.7.3 Sélection** :

- ✓ Copier les individus de la population  $p$  dans une population  $p'$
- ✓ Les individus de  $P$  qui vont être dupliqués sont les plus adaptés et les plus faibles ne pas être copiés
- ✓ Quand la population  $p'$  est constituée les parents vont servir.

On trouve quatre types de méthodes de sélection différentes :

- ✓ La méthode de la "loterie biaisée" (roulette Wheel) de Goldberg,
- ✓ La méthode "élitiste",
- ✓ La sélection par tournois,
- ✓ La sélection universelle stochastique.

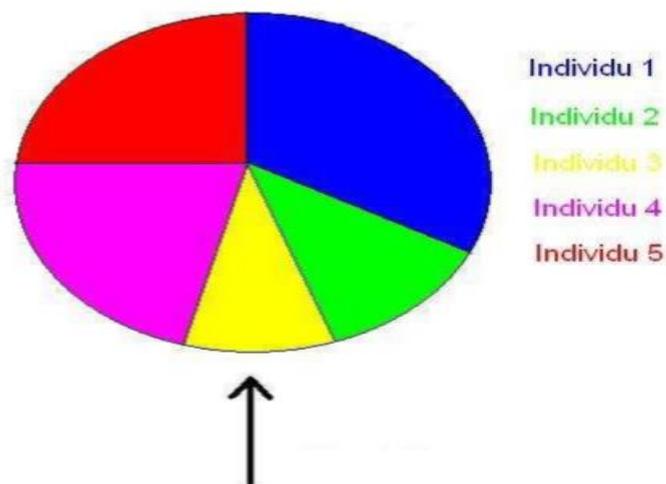
**2.7.3.1 La loterie biaisée ou roulette Wheel :** Cette méthode est la plus connue et la plus utilisée.

- ✓ Les individus qui ont de la chance d'être sélectionné, sont les plus adaptés au problème.
- ✓ On tourne la roue et quand elle cesse de tourner on sélectionne l'individu correspondant au Secteur désigné par une sorte de "curseur" qui pointe sur un secteur particulier de celle-ci après qu'elle se soit arrêtée de tourner.

$$P_{sel} = \frac{f(i)}{\sum_{i=1}^n f(i)}$$

Avec  $f(i)$  la fitness de l'individu  $i$ ,

$n$  le nombre d'individus de la population



**Figure 26:** la méthode de sélection de la loterie biaisée

#### **Inconvénients de méthode de la loterie :**

- ✓ Soient des individus ayant une mauvaise fitness et on sait qu'aucun individu voire aucun individu a forte fitness ne fasse partie des parents de la nouvelle génération.
- ✓ La convergence prématurée, lorsque l'évolution se met donc à stagner et on atteindra alors jamais l'optimum, on restera bloqué sur un optimum local quand un individu présente une fitness très élevée.

Pour régler ce problème, on peut utiliser la technique de "scaling", qui consiste à effectuer un changement d'échelle de manière à augmenter ou diminuer de manière forcée la fitness d'un individu par rapport à un autre selon leur écart de fitness

Malgré tout, il est conseillé d'opter pour une autre méthode de sélection.

### 2.7.3.2 La méthode élitiste :

Dans cette méthode, on sélectionne les  $n$  individus dont on a besoin pour la nouvelle génération  $P'$  en prenant les  $n$  meilleurs individus de la population  $P$  après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.

Elle présente le même inconvénient que la méthode de la loterie. La convergence prématurée suggère qu'il faille aussi opter pour une autre méthode de sélection.

### 2.7.3.3 La sélection par tournois :

Avec cette méthode on obtient les résultats les plus satisfaisants.

- ✓ On effectue un tirage avec remise de deux individus de  $P$ , et on le met en concurrence. Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité  $p$  comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus  $n$  fois de manière à obtenir les  $n$  individus de  $P'$  qui serviront de parents.
- ✓ La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de  $p$  permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection.

### 2.7.4 Croisement :

- **Définitions :**

Le croisement est la transposition informatique du mécanisme qui permet la production de chromosomes qui héritent partiellement des caractéristiques des parents.

- **Son rôle :**

Permet de faire la recombinaison des informations présentes dans le patrimoine génétique de la population.

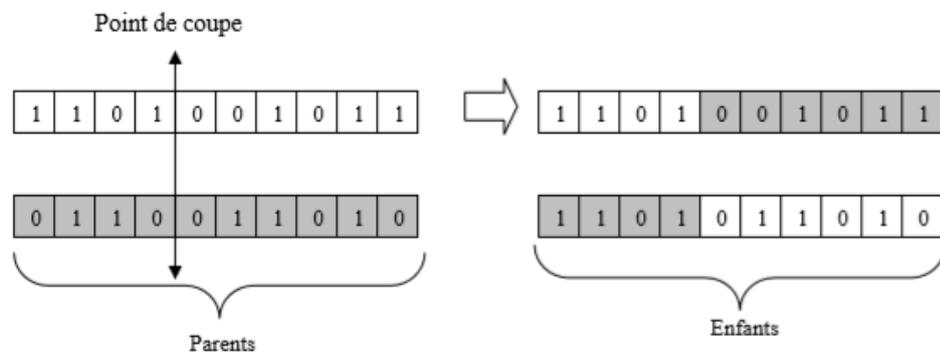
- **Son but :**

- ✓ Assurer le brassage des caractères génétiques des individus ;
- ✓ Recombine des gènes des parents pour produire des individus potentiellement mieux adaptés au problème à résoudre.

Parmi les opérateurs de croisement les plus utilisés, on peut citer le croisement à un point de coupe, le croisement à deux points de coupe et le croisement uniforme. On n'a pas de priorité pour le choix du croisement à 1-point et celui à 2-point de coupe puisqu'il dépend de la nature du problème, de la structure du chromosome et de l'évolution souhaitée de l'algorithme génétique.

- **Croisement à un point de coupe :**

Son principe est de couper en un point choisi aléatoirement les chromosomes des individus parents, puis d'échanger les parties après ce point de coupe afin de former les enfants [San, 2004].



**Figure 27:** Croisement avec un point de coupe.

- **Croisement à deux points de coupe :**

DeJong [DeJ, 1975] dans l'étude sur l'efficacité des croisements avec points de coupe multiples a conclu que si deux points de coupe améliorent la convergence, un nombre plus élevé réduit les performances de l'algorithme.

Mais on a un problème dans l'utilisation de nombreux points de coupe qui consiste dans la perturbation de la formation de séries de bits pertinentes à l'intérieur du chromosome ("building blocks").

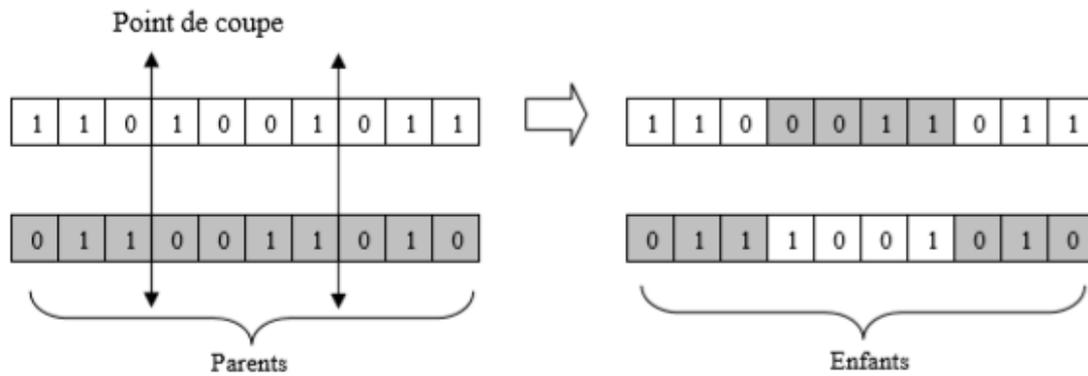


Figure 28: Croisement avec deux points de coupe.

