

17/004.409

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de 8 Mai 1945 – Guelma -

Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière

Département d'Informatique



**Mémoire de Fin d'études Master**

**Filière : Informatique**

**Option : Ingénierie des Medias**

12/ 797

**Thème :**

---

**L'AUTO-ORGANISATION DANS LES  
SYSTEMES MULTI-AGENTS ADAPTATIFS**

---

**Encadré Par :**

Mme. BENHAMZA Karima

**Présenté par :**

SALAH Halima

GUEBAILIA Khadidja

**Juin 2012**

# Remerciements



*En premier lieu et avant tout nous tenons à exprimer nos remerciements au bon « Dieu » qui nous a entouré de sa bienveillance et nous a renforcé avec le courage et la force pour avoir enfin mené à bien ce travail.*

*Ensuite, nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur **Mme. BENHAMZA KARIMA** pour avoir accepté de nous suivre, et nos plus vifs remerciements pour son soutien, sa patience, ses conseils judicieux, pertinents, et sa sympathie dont il nous a fait preuve tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donnée les bases de la science, nous remercions très sincèrement, les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail*

*Nos pensées se tournent maintenant vers nos parents qui nous ont entourés par la tendresse et l'amour dévoué depuis notre enfance. Merci de votre soutien de tous les jours et nous espérons que vous soyez aussi fiers de nous que nous le sommes de vous.*

*Et finalement à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail nous disons Merci.*

**HALIMA**  
**Khadija**

---

---

# Résumé

Les systèmes multi-agents (SMA), constitués d'un grand nombre d'entités autonomes et en interaction, proposent une nouvelle approche de modélisation de problèmes en intelligence artificielle.

Les environnements, auxquels les systèmes multi-agents (SMA) appartiennent, sont de plus en plus complexes et dynamiques. Cette complexité nécessite une conception de systèmes capables de s'adapter et d'évoluer dynamiquement de manière autonome et auto-organisée : c'est ce qui offre les systèmes multi-agents adaptatifs (AMAS).

La bio-inspiration a amené de nombreux chercheurs à s'inspirer de la nature pour développer de nouveaux algorithmes pour la résolution de problèmes complexe. C'est le cas notamment des systèmes collectifs tels que les colonies d'insectes, capables d'accomplir des tâches difficiles, dans des environnements dynamiques et variés sans pilotage ou contrôle externe.

Dans ce travail, nous présentons une plate-forme de segmentation d'image basée sur un algorithme bio-inspiré de colonies de fourmis. Le modèle s'adapte au changement d'environnement, ses éléments s'auto-organisé pour la résolution de problèmes. La tâche de segmentation est considérée comme le résultat de cette auto-organisation. Le modèle proposé et implémenté sur une plate forme multi-agents donne des résultats satisfaisants et montre l'efficacité de notre modèle.

## Mots Clés :

Agents, Systèmes multi-agents, Systèmes multi-agents adaptatifs, résolution de problème complexe, bio-inspiré, colonie de fourmis, segmentation contours

---

---

---

## *Sommaire*

**Introduction générale.....6**

### **Chapitre I – Agents et systèmes multi-agents**

**Introduction.....8**

**I. Agent.....8**

    II.1. Définition d’agent .....8

    II.2. Le processus de fonctionnement de l’agent .....10

    II.3. Architectures d’agents.....11

        II.3. 1. Agent cognitif.....11

        II.3. 2. Agent réactif.....12

        II.3. 3. Agent hybride.....13

    II.4. Agent versus Objet.....14

**II. Système Multi-Agents (SMA) .....14**

    III.1. Définition d’un SMA .....14

    III.2. Caractéristiques des systèmes multi-Agents .....15

    III.3. SMA réactifs et cognitifs .....16

    III.4. Environnement d’un SMA .....17

    III.5. Interaction dans un SMA .....18

    III.6. Avantage des SMA .....18

    III.7. Domaines d'application des SMA.....19

**Conclusion .....20**

### **Chapitre II – Adaptation et auto-organisation dans les systèmes multi-agents**

**Introduction.....21**

**I. Auto-organisation .....21**

---



---

I.1. Organisation .....	21
<b>I.1.1. Définition</b> .....	21
<b>I.1.2. Caractéristiques générales des organisations</b> .....	22
I.1.3. Niveaux d'organisation.....	22
I.2. Auto-organisation .....	23
I.2.1. Définition.....	23
I.2.2. Conditions d'apparitions et propriétés de l'auto-organisation.....	24
I.2.4. Adaptation par auto-organisation .....	25
<b>II. Émergence</b> .....	26
II.1. Définition .....	26
II.2. Propriétés de l'émergence .....	27
II.3. Conditions d'apparitions de l'émergence.....	27
II.4. Auto-organisation et émergence.....	28
II.5. Emergence dans un SMA.....	28
II.6. Rôle de l'observateur .....	29
<b>III. Systèmes Multi-Agents Adaptatifs (ou AMAS)</b> .....	29
III.1. Présentation de la théorie.....	30
<b>IV. Intelligence collective</b> .....	31
IV.1. Définition.....	31
IV.2. Caractéristiques de l'intelligence collective .....	31
IV.3. Intelligence collective naturelle.....	31
IV.4. Intelligence collective artificielle .....	33
<b>Conclusion</b> .....	33