• **Croisement uniforme :**

- ✓ On l'utilise dans les problèmes modélisés par un codage binaire, celui-ci étant radicalement différent des croisements à un ou plusieurs points de coupe.
- On définit de manière aléatoire un "masque".
- On forme Le premier enfant en copiant les gènes du premier parent dans le cas d'un bit de masque correspondant égal à 1 et ceux du second dans le cas contraire ;
- On obtient Le second enfant en inversant les parents.
- ✓ Habituellement, un masque de croisement est généré pour chaque paire de parents.

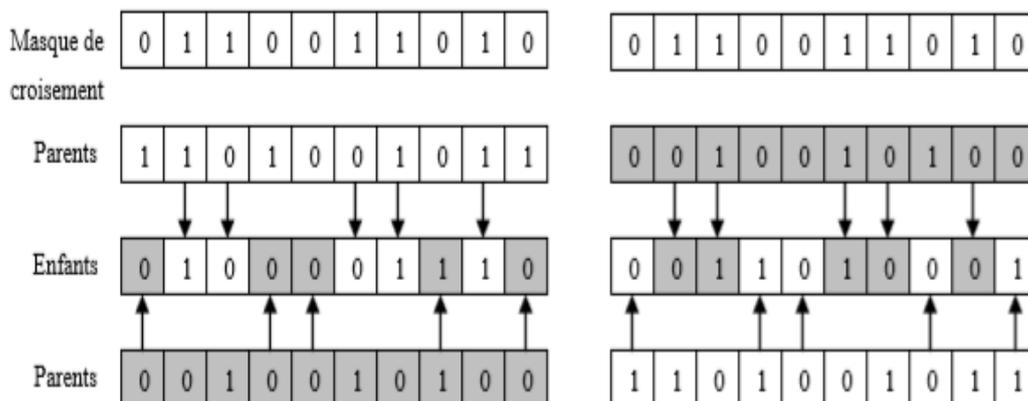


Figure 29: croisement uniforme

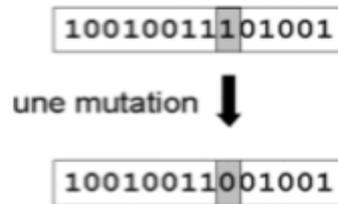
**2.7.5 Mutation :**

**Son rôle :**

- ✓ Maintenir la diversité génétique au sein d'une population d'individus. Cet opérateur va perturber aléatoirement le code génétique d'un individu.

- ✓ Limiter la dérive génétique induite par un opérateur de sélection trop élitiste.

La mutation consiste à l'inversion d'un bit dont le rôle est de modifier de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution.



**Figure 30:**une mutation

- **Les avantages de cette opération :**

- ✓ Garantir la diversité de la population ;
- ✓ Éviter la dérive génétique, quand certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment des autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes. Le fait que l'opérateur de mutation puisse entraîner de manière aléatoire des changements au niveau de n'importe quel locus permet d'éviter l'installation de cette situation défavorable ;
- ✓ Permettre de limiter les risques d'une convergence prématurée causée par une méthode de sélection élitiste ;
- ✓ Atteindre la propriété d'ergodicité qui est une propriété garantissant que chaque point de l'espace de recherche puisse être atteint.

### 2.7.6 Remplacement :

- ✓ Cette méthode est la plus simple, elle favorise la dérive génétique qui se manifeste d'autant plus que la population est de petite taille.
- ✓ On n'atteint pas la meilleure solution mais on s'en approche seulement puisqu'un enfant ayant une faible performance remplace forcément un parent.

- **Son fonctionnement :**

- ✓ Réintroduire les descendants obtenus par application successive de sélection, de croisement et de mutation de la population P' dans la population P.
- ✓ Permet de remplacer une certaine proportion pouvant bien être choisie.

Il existe deux méthodes de remplacement différentes :

**A) Le remplacement stationnaire :**

- ✓ Les enfants remplacent automatiquement les parents sans tenir compte de leurs performances respectives, et le nombre d'individus de la population ne varie pas tout au long du cycle d'évolution simulé Ceci implique donc d'initialiser la population initiale avec un nombre suffisant d'individus. Cette méthode peut être mise en œuvre de deux façons différentes :

**A-1) Première variante :**

Remplacer la totalité de la population P par la population P', qui est connue sous le nom de remplacement générationnel et on a donc une génération gap qui vaut 1.

**A-2) Deuxième variante :**

Choisir une certaine proportion d'individus de P' qui remplaceront leurs parents dans P.

**B) Le remplacement élitiste :**

- ✓ On garde au moins l'individu possédant les meilleures performances d'une génération à la suivante.
- ✓ Les enfants d'une génération ne remplaceront pas nécessairement leurs parents.

**Avantage :**

- ✓ Améliore les performances des algorithmes évolutionnaire dans certains cas.

**Inconvénient :**

- ✓ Augmente le taux de convergence prématuré.

**2.8 Critère d'arrêt :**

- ✓ Lorsque la solution définie par le génome d'un individu est la solution optimale connue du problème posé.
- ✓ Une telle solution n'est pas connue dans la plupart des problèmes pour lesquels cette méthode d'optimisation est utilisée.
- ✓ Si l'algorithme a effectivement trouvé la solution optimale, plusieurs techniques sont couramment utilisées.

**Dans la première**, on arrête l'algorithme au bout d'un certain nombre de générations.

**Pour la seconde**, on considère qu'on a obtenu une solution optimale lorsque le meilleur individu n'a pas été amélioré depuis un certain nombre de générations, ce qui signifie que l'algorithme converge.

**Dans la troisième**, on arrête l'algorithme lorsque la diversité génétique au sein de la population n'est plus suffisante pour explorer plus profondément l'espace de recherche des solutions [San, 2004].

## 2.9 Les paramètres d'un algorithme génétique :

### a) La taille de la population :

On considère que les conditions de convergence changent avec la taille de la population

### b) Le taux de croisement.

L'opérateur de croisement est appliqué avec une probabilité  $P_c$  qui est varié entre 0.25 et 0.70.

### c) Le taux de mutation :

L'opérateur de mutation est appliqué avec une probabilité  $P_m$ .

### d) Taux de remplacement :

Dans [Sys, 1989] K. DE JONG a introduit la notion d'écart entre les générations, un nombre compris entre 0 et 1 pour qu'on ne remplace pas l'ensemble de la population à Chaque génération

## Conclusion :

Dans ce chapitre Nous avons présenté les réseaux de neurones et algorithmes génétique suivant leur fonctionnement et les domaines d'application et ainsi ses rôles. Leurs but c'est trouver la meilleure solution après plusieurs génération qui possède à la fois la robustesse, la simplicité et l'efficacité et à la fin on a mis l'accent sur tout ce qui est évolution et système évolutionnaire, système de contrôle.

## **Chapitre 3**

### **Le model proposé**

## 1 Introduction

La vie artificielle est en étroite relation avec les Environnements virtuels peuplés de créatures artificielles, pour lesquelles il est possible de générer des morphologies en fonction de leurs objectifs. Grâce aux techniques d'évolution, des créatures sont capables d'exercer des tâches vitales tel que (marcher, nager, se nourrir, survivre ...) et d'agir en utilisant des comportements adaptés à leurs environnements.

Dans ce chapitre, notre objectif consiste à générer automatique un système de contrôle d'une créature artificielle en expliquant en détail la solution que nous proposons pour prendre en charge le problème de locomotion d'un humanoïde. Ainsi, nous allons décrire les différentes techniques de représentation de la morphologie de la créature simulée ainsi que le type de contrôleur choisi qui est le réseau de neurone NEAT, qui va permettre le contrôle de la créature en faisant évoluer ses capacités à se déplacer dans l'environnement simulé

## 2 Environnement virtuel et Moteur physique :

Les environnements virtuels jouent un rôle très important dans l'évolution de créatures artificielles. Ces environnements sont tridimensionnels et doivent modéliser avec précision les lois de la physique qui existent dans la nature. Ceci afin de s'assurer que les créatures existantes dans l'environnement virtuel sont incapables de générer des mouvements ou des forces qui sont impossibles à reproduire dans le monde réel.

Pour assurer ce réalisme, l'environnement virtuel utilise un moteur physique sophistiqué qui lui permet de reproduire minutieusement la dynamique des corps rigides, des jointures, des collisions, de la friction, de l'inertie et de la gravité en simulant la physique du monde naturel. De nombreux moteurs physiques ont été proposés, parmi lesquels nous pouvons citer ODE (Smith, 2005) et bien d'autres sont à l'usage publique libre.

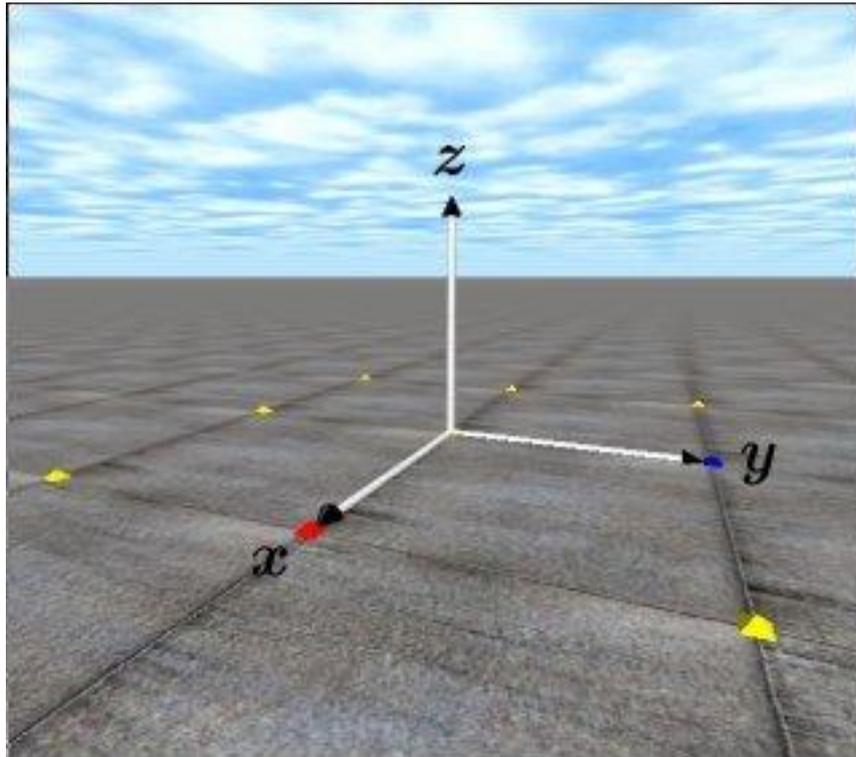
Notre choix s'est porté sur le moteur physique ODE (Open Dynamic Engine) [CITATION Smi05 11036]. Ce dernier étant une librairie open source multi plate-forme C/C++, permettant de simuler la dynamique des corps rigides (détection de collisions, frottements, etc.). Les créatures présentes dans l'environnement sont composées d'une série de corps rigides reliés entre eux par des jointures.

Le moteur physique agit directement sur les corps rigides des créatures; par conséquent, les créatures même sont soumises aux lois de la physique qui régissent l'environnement. Chaque corps rigide peut être contraint par l'utilisation d'une jointure. Cette dernière peut connecter deux ou plusieurs corps rigides. Elle peut être permanente ou temporaire. Lorsqu'un des membres de la créature entre en collision avec la surface de la terre ou un autre objet de l'environnement, une jointure de contact temporaire va être créée.

- La force de gravité du monde virtuel est fixe à environ  $9,8 \text{ m/s}^2$  pour fournir une bonne approximation des forces gravitationnelles du monde réel du niveau de la mer ;
- Le frottement avec le sol est nécessaire pour la locomotion et il est modélisé au sein d'une jointure de contact ;
- Le frottement au sein des jointures de la créature est également modélisé par l'utilisation d'un petit couple négatif dans la jointure elle-même ;
- La résistance du vent sont tellement exiguës, ainsi, nous choisissons de ne pas les simuler afin de réduire la complexité de calcul du système.

**a) Les corps rigides :** Un corps rigide à diverses propriétés du point de vue de la simulation. Certaines propriétés changent avec le temps :

- Le vecteur de position  $(x, y, z)$  du point de référence du corps, généralement le point de référence doit correspondre au centre de la masse du corps ;
- La vitesse linéaire du point de référence est un vecteur  $(v_x, v_y, v_z)$  ;
- L'orientation d'un corps, représentée par un Quaternion  $(q_s, q_x, q_y, q_z)$  ou une Matrice de rotation  $3 \times 3$  ;
- Un vecteur de vitesse angulaire  $(w_x, w_y, w_z)$  qui décrit la manière dont l'orientation change avec le temps.



**Figure 31:**Le monde d'ode (ODE).

D'autres propriétés sont statiques (constantes dans le temps):

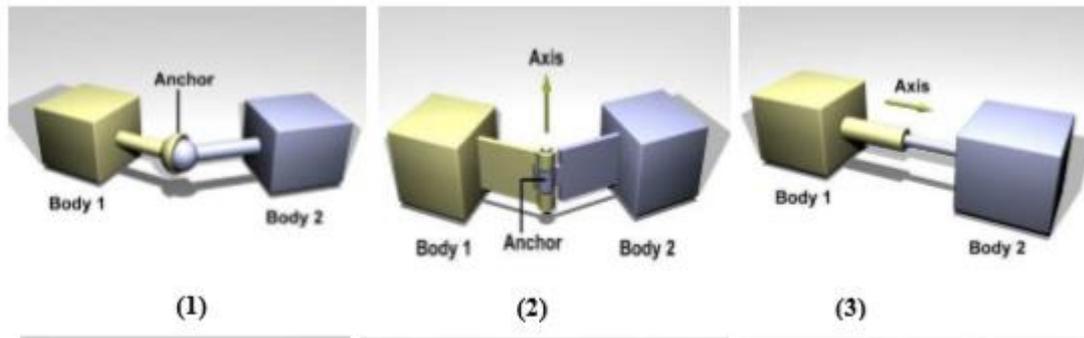
- La masse du corps ;
- La position du centre de masse dans les simulations actuelles le centre de la masse et le point de référence doivent coïncider ;
- La matrice d'inertie est une matrice 3x3 qui décrit la manière dont la masse du corps est répartie autour du centre de masse

b) **Les jointures :**

Une jointure est considérée comme une relation qui est appliquée entre deux corps (primitives) qui peut avoir certaines positions et orientations par rapport aux autres, il existe différents types de jointures.

- Ball and socket (voir la figure 3.2 (1)) ;
- Hinge (voir figure 3.2 (2)) ;
- Fixed ;

- Contact (voir figure 3.2 (3)).