## **Chapitre III – Modélisation et simulation des systèmes complexes**

Introduction.....	34
<b>I. Systèmes complexes</b> .....	34
I.1. Définition d'un système complexe .....	34
I.2. Caractéristique : .....	35
I.3. Comportement .....	35
I.4. Méthodes de résolution des systèmes complexes : .....	35

---



---

<b>II. Modélisation des systèmes complexes</b> .....	37
II.1. Définition d'un modèle : .....	37
II.2. Objectif de la modélisation .....	37
II.3. Types de modèles.....	38
II.5. Modélisation orientée agents.....	38
<b>III. Simulation des systèmes complexes</b> .....	38
III.1. Définition .....	38
III.2. Objectifs de la simulation .....	39
III.4. Simulation orientée agents.....	40
<b>IV. Mise en place d'un modèle de simulation</b> .....	40
<b>V. Modélisation et simulation orienté agent</b> .....	41
<b>VI. Traitement d'image comme problème complexe</b> .....	42
V.1. Présentation du problème « segmentation d'image» .....	42
V.1.1. Segmentation par région .....	43
V.1.2. Segmentation par contour .....	44
V.2. Méthode de segmentation de contour .....	44
V.3. Méthodes Bio-inspirés pour la segmentation d'image.....	45
V.4. Travaux connexes .....	47
<b>Conclusion</b> .....	48

## Chapitre VI- Conception et implémentation

<b>Introduction</b> .....	49
<b>I. Description et objectifs de l'application</b> .....	49
I.1. Choix de l'application .....	49
I.2. Objectifs de l'application .....	49
<b>II. Conception</b> .....	50
II.1. Modélisation du problème.....	50
II.2. Comportement de l'agent réactif « fourmis » .....	50
II.3. Algorithme principal .....	50
a. Phase de détection et d'adaptation de contour.....	51

---

---

b. Phase d'amélioration de contour.....	51
II.3 Réalisation.....	51
a. Environnement de programmation.....	53
b. Présentation de l'application.....	54
<b>III. Résultats expérimentaux.....</b>	<b>57</b>
III.1. Discussion des résultats .....	57
III.2. Comparaison des résultats .....	61
<b>Conclusion.....</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion générale et perspective .....</b>	<b>65</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>67</b>

## Liste des Figures

### Chapitre I

Figure 1.1- <i>Agent dans son environnement</i> .....	09
Figure 1.2- <i>Fonctionnement d'un agent</i> .....	10
Figure 1.3- <i>Agent cognitif</i> .....	11
Figure 1.4- <i>Agent réactif</i> .....	12
Figure 1.5- <i>Architecture d'agent hybride</i> .....	12
Figure 1.6- <i>Système multi-agents</i> .....	14

### Chapitre II

Figure 2.1- <i>Niveaux d'organisation</i> .....	21
Figure 2.2- <i>l'adaptation par auto-organisation</i> .....	22
Figure 2.3- <i>Une fourmilière</i> .....	30

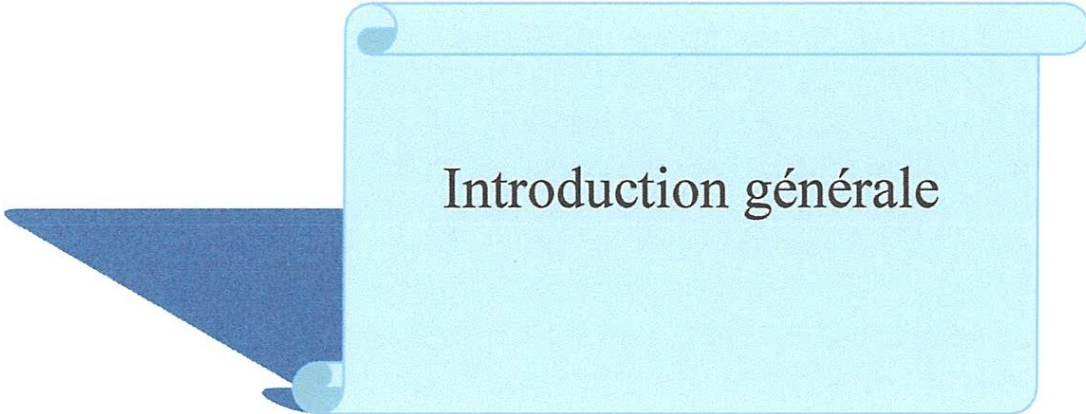
### Chapitre III

Figure 3.1- <i>Principe de la simulation</i> .....	36
Figure 3.2- <i>L'activité de modélisation et de simulation</i> .....	38
Figure 3.3- <i>Segmentation par région : (a) Image original, (b) Image segmenté</i> .....	40
Figure 3.4- <i>Illustration de la détection de contours. (a) Image originale, (b) Détection des contours</i> .....	41