**Figure 32:** Les types de joints [ODE, 2006].

c) **La détection de collision :** ODE possède deux composants principaux:

- ✓ Un moteur de simulation de la dynamique ;
  - ✓ Un moteur de détection de collisions fournit à l'utilisateur des informations sur la forme de chaque corps. A chaque pas de temps, et aussi détermine le corps qui présente une collision potentielle avec les autres et fournit ensuite à l'utilisateur l'information sur le point de contact. L'utilisateur crée alternativement des joints de contact entre les différents composants du corps.
- **Geoms :**
    - ✓ Les objets géométriques sont les éléments fondamentaux dans le système (primitives géométriques, Sphère, Box, Cappedcylinder, Ray, Triangle mesh, Simple space) ;
    - ✓ Le Geom peut être une primitive géométrique ou un groupe de primitives géométriques ;
    - ✓ Un Geom représente un type spécifique de Geom appelé Space qui est également similaire au concept World sauf qu'il est appliqué à la collision et non pas à la dynamique.
  - **World :**
    - ✓ L'objet du monde est un récipient pour les corps rigides et les joints ;
    - ✓ Les objets appartenant à des mondes différents ne peuvent pas agir l'un sur l'autre.

**Par exemple :**

Les corps rigides de deux mondes différents ne peuvent pas se heurter. Tous les objets dans un monde existent au même point dans le temps. Ainsi, une des raisons d'employer les mondes séparés réside dans la simulation des systèmes à différents taux. La plupart des applications nécessiteront l'utilisation d'un et un seul monde.

**• Space :**

- ✓ Un espace (Space) est un Geom ne pouvant être placé et qui peut contenir d'autres Geoms ;
- ✓ Il est semblable au concept de corps rigide du "monde", sauf qu'il s'applique à la collision et Non pas à la dynamique.

**d) Entrée et sortie (Sensorielle, effectrice) :**

Les créatures artificielles utilisent une variété de capteurs qui permettent de :

- ✓ Recueillir les données provenant de leur environnement ;
- ✓ Acquérir les informations nécessaires sur leur état interne et les fournir au système comportemental ;

**Pour chaque jointure :**

- ✓ Il existe un moteur tel un effecteur. Ce dernier applique un couple sur chaque degré de liberté des jointures pour les faire pivoter ou glisser à la vitesse désirée ;
- ✓ La quantité maximale du couple qui peut être générée par les effecteurs est limitée ;
- ✓ Les moteurs sont incapables d'appliquer plus d'une valeur maximale donnée sur une jointure ;
- ✓ Les effecteurs de l'agent lui permettent de contrôler la vitesse angulaire (ou linéaire) relative de deux corps reliés par une jointure, dans le but de produire un mouvement ;
- ✓ Le système de contrôle utilise les entrées sensorielles fournies par les capteurs pour calculer les sorties. Ces derniers sont connectés directement aux entrées des effecteurs ;

- ✓ L'effecteur prend la valeur d'entrée et le convertit en vitesse désirée pour faire émerger un mouvement de locomotion dans l'environnement.

### **3 Le contrôleur d'un humanoïde :**

- ✓ Le contrôleur d'une créature est lié à sa morphologie et à ses capteurs qui lui permettent de percevoir le monde ;
- ✓ Si on veut que le contrôleur émerge d'un assemblage d'éléments et non de la conception d'une intelligence et d'une expérience humaine, on peut s'inspirer des mécanismes de la nature ;
- ✓ On applique cette approche aux réseaux de neurones. En effet, l'assemblage de neurones permet de constituer une topologie dont un comportement pourra émerger ;
- ✓ Les réseaux de neurones sont largement répondus dans l'ensemble des travaux traitant le contrôle des créatures artificielles ;

### **4 Architecture globale du système :**

- ✓ Nous avons utilisé des techniques permettant aux mouvements résultants d'avoir un haut niveau de réalisme pour avoir une simulation des mouvements d'une créature 3D sur un environnement physique réaliste. Ainsi, seule la simulation physique permet de reproduire une interaction complète avec l'environnement ;
- ✓ Le but de cette simulation est de s'inspirer de l'évolution pour générer un contrôleur ;
- ✓ Associé à une créature 3D simulée, ce dernier aura pour but de garantir la réalisation du contrôle de la créature ;
- ✓ Les mouvements désirés dépendent de la forme de la créature (sa morphologie) et de son environnement (simple, complexe) ;
- ✓ Dans le domaine des robots autonomes, il existe plusieurs types différents de robots ;
- ✓ Parmi ceux-ci, nous pouvons citer les créatures bipèdes et quadrupèdes, aussi bien que des créatures avec plus de quatre membres locomoteurs. Des créatures bipèdes avec une forme approximativement humaine sont dites également des humanoïdes. [Wah, 2005]

- **Domaine d'application :**

- ✓ Ces systèmes peuvent fonctionner dans certains secteurs dont l'accès et le mouvement sont difficiles, non accessibles aux robots à roues, tels que les escaliers ou les terrains naturels accidentés ;
- ✓ Les créatures bipèdes capables de locomotion ont la capacité d'agir sur l'environnement en utilisant le corps entier qui peut surmonter de grands obstacles existants sur leurs chemins.

- **Création de modèle :**

Le modèle de créature utilisé ici est vu en tant que représentation d'un modèle d'humanoïde générique. Il a été créé à partir de primitives de corps et de joints disponibles sur ODE.

- **Le modèle d'humanoïde se compose de :**

- 12 primitives géométriques de corps rigide ;
- 13 joints: 9 Hinge joint, 2 Ball and socket joint, 2 fixed joint.

- **Les primitives géométriques utilisées sont :**

- Une sphère, 8 parallélépipèdes.

- ✓ La structure du corps rigide de notre humanoïde est simulée, avec l'organisation des liens entre les différentes primitives ;

- ✓ Les types de jointures qui sont utilisées dans notre modèle d'humanoïde sont : hinge joint, ball& socket joint, fixed joint et contact joint.



**Figure 33:**Le modèle de la créature humanoïde simulée par ODE.

partie du corps	Jointures	Primitive géométrique
Tête	Fixed joint	Sphère
Bras	Ball and socket joint	Parallélépipède
Hanche	Hinge joint	Parallélépipède
Genou	Hinge joint	Parallélépipède
Cheville	Hinge joint	Parallélépipède
Pieds	Hinge joint	Parallélépipède

**Tableau 1:** Les paramètres de simulation de la créature humanoïde.

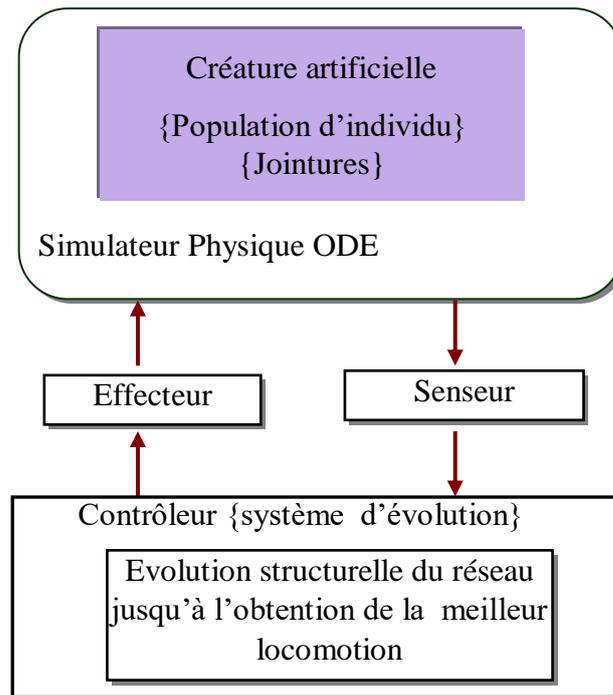
**a) Fonctionnement du système :**

- **Le réseau NEAT :**

Il représente le cerveau de la créature et a pour rôle de reproduire le contrôle générant les forces motrices adéquates au sein des jointures.

- ✓ Le processus consiste à recueillir des informations de l'environnement, à travers les senseurs ;
- ✓ Réaliser un traitement ou un calcul des flux des entrées sensorielles pour générer des valeurs des forces motrices appropriés pour la locomotion ;
- ✓ Les signaux de sortie sont appliqués à la jointure à travers les effecteurs.

Le schéma ci-dessous éclaireit l'échange du flux d'information entre la créature et le contrôleur.



**Schéma 2** : Echange de données sensorielles

- Un système d'évolution classique ou un réseau de neurone est couplé avec un algorithme génétique :
  - ✓ Consiste à élaborer une structure neuronale dans le nombre de nœuds de la couche et de connexion est fixé avant toute autre chose ;
  - ✓ A partir de la structure définie, l'algorithme génétique fait évoluer les poids des connexions suivant les opérateurs de mutation et de croisement et une des méthodes d'apprentissage ;
  - ✓ Il génère des sorties, chacune d'entre elles sera évaluée par une fonction de fitness spécifique au problème traité, valide le résultat (la sortie) ou relance le processus d'évolution à nouveau jusqu'à atteinte du critère d'arrêt ;
  - ✓ Dans le cas de notre contrôleur NEAT, la structure n'est pas fixée et ce n'est qu'à la fin de l'évolution qu'on peut obtenir la topologie exacte du réseau, qui est généré d'une manière automatique ;
  - ✓ Au cours de l'exécution, la structure croît par l'ajout d'un nœud, une connexion dans un réseau de départ, qui est optimal et simple, alors qu'à chaque changement les réseaux sont réévalués.

Pour en déduire le meilleur, cette évaluation sera en fonction du réseau qui est apte à produire la solution souhaitée.

**a) Génération de la solution :**

- ✓ Pour permettre au robot de se déplacer, on génère la locomotion par les moteurs des jointures qui délivrent les forces motrices nécessaires ;
- ✓ Le contrôleur doit fournir une variation d'angle comprise entre  $[-\pi$  et  $\pi]$ , ses angles sont calculés à partir des entrées tirées de l'environnement et des poids de connexion du réseau généré ;
- ✓ La jointure « ball and socket » est modélisée en utilisant la deuxième loi de newton, pour le mouvement de la jointure on propose les équations de base du couple en fonction de la force, de l'angle et du rayon qui est défini comme suit:

$$\text{Couple: } \tau = F \times r \times \sin \theta$$

Où  $\tau$  est le couple,  $r$  le rayon,  $F$  la force et  $\theta$  est l'angle entre la ligne faite par  $r$  et  $F$ .

- ✓ Les capteurs de contact et de la créature servent à cordonner le réseau NEAT. Ainsi, chaque capteur envoie une valeur initiale de la jointure prélevée au cours de l'exécution, l'achemine vers le cerveau (Réseau NEAT) et la retourne après une série de changements et d'évaluations vers l'effecteur de la jointure pour effectuer le mouvement désiré.

• **La fonction d'activation :**

- ✓ Nous avons choisi comme fonction d'activation la fonction sigmoïdale bipolaire, que nous avons utilisée au niveau des couches cachées et de sortie ;
- ✓  $x$  est la somme pondérée des entrées d'un neurone ;
- ✓ Le paramètre  $\partial$  détermine la pente de la fonction sigmoïde bipolaire qui est fixée à 2.

$$\sigma(x) = \frac{2}{1 + e^{-\partial x}}$$

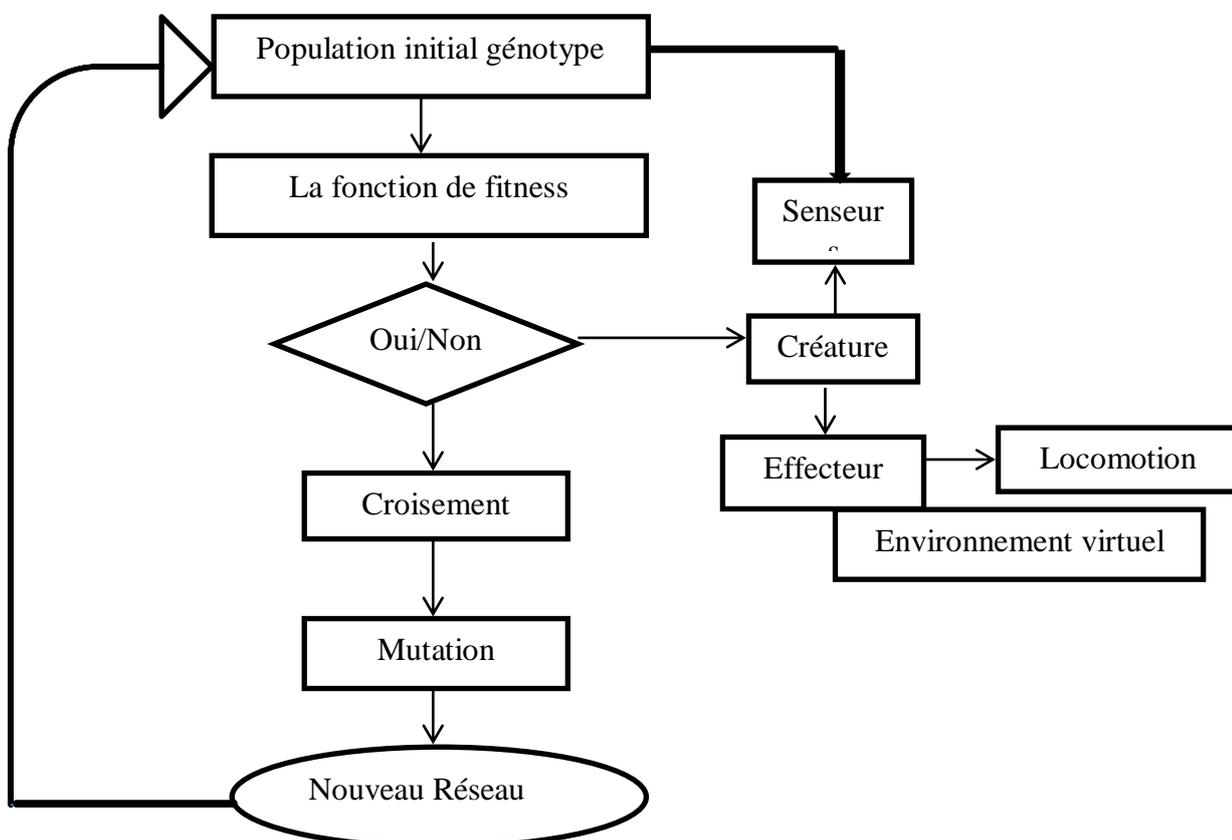
**Figure 34:** Fonction d'activation.

- ✓ Le choix de cette fonction est relié par la gamme désirée des valeurs qui est entre -1 et 1.

- ✓ Les effecteurs prennent les valeurs d'entrée et les convertissent en une vitesse désirée en mesurant linéairement les entrées des effecteurs vers la gamme d'entrées suivantes [-1,1].

Ceci implique que les valeurs flottantes signées [+ , ou -] recueillies par les capteurs peuvent être introduites dans le système de contrôle neuronal.