### Chapitre IV

Figure 4.1- <i>Algorithme ACS</i> .....	47
Figure 4.2- <i>Algorithme d'amélioration</i> .....	48
Figure 4.3- <i>Interface Netlogo</i> .....	49
Figure 4.4- <i>Interface de l'application</i> .....	50
Figure 4.5- <i>Importer image</i> .....	51
Figure 4.6- <i>Distribution de fourmis sur l'image</i> .....	51
Figure 4.7- <i>Carte de la phéromone</i> .....	52
Figure 4.8- <i>Graphe d'interprétation</i> .....	52
Figure 4.9- <i>Distribution de fourmis</i> .....	53
Figure 4.10- <i>Segmentation de contour nombre de pas=50 et nombre d'itération varié</i> ....	53
Figure 4.11- <i>Segmentation contour nombre d'itération = 45 et nombre de pas varié</i> .....	54
Figure 4.12- <i>Adaptation de l'algorithme</i> .....	55
Figure 4.13- <i>L'adaptation de l'algorithme aux changements d'environnement</i> .....	57
Figure 4.14- <i>Résultats de l'algorithme d'amélioration a) image originale b) segmentation par l'algorithme proposé c) amélioration par algorithme proposé d) l'image b) + c)</i> .....	58
Figure 4.15- <i>Comparaison entre notre algorithme et filtre de sobel : a) Images originaux, b) Application de filtre de Sobel, c) Application de l'algorithme (ACS) proposé</i> .....	58
Figure 4.16- <i>Comparaison entre notre algorithme et filtre de Canny : a) Images originaux, b) Application de filtre de Canny, c) Application d'amélioration proposé</i> .....	60
Figure 4.17- <i>Comparaison entre notre algorithme ACS et l'algorithme ACO</i> .....	59
Figure 4.18- <i>Adaptation de l'algorithme a) Image originale b) Bateria et .al c) Application de l'algorithme proposé</i> .....	60





## Introduction générale

---

---

## *Introduction générale*

L'Intelligence Artificielle (IA) peut être présentée comme la science qui tente de construire des "systèmes informatiques intelligents". Une science qui permet d'accomplir par une machine des tâches que l'homme réalise en utilisant son intelligence.

La terminologie d'Intelligence Artificielle est apparue en 1956 mais très vite, ses limites pour représenter l'information et ses difficultés à s'adapter à la dynamique de l'environnement, ont éveillé l'intérêt des chercheurs pour de nouvelles approches. En effet, plongés dans des environnements de plus en plus complexes, dynamiques, réparti et imprévisibles, les logiciels deviennent difficilement adaptable dans leur globalité. Il est donc nécessaire de distribuer l'intelligence sur plusieurs concepts: c'est le principe de l'intelligence artificiel distribué (IAD). L'I.A.D est donc une branche de l'I.A. classique qui s'intéresse à des comportements intelligents qui sont le produit de l'activité coopérative de plusieurs entités.

Dans un nouveau panorama de l'IAD, les systèmes multi-agents (SMA) constitués d'un certain nombre d'entités autonomes, interagissent entre eux pour mener à bien une tâche considérable.

L'approche par les systèmes multi-agents adaptatifs (AMAS) constitue actuellement un domaine à part entière en IAD. En effet, la complexité des environnements et des systèmes informatiques actuels nécessite la conception de systèmes dotés de capacités d'adaptation, c'est-à-dire aptes à évoluer dynamiquement, de manière autonome et auto-organisé. La résolution s'effectue de manière locale à chaque agent et l'auto-organisation du collectif mène à l'émergence de la solution au niveau global.

Pour résoudre les problèmes complexes, les chercheurs se sont souvent tournés vers la nature pour essayer de comprendre comment elle fonctionne et comment des problèmes très complexes sont résolus d'une manière simple. C'est le cas notamment des systèmes collectifs naturels des colonies d'insectes. Ces derniers sont capables d'accomplir des tâches difficiles, dans des environnements dynamiques et variés sans pilotage ou contrôle externe.

Dans ce contexte, notre travail porte sur l'auto-organisation des systèmes multi-agents adaptatifs concrétisé par un modèle bio-inspiré. On cherche donc à concevoir un SMA réactif adaptatif et auto-organisé pour la résolution des problèmes complexes.

---

---

## **Objectif de ce travail**

L'objectif de notre travail est de concevoir un collectif d'agents, plongé dans un environnement inconnu, doté de perceptions partielles et de connaissances incomplètes et qui par ses interactions va évoluer pour construire la solution du problème. Parmi ces systèmes collectifs, le modèle des colonies de fourmis va être appliqué. Le choix du problème à traiter s'insère dans le domaine de traitement d'image plus particulièrement la segmentation.

La segmentation des images constitue le cœur de tout système de vision. C'est une étape importante dans le processus d'analyse des images qui n'a pas encore abouti à des résultats satisfaisants malgré les recherches menées. Elle a pour objectif de fournir une description des objets contenus dans l'image par l'extraction de différents indices visuels tels que les contours des objets.

Ce mémoire est composé principalement de quatre chapitres :

### **Chapitre I – Agents et systèmes multi-agents**

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts de base relatifs aux agents et aux systèmes multi-agents.

### **Chapitre II – Adaptation et auto-organisation dans les systèmes multi-agents**

Nous nous intéressons dans ce chapitre à des concepts essentiels liés aux systèmes multi-agents adaptatif (AMAS) qui sont l'émergence, l'auto-organisation. Nous mettons aussi l'accent sur l'intelligence collective.

### **Chapitre III – Modélisation et simulation des systèmes complexes**

Dans ce chapitre nous présentons une étude sur les systèmes complexes, par la suite nous décrivons le problème de la segmentation d'image comme un exemple.

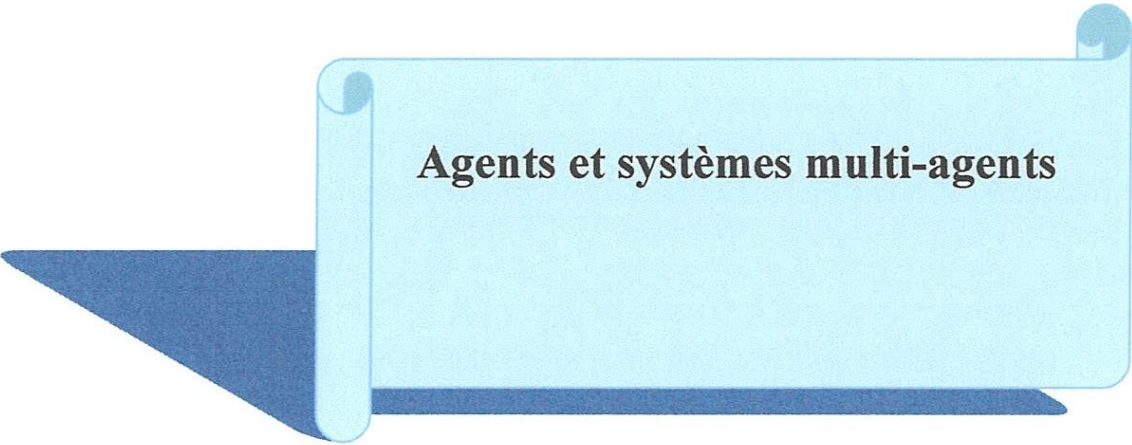
### **Chapitre IV- Conception et implémentation**

Nous présentons dans ce chapitre la conception et l'implémentation de notre système et nous discutons les différents résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale et quelques perspectives souhaitées.

---

## Chapitre 1



**Agents et systèmes multi-agents**

---

# Chapitre I : Agents et systèmes multi-agents

## Introduction

La notion d'agent et de système multi-agents (SMA) est relativement récente en informatique, mais elle a tendance à prendre de plus en plus d'importance. En effet, l'approche par agent recouvre plusieurs domaines, tels que : l'intelligence artificielle (IA), les systèmes distribués et le génie logiciel.

D'ailleurs, l'agent constitue l'élément de base d'un SMA, l'interaction entre ces éléments produit des phénomènes globaux qu'aucun agent ne peut réaliser individuellement avec la même efficacité. Pour comprendre ces notions il est donc nécessaire de bien les décrire et d'insister sur leurs caractéristiques.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les concepts importants liés aux agents, leur processus de fonctionnement ainsi que leur architecture. Nous décrivons par la suite quelques concepts liés aux systèmes multi-agents et nous terminons par une conclusion.

## I. Agent

L'agent fait l'objet de recherche dans différentes disciplines de l'IA. Plusieurs sens lui sont attachés car de nombreux chercheurs ont défini ce terme de manières différentes.

### II.1. Définition d'agent

Dans la littérature, on trouve une multitude de définitions de ce concept. Ces définitions présentent certaines similitudes. En ce qui suit, nous présentons quelques définitions les plus importantes :

D'après Ferber « Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents» [Ferber, 95].

Cette définition a été élargie par le même auteur « On appelle agent une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement,
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- qui possède des ressources propres,
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- qui possède des compétences et offre des services,
- qui peut éventuellement se reproduire,
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. » [Ferber, 97].

Du point de vue de Jennings et Wooldridge « Un agent est une entité informatique *située* dans un environnement, qui est capable *d'agir de manière autonome et flexible* de façon à remplir ses objectifs, c'est à dire ceux qui lui ont été assignés lors de sa conception. » [Jennings et al., 98]

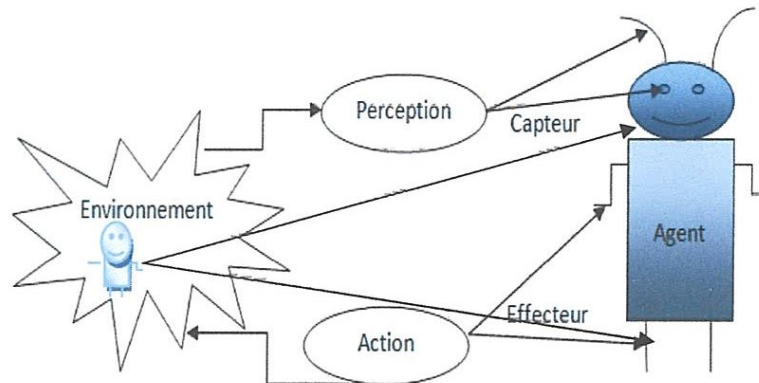
[Russel et al., 06] définissent l'agent d'une façon général comme suit : «On appelle agent toute entité qui peut être considérée comme percevant son environnement grâce à ces capteurs et qui agit sur cet environnement via ces effecteurs. ».

D'après les définitions précédentes, nous avons souligné trois concepts clés de l'agent :

- **Situé** : un agent est dit situé, s'il est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement.
- **Autonome** : un agent est capable d'agir sans l'intervention directe de l'être humain ou d'autres agents et qu'il est capable de contrôler ses propres actions et son état interne.
- **Flexible** : un agent est dit flexible s'il est capable d'agir de manière réactive, proactive et sociale :
  - ✓ **Réactif** : être capable de percevoir son environnement et de réagir dans le temps.