- ✓ Elle permet au réseau de produire des sorties compatibles avec les effecteurs afin que le réseau NEAT soit capable de traiter efficacement les données sensorielles et générer un bon fonctionnement des effecteurs des créatures virtuelles ;
- ✓ Le processus de génération des sorties effectrices peut être très long et nécessite un traitement par évolution vu l'immensité de l'espace de recherche, et de la plage des paramètres qui coopèrent dans la solution ;



- **Le processus d'évolution :** Nous avons introduit la notion d'évolution pour faire comprendre comment le réseau fait évoluer sa structure et ses paramètres internes pour la génération des résultats.
- ✓ A partir de deux structures distinctes « Nœud, Connexion » un nombre de génomes sont créés de ses génomes ;
- ✓ L'évolution de la structure consiste à fusionner et à modifier chaque composant par deux opérateurs de « Croisement, Mutation » ;
- ✓ Les réseaux sont évalués pour déduire les plus apte a généré une solution ;
- ✓ De ce qui en est du croisement, il ne peut s'effectuer ni entre deux nœuds, ni entre deux connexions, ni étiquettes du même génome, ce qui nous permettra d'assurer l'intégrité des deux sous réseau ;
- ✓ Lors de l'assemblage du nouveau réseau, les connexions locales sont maintenues avec ses opérateurs et seules les nouvelles connexions entre les deux réseaux sont créées ;
- ✓ Dans ce modèle, la mutation peut modifier à la fois, une étiquette au sein d'un nœud ou d'une connexion donnée sélectionner au hasard, ou une étiquette choisie qu'elle soit perturbée ou non à chaque génération ;
- ✓ La mutation structurelle se produit de deux manières. Chaque mutation dilate ou rétrécit la taille du génome en ajoutant ou en supprimant un ou plusieurs nœuds ou une ou plusieurs connexions ;
- ✓ Dans l'ajout d'un nœud, un seul est ajouté avec un identifiant aléatoire à la première structure nœud ;
- ✓ Dans la mutation ajout d'une connexion, une seule est ajoutée dans la structure spécifiée avec un identifiant du nœud de départ et d'arrivée, ainsi qu'une valeur du poids et celui du numéro d'innovation ;
- ✓ Les poids des connexions de chaque réseau généré, sont mis en évolution pour produire une sortie effectrice, à partir des entrées sensorielles de l'environnement ;

- ✓ La mutation au niveau de ses poids de connexion de chaque réseau évolué et calculé à partir d'un apprentissage met en relation les entrées des poids dans une boucle de calcul jusqu'à obtention d'une sortie qui soit conforme.

- **La fonction de fitness.**

L'évaluation est réalisée en affectant une note à chaque créature, cette note étant la valeur de la fonction de fitness calculée qui est, dans notre cas, la distance parcourue suivant certains critères qui sont : {Le temps de simulation et la direction sur l'axe X}.



$$Fitness = \begin{cases} F(x) & F(x) > 0 \\ 0 & F(x) \leq 0 \end{cases}$$

- ✓  $x_0, y_0$  sont les deux coordonnées initiales du lieu de départ de la créature simulée.
- ✓  $x$  et  $y$  sont les coordonnées de la position de la créature au moment  $t$ .
- ✓  $\alpha$  et  $\beta$  sont successivement des facteurs de multiplication et de pénalité.

### Conclusion :

Pour conclure, on note que le système a été conçu dans le but de doter un robot d'une locomotion dans un environnement virtuel avec le moteur physique « ODE ».

Pour cela, nous avons défini un processus nous permettant de créer et simuler un robot. Ce robot emploie toutes les lois de la dynamique dans le but de reproduire des mouvements engendrant une locomotion en exploitant les techniques des réseaux de neurones NEAT.

- ✓ l'axe X pour une marche vers l'avant.
- ✓ l'axe Z pour lui donne la force à être en position debout.



# **Chapitre 4**

## **Résultats des expérimentations**

## 1 Introduction

Ce chapitre est concerné par l'application que nous avons réalisée sous certaines conditions qui sont nécessaires au fonctionnement du processus d'évolution. Le domaine de la vie artificielle ne nécessite pas d'intervention de la part de l'utilisateur puisque toutes les tâches qui sont réalisées par le programmeur ou ajustées par l'utilisateur sont désormais à la charge et sous la responsabilité du processus d'évolution.

## 2 Résultats de la locomotion :

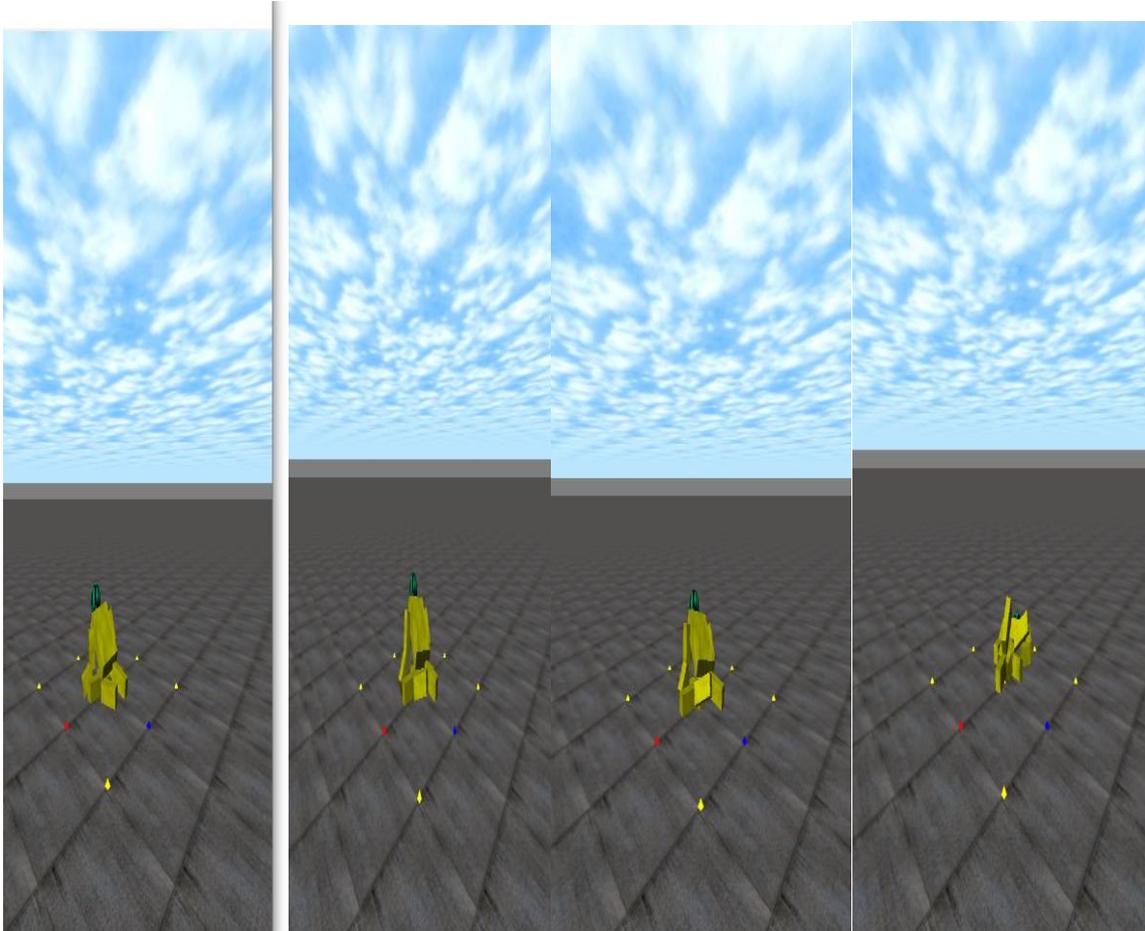
Nous présentons la morphologie simulée sous différents angles de capture dans le simulateur physique ODE