- ✓ **Proactif** : prendre l'initiative et être opportuniste au bon moment.
- ✓ **Social** : être capable d'interagir avec les autres agents quand la situation l'exige (pour compléter ses tâches ou coopérer avec eux).

La figure ci-dessous montre la représentation de l'agent dans son environnement

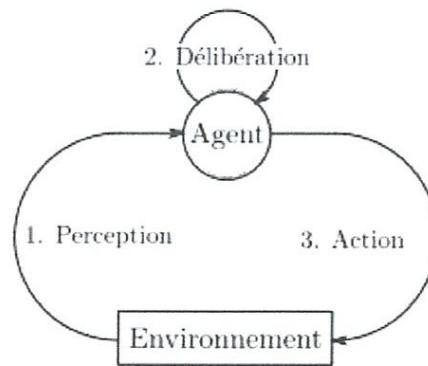


*Figure 1.1 : Agent dans son environnement*

L'agent perçoit son environnement via ses capteurs, et réagit sur celui-ci via ses effecteurs. Ce mécanisme représente le fonctionnement de l'agent

## II.2. Le processus de fonctionnement de l'agent

- Le processus de fonctionnement d'un agent comprend trois phases successives, qui sont :
- Une phase de **perception** permettant d'élaborer une idée sur l'état actuel de l'environnement via un ensemble de capteurs.
  - Une phase de **délibération** permettant de décider quelle action à exécuter suivant l'état de l'environnement et l'état interne de l'agent. C'est à ce niveau que le comportement de l'agent est décrit.
  - la phase **d'action** représente l'exécution de l'action par l'agent. Ceci va apporter d'une part des modifications sur l'état de l'environnement et d'autre part sur l'état de l'agent lui-même.



*Figure 1.2: Fonctionnement d'un agent*

La phase de délibération de l'agent dépend de son architecture interne. Cette architecture décrit la manière de conception de l'agent qui dépend de son mécanisme de raisonnement.

### II.3. Architectures d'agents

Nous distinguons trois types d'architectures : **agent cognitif**, **agent réactif** et **agent hybride**.

#### II.3. 1. Agent cognitif

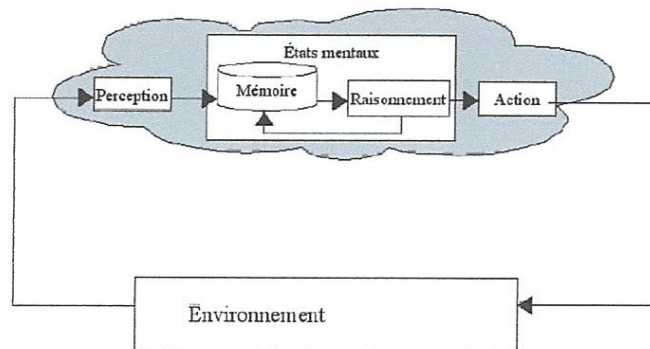
L'agent cognitif est décrit par Ferber comme suit « Les agents cognitifs, par leur capacité de raisonner sur des représentations du monde, sont capables à la fois de mémoriser des situations, de les analyser, de prévoir des réactions possibles à leurs actions, d'en tirer des conduites pour les événements futurs et donc de planifier leur propre comportement » [Ferber, 95].

Les agents cognitifs sont dit aussi **intentionnels** car ils ont des buts à accomplir, avec une certaine intelligence artificielle et une capacité d'apprentissage et d'adaptation.

Ce type d'agent se caractérise par:

- Une représentation explicite de l'environnement et du monde auquel ils appartiennent
- Une réaction planifiée
- Une base de connaissances comprenant des informations et du savoir faire.
- Une mémoire pour mémoriser les anciens états





**Figure 1.3: Agent cognitif [Laguel, 10]**

L'une des architectures cognitives la plus connues est sans doute l'architecture BDI : Belief (Croyance), Desire (Désir), Intention (Intention) qui comme son nom l'indique, est basée sur les notions d'attitudes mentales qui sont la croyance, le désir et l'intention :

- Les croyances correspondent aux informations dont l'agent dispose sur son environnement.
- Les désirs représentent des objectifs qu'un agent veut réaliser.
- Les intentions représentent des désirs qu'un agent adopte et engage à réaliser. Son intention est adoptée basé sur ses croyances et ses désirs.

### II.3. 2. Agent réactif

Comme son nom l'indique, un agent réactif ne fait que réagir aux changements qui surviennent dans l'environnement. Autrement dit, un tel agent ne fait ni délibération ni planification, il se contente simplement d'acquérir des perceptions et de réagir à celles-ci. Étant donné qu'il n'y a pratiquement pas de raisonnement, ces agents peuvent agir et réagir très rapidement.

Ferber définit ce type d'agent comme suit « Les agents réactif sont définis par le fait même qu'ils n'ont pas de représentation de leur environnement et des autres agents, sont incapables de prévoir ce qui va se passer et donc d'anticiper en planifiant les actions à accomplir » [Ferber, 95].

L'agent réactif se caractérise par:

- Pas de mémoire.
- Pas de Représentation explicite.
- La prise de décision se base sur le fait du Stimulus/Réponse.
- Une simple mise en œuvre.

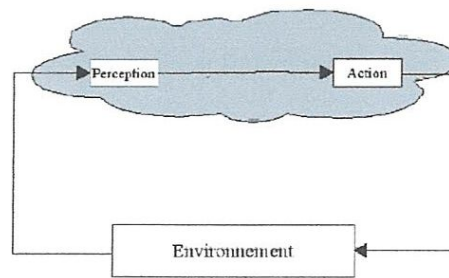


Figure 1.4 : Agent réactif [Laguel, 10]

### II.3. 3. Agent hybride

D'autres types d'agents qualifiés d'hybrides, utilisant ces deux types de comportement, sont ensuite apparus. Les agents hybrides intègrent l'aspect cognitif et réactif. L'idée est de combiner les deux types d'approches qui peuvent être vues comme complémentaires. Dans une telle architecture un agent est composé de modules qui gèrent indépendamment la partie réactive et la partie cognitive. Le problème central reste de trouver le mécanisme idéal assurant cette combinaison.

C'est une architecture multicouche qui se base sur la hiérarchie de niveaux. Généralement, on trouve deux présentations pour cette architecture « horizontale et verticale » :

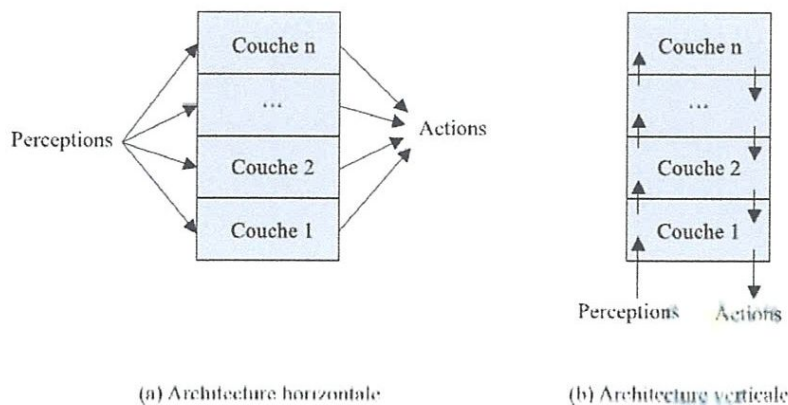


Figure 1.5 : Architecture d'agent hybride

Après la révolution de la programmation orientée objet (POO), nous sommes donc à l'aube d'une nouvelle révolution qui serait celle de la programmation orientée agent (POA). Bien qu'il y ait certaines similarités entre les approches orientées objet et celles orientées agent, il y a aussi plusieurs différences importantes

## II.4. Agent versus Objet

On peut également souligner quelques différences entre POO et POA

- Les **objets** exécutent des tâches ; ils n'ont ni but, ni recherche de satisfaction. En revanche les **agents**, bien plus élaborés, disposent d'objectifs et des buts à atteindre.
- Les **objets** utilisent un mécanisme d'envoi de message qui se résume à un simple appel de méthode. Pour les **agents**, les interactions sont plus complexes et font intervenir des communications de haut niveau.
- Les **agents** sont autonomes alors que les **objets** ne le sont pas ; un agent va décider par son propre processus de décision s'il exécute ou non une action requise.
- Le comportement des **agents** dans les systèmes n'est pas toujours prévisible.

Cependant, l'utilisation d'un agent individuel ne répond pas souvent aux problèmes ce qui conduit à utiliser un groupe d'agents qui doivent être capables de coopérer, coordonner, on parle alors de système multi-agents (SMA).

## II. Système Multi-Agents (SMA)

Les systèmes multi-agents sont un domaine relativement jeune, apparu dans les années 80, issu de la rencontre de l'IA et des systèmes distribués. Il y a plusieurs raisons à cela :

- En effet, les problèmes les plus complexes exigent l'utilisation de divers agents et ce n'est qu'en les faisant coopérer qu'on arrive à des solutions plus efficaces.
- D'autre part, il existe certains problèmes qui sont distribués de manière inhérente et donc seule une solution distribuée peut résoudre ce genre de problèmes. [Picard,04]

### III.1. Définition d'un SMA

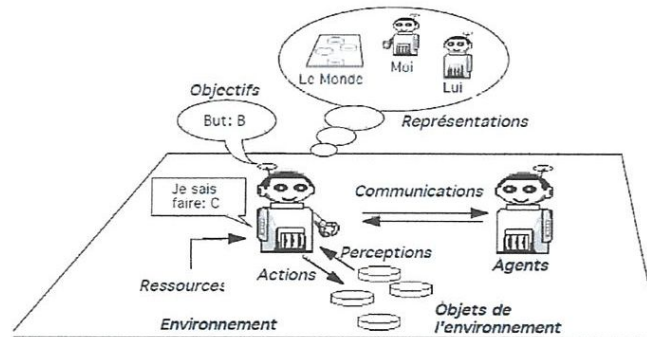
Plusieurs définitions ont été proposées, nous allons commencer par présenter la définition introduite par [Ferber, 95].

« On appelle système multi-agents (ou SMA), un système composé des éléments suivants :

- Un environnement **E**, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.

- Un ensemble d'objets **O**. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans **E**. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble **A** d'agents, qui sont des objets particuliers ( $A \subset O$ ), lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations **R** qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations **Op** permettant aux agents de **A** de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de **O**.
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers ».