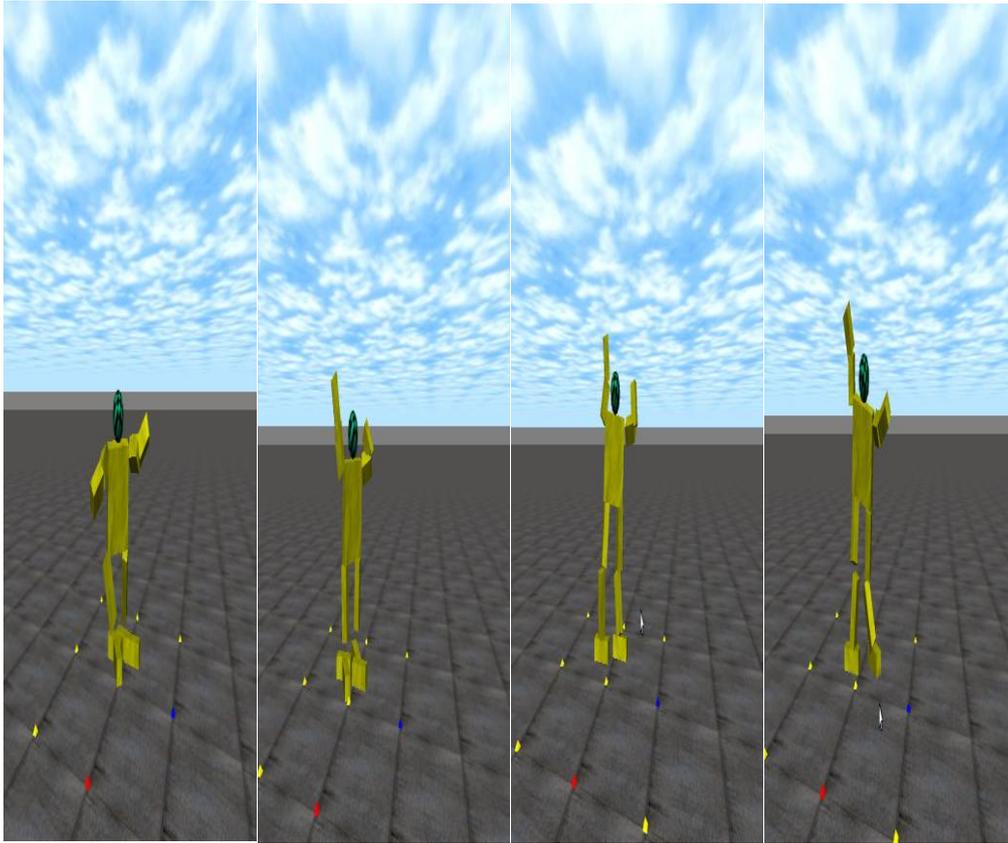
**Figure 35 :** Morphologie de Robot simulée dans ODE.

- On génère des mouvements pour que la créature apprenne à manipuler correctement ses appendices pour pousser le corps afin de produire le mouvement voulu.
- ✓ l'axe X pour une marche vers l'avant ;
- ✓ l'axe Z pour lui donne la force à être en position debout.

- La figure ci-dessous montre la locomotion sur une séquence tirée des meilleures générations après un nombre d'exécutions fixe.



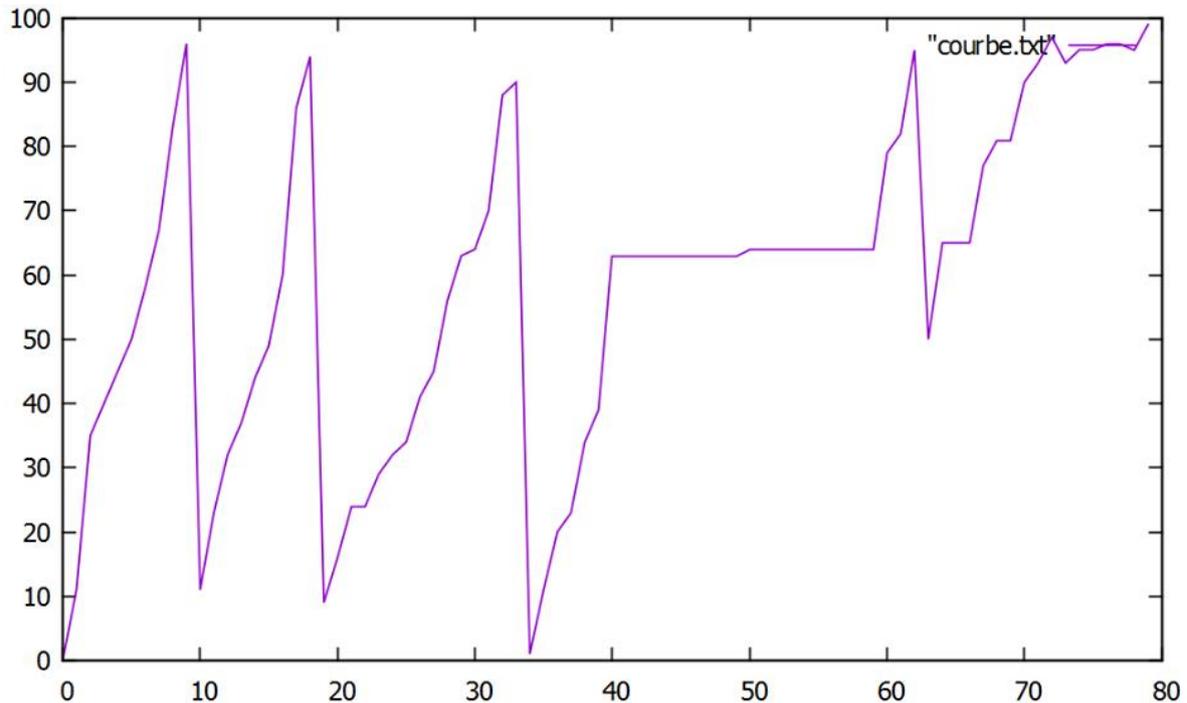
**Figure 36:**Locomotion de la créature sur les premières générations.



**Figure 37:**Locomotion de la créature après plusieurs générations.

- Dans les premières générations :
  - ✓ Les résultats obtenus sont loin d'être des mouvements de locomotion réussie.
- Après plusieurs générations :
  - ✓ On a pu arriver à des mouvements de locomotion plus cohérents.
  - ✓ Les meilleurs individus sont caractérisés, par leur grande valeur de fitness se traduisant par des mouvements plus réalistes.

### 3 Discussion des résultats :



**Figure 38:** Graphe de fitness.

- ✓ Au cours des générations, l'amélioration progressive est presque imperceptibles, mais les valeurs de fitness pour chaque génération ont augmenté progressivement et puis se lâchent comme c'est illustré dans le graphe 4.4
- ✓ l'évaluation est faite par la fonction de fitness à partir de la distance parcourue pour le robot
- ✓ L'augmentation de la distance parcourue est visible dans la croissance des valeurs de fitness,
- ✓ Les valeurs de fitness les plus évoluée sou les meilleures apparues à partir de la [60ème] génération, sont dues aux meilleures stratégies de déplacement évoluées par les individus de la population.
- ✓ à partir de la [40ème] génération nous remarquons que la fitness marche vers une certaine stabilité et que la distance parcourue et toute fois maximale.
- ✓ Le robot a réussi à augmenter leurs vitesses de locomotion, on appris à mieux utilisé leurs bras et pied pour engendrer les mouvements qui obtiennent la bonne marche.
- ✓ la totalité de la population ne répond pas de la même façon et c'est ce que nous appelons, interrupteur dans la performance de la fitness. Ceci est dû à l'émergence d'individus,

- ✓ A la fin de chaque génération, les valeurs de fitness sont utilisées pour choisir les individus qui vont servir comme base de reproduction pour la population de la nouvelle génération.