La Figure illustre cette définition :



*Figure 1.6 : Système multi-agents [Ferber, 95]*

Une autre définition donnée par Wooldridge et Jennings : « un ensemble d'agents en interaction afin de réaliser leurs buts ou d'accomplir leurs tâches » [Wooldridge et al., 95].

En ce qui suit, nous présentons quelques caractéristiques des SMA

### III.2. Caractéristiques des systèmes multi-Agents

Un système multi-agent est caractérisé par [Sycara, 98]:

- Chaque agent a un restreint de capacité et de ressource, donc plusieurs agents doivent interagir pour résoudre le problème général.
- Le système multi-agent est distribué.
- Le traitement dans un système multi-agents est asynchrone. Chaque agent traite automatiquement son travail selon son plan. Il ne doit pas attendre les autres sauf s'ils ont besoin d'interagir pour terminer leurs travaux.

Après avoir défini les systèmes multi-agents, nous présentons les différents types des SMA, afin de connaître leurs avantages et inconvénients.

### III.3. SMA réactifs et cognitifs

#### a) Le système multi-agents réactif

Un système multi-agents réactif est composé d'agents réactifs. L'étude des SMA réactifs cherche à comprendre le fonctionnement du système comme un tout, en se focalisant sur les aspects collectifs du système c'est-à-dire sur les interactions et la dynamique qui en résulte.

Ce système présente quelques avantages tels que la fiabilité (assurée par le grand nombre d'agents du système et leur simplicité) et la grande flexibilité vis-à-vis du changement dynamique de son environnement.

Mais la création de tels systèmes doit faire face aux difficultés de prédiction du comportement global non représenté explicitement dans le système, et aussi on peut avoir des difficultés à contrôler les comportements individuels par rapport à un objectif non représenté explicitement.

#### b) Le système multi-agents cognitifs

Un système multi-agents cognitifs est composé d'agents cognitifs. L'étude de ce système cherche à améliorer les comportements individuels des agents en s'intéressant à leur intelligence individuelle, leur modèle cognitif, et leurs communications. Ce type de système met l'accent sur l'agent et ses capacités.

Ce système est facile à concevoir pour les problèmes dont la solution est prévisible, aussi il tire profit des mécanismes de représentation complexe, et permet l'échange d'information.

Ce système présente quelques inconvénients tels que : la difficulté de représenter les connaissances dans les problèmes complexes, la complexité de communications entre agents, la faible performance pour des actions en temps réel, temps important de réalisation des tâches et l'impossibilité d'adaptation pour un environnement dynamique.

Un système multi-agents possède un environnement dans lequel plusieurs agents évoluent, communiquent, perçoivent et agissent

### III.4. Environnement d'un SMA

L'environnement est un élément important dans le système multi-agents. C'est grâce à lui que les agents peuvent coexister et interagir. Il est considéré comme le médium des interactions. L'environnement doit pouvoir être perçu par les agents et ces derniers doivent pouvoir agir dessus et interagir au travers.

Selon le point de vue que l'on adopte, différents types d'environnements peuvent être identifiés.

**Point de vue du système multi-agent :** Du point de vue du système multi-agent, l'environnement correspond à l'ensemble des entités extérieures au système. Par exemple, si l'on considère une fourmilière, l'environnement est tout ce qui est présent dans la nature à l'exception des fourmis appartenant à la fourmilière : cailloux, végétaux, nourriture, lois physiques, etc.

**Point de vue de l'agent :** Du point de vue de l'agent, l'environnement est tout ce qui est extérieur à lui-même. Par exemple, l'environnement d'une fourmi est composé de l'environnement de la fourmilière et de toutes les autres fourmis.

**Point de vue du concepteur :** Du point de vue du concepteur du système, on peut considérer plusieurs sortes d'environnements :

- L'environnement d'exécution du programme qui correspond à l'état du système informatique sur lequel s'exécute le SMA.
- L'environnement de simulation qui représente l'ensemble des outils logiciels permettant de simuler, de visualiser et d'évaluer l'exécution du SMA.
- L'environnement de développement qui est l'ensemble des outils logiciels facilitant le développement du système.

Lorsque les agents sont réactifs, l'environnement détient une importance capitale car il est le médiateur de leurs interactions. En effet, comme ces agents ne peuvent communiquer directement entre eux, ils s'influencent mutuellement soit par leur position s'ils sont situés, soit par l'intermédiaire d'objets qu'ils perçoivent et modifient. [Klein , 09]

L'environnement possède certaines propriétés

- **Accessible ou inaccessible :** un agent a accès à l'état complet de l'environnement ou non.
- **Déterministe ou indéterministe :** le changement de l'état de l'environnement est uniquement déterminé par l'état courant et les actions des agents ou non.

- *Statique ou dynamique* : l'environnement peut changer quand l'agent est en action (réflexion) ou non.
- *Discret ou continu* : le nombre de perceptions et d'actions est limité ou pas.

Dans un système multi-agents, l'interaction détient une grande importance puisque c'est grâce à elle que les agents vont pouvoir produire des comportements collectifs.

### III.5. Interaction dans un SMA

Jacques Ferber définit l'interaction comme «un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles » [Ferber, 95].

D'après cette définition la classification des situations d'interaction se fait selon plusieurs critères :

- la présence d'objectifs communs ou compatibles.
- l'accès à des ressources communes.
- la répartition des compétences au sein des agents.