#### 4 Evaluation du Modèle :

Les résultats de ces expérimentations montrent que l'utilisation des réseaux NEAT pour faire évoluer des créatures dans un environnement virtuel est réalisable.

#### 5 Evaluation de la morphologie

- **L'Environnement :**

- ✓ On modélise l'environnement virtuel pour être conforme à tout environnement naturel illustrant les différentes lois de la physique pour qu'il offre la possibilité de porter et embarquer les solutions adoptées sur des robots réels de toute forme.
- ✓ Les résultats prouvent que l'évolution des comportements intelligents dans un environnement virtuel complexe contraint par les règles de la physique est faisable.
- ✓ Les créatures simulées ont démontré leur capacité d'apprendre et d'interagir par l'intermédiaire d'un modèle d'évolution artificielle.
- ✓ Parmi l'un des problèmes qu'on a résolu dans le fait que plus il y'a de degrés de liberté (DOF), plus la coordination devient une tâche difficile à apprivoiser pour un contrôleur.

- **La Morphologie:**

- ✓ Les résultats de notre morphologie étaient assez concluants relativement au comportement de la morphologie vis-à-vis du contrôleur.
- ✓ La morphologie n'a pas été un obstacle pour la locomotion, et la créature a su coordonner et chronométrer les mouvements de tout le corps pour pousser vers une direction choisie et produire des comportements de locomotives efficaces.
- ✓ Les créatures artificielles font évoluer leur capacité à se servir de leurs modèles en commandant leurs structures physiques par l'application des forces motrices et ce en se servant de leurs jointures.
- ✓ La plus complexe des jointures existantes dans ODE, « Ball and socket » qui tient compte de trois degrés de liberté autour des trois axes différents. De plus, cette jointure fournit 2 senseurs de rétroaction pour chaque axe.

- ✓ Les systèmes neuronaux obtenus dénotent qu'ils peuvent, dans beaucoup de cas, représenter une solution viable dans le processus d'évolution de créatures artificielles.
- **Le Contrôleur :**
  - ✓ Quand on utilise le contrôle d'une créature avec plusieurs degrés de liberté (DOF) l'utilisation d'un réseau de neurone ça sera très complexe comme contrôleur.
  - ✓ Une grande structure neuronale aura pour effet de générer une contrainte difficile à contrôler surtout en termes de puissance de calcul, de tels problèmes ont été résolus grâce aux techniques d'évolution structurelle des réseaux NEAT.
  - ✓ Les travaux des NEAT réalisés par les chercheurs travaillant dans le même domaine sont basés sur l'évolution des comportements de créatures simples.
  - ✓ En plus de l'expérimentation réalisée, il serait plus intéressant d'aborder de nouvelles investigations dans le but de parfaire les mouvements simulés et de générer des comportements plus complexes tels que l'évitement d'obstacle, l'évitement d'objets mobiles, le comportement de fuite, le fourragement...

# **Conclusion générale**

### Conclusion général

L'objectif de ce mémoire est de recréer des mécanismes et des phénomènes biologiques pour les comprendre et résoudre certains de leurs problèmes, en utilisant une combinaison de modèles informatiques, mathématiques, biologique et physiques tout ceci dans le but d'observer, de modéliser et de comprendre l'interaction entre les êtres vivants, et leur environnement à des échelles très différentes ainsi qu'au niveau de l'organisation (cellulaire, organique)

En physiologie la locomotion est la faculté pour un organisme vivant de se mouvoir pour se déplacer. Des contraintes sont exercées sur ces organismes suivant le milieu : terrestre, aérien ou aquatique, dans lesquels ils se meuvent. Reproduire la locomotion consiste à reproduire l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu d'une manière bien défini pour un réalisme acceptable.

Ce mémoire représente une étude pour développer un système de contrôle reproduisant l'évolution artificielle pour synthétiser et simuler la locomotion de créatures synthétiques construites dans un simulateur physique. La technique que nous avons choisie pour contrôler les mouvements de nos créatures artificielles consiste en un système connexionniste représenté par un réseau de neurones NEAT, qui étant les systèmes les plus utilisés dans ce domaine, ont été utilisés pour produire un outil flexible de synthèse de mouvements pour la réalisation des buts recherchés.

L'intérêt porté sur les créatures artificielles est motivé par les nombreux avantages véhiculés par les créatures qui évoluent au sein des écosystèmes artificiels complexes.

- Se doter de capacité à se déplacer dans des environnements.
- Exercer différentes tâches vitales.

La morphologie joue un rôle dans les comportements générés qui pourront être utiles à étudier ou à visualiser. Il existe toutefois des phénomènes impossibles à manipuler dans la biologie telle que nous la connaissons.

Ainsi, les mouvements de la créature sont réalisés grâce à un contrôleur constitué d'un réseau de neurones NEAT que nous avons fait évoluer par le biais des méthodes évolutionnistes. Le processus d'évolution est appliqué en premier sur la structure hiérarchique du réseau qui est

non fixe, et sur les poids du réseau généré, qui sera traduit via des effecteurs à des angles dans les jointures de la créature. Le déplacement réalisé par ce contrôleur, est supervisé par une fonction de fitness qui a pour rôle de faire converger le processus d'évolution vers le comportement recherché, cette fonction de fitness étant la distance parcourue par chaque individu au bout d'un temps fixé de la simulation.

Les résultats que nous avons obtenus pour une locomotion simple présentent les propriétés suivantes :

- Ils sont réalistes et permettent à la créature de générer un ensemble de mouvements combinés pour une meilleure locomotion au fil des générations suivantes.
- Ils offrent de nombreuses perspectives pour élargir nos tests dans de nouveaux types d'environnements qui pourraient conduire à de nouveaux comportements.
- Ils offrent la possibilité de faire évoluer les créatures simulées aux seins d'écosystèmes complexes.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- A ,Tibermacine, Techniques de contrôle bio-inspirées: application à la simulation réaliste des comportements de créatures artificielles, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2015.
- A.Boussaa, Un GRN pour le contrôle de créatures artificielles, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2017.
- A.sadi, Les réseaux de neurone dans l'évolution de créatures artificielles, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2017.
- Adrien Lessard , sciences de l'éducation ,université de Montreal .
- Claude TOUZET,LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, Juillet 1992.
- Didier Müller ,Automates cellulaires,2015.
- David Panzoli, Simulation comportementale par réseau de neurones et apprentissage par algorithme génétique,2003.
- E.Aimeur,Introduction à la vie artificielle ,université de Montréal ,
- H.Bersini , la vie artificielle, Texte de la 262e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée ,18 septembre 2000.
- Hervé Luga, experimentation virtuelle :vie artificielle pour la génération de formes et de comportement ,Université de Toulouse,
- Jean-Baptiste Mouret, Évolution de réseaux de neurones, Paris, France,2008
- Jean-Philippe RENNARD, La Vie Artificielle,Paris, Librio, 1999.
- Jean-Michel Renders , Algorithme génétique et réseau de neurones ,Paris , 1995.
- N. Ouannes, La phylogénèse pour la création de créatures artificielles, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2011.
- N. Ouannes, Evolution et adaptation de comportements de créatures artificielles dans un écosystème simulé, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2015.
- Pierre Borne,Mohamed Benrejeb,Joseph Haggége,Les réseaux de neurones,Paris,2007.
- R,Smith,OPEN DYNAMIC ENGINE V0.5 USER GUIDE ,23 fevrier ,2006.
- Stéphane Doncieux1, Évolution de réseaux de neurones, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)