Les interactions peuvent être directes par l'intermédiaire des communications, comme elles peuvent être indirectes via l'action et la perception de l'environnement. Les interactions peuvent être mises en œuvre dans un but de :

- coopération entre les agents, lorsqu'ils ont des buts communs,
- coordination, c'est à dire d'organisation pour éviter les conflits et tirer le maximum de profit de leurs interactions afin de réaliser leurs buts,
- compétition, lorsque les agents ont des buts antagonistes

Un système multi-agents se distingue, donc, par une collection d'agents indépendants qui interagissent en vue de réaliser conjointement une tâche ou pour atteindre conjointement un but particulier.

### III.6. Avantage des SMA

L'utilisation des systèmes multi agents (SMA) est quelques fois obligatoire. Quand on se retrouve face à des problèmes qui imposent un tel choix. Cependant, nous pouvons choisir d'utiliser des SMA pour les avantages suivants [Drougoul, 95] :

- Les SMA reflètent la réalité : la majorité des problèmes sont distribués.

- Diversité : La possibilité aux concepteurs d'intégrer différents agents (réactifs, cognitifs ...etc.)
- Coopération : Les systèmes entre eux peuvent coopérer pour la résolution des problèmes plus complexes.

L'utilisation des SMA se retrouve dans nombreux domaines d'application, selon leur utilité et leur intérêt.

### III.7. Domaines d'application des SMA

Les applications des systèmes multi-agents couvrent de plus en plus de domaines.

Citons les systèmes d'information coopératifs, la simulation sociologique, les outils documentaires adaptés au Web, les robots autonomes coopératifs, jeux vidéo (multi-joueurs), résolution distribuée de problèmes, etc.

Néanmoins les systèmes multi-agents développés actuellement peuvent être classés en trois catégories-agents :

1. La simulation dont l'objectif est la modélisation de phénomènes du monde réel, afin d'observer, de comprendre et d'expliquer leur comportement et leur évolution. Ce sont par exemple, des applications de simulation de phénomènes sociaux, environnementaux, éthologiques, etc.
2. Les applications dans lesquelles les agents dits assistants jouent le rôle d'êtres humains. La notion d'agent simplifie la conception de ces systèmes et amène de nouvelles problématiques centrées utilisateur telles que la communication, la sécurité, etc.
3. La résolution de problèmes. Il s'agit de concevoir des systèmes artificiels capables de résoudre des problèmes distribués, par la mise en œuvre au sein d'un ensemble d'agents permettant l'accomplissement collectif d'une tâche. [Moujahed, 07]



## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le concept d'agent comme étant un système informatique situé dans un environnement. Il est caractérisé par son autonomie et sa flexibilité.

Nous avons constaté que le choix d'une architecture d'agent (réactive, cognitive et hybride), dépend de la complexité du problème et du domaine d'application.

Ensuite, nous avons introduit la notion du système multi-agents. Ces systèmes sont composés d'entités autonomes dont les compétences, les connaissances (sur les autres agents et sur leur environnement), et les ressources sont limitées (voire inexistantes) et qui interagissent pour résoudre différents problèmes.


Dans ce travail nous nous intéressons aux agents ayant des comportements simples, l'interaction entre ces entités fait apparaître un comportement global qualifié d'intelligent. Nous prenons donc en considération des systèmes réactifs, tout en se basant, sur leurs fiabilités, leurs flexibilités et leur simple mise en œuvre.

A travers le chapitre suivant, nous allons présenter des notions importantes liées au système multi agents réactifs.

---

## Chapitre 2

---



**Adaptation et auto-organisation  
dans les systèmes multi-agents**

---

## Chapitre II : Adaptation et auto-organisation dans les systèmes multi-agents

### Introduction

Les environnements, auxquels les systèmes multi-agents (SMA) appartiennent, sont de plus en plus complexes et dynamiques. Ceci rend difficile la définition des fonctions de ces systèmes, quant à leurs spécifications, elles restent souvent incomplète, ces systèmes doivent alors adopter un comportement adéquat pour mieux faire face à ces changements.

L'ensemble de comportements individuels ainsi que l'interaction entre les parties constitutives des SMA, font l'apparition de nouvelles fonctionnalités au sein de collectifs ce qui permet au système de changer son comportement et donc de s'adapter à son environnement.

Nous décrivons dans ce chapitre des définitions importantes qui facilitent la description de notre cadre de travail. Tout d'abord, nous présenterons les concepts d'auto-organisation et d'émergence, par la suite, nous évoquerons la théorie des AMAS et, finalement, nous introduisons un concept fondamental qui est l'intelligence collective.

### I. Auto-organisation

#### I.1. Organisation

##### I.1.1. Définition

Pour établir plus clairement ce qu'est une organisation, nous proposons la définition utilisée par *Morin* pour les systèmes multi-agents :

« Une **organisation** peut être définie comme un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou événements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. Elle assure solidarité et solidité relative, donc assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires. » [Morin, 77].

D'après cette définition l'auteur insiste sur la dualité entre l'aspect statique et l'aspect dynamique de l'organisation, il souligne que « les organisations constituent à la fois le support et la manière dont se passent les interrelations entre les agents, c'est-à-dire dont sont réparties les tâches, les informations, les ressources, et la coordination d'actions. De plus, et c'est ce qui rend ce terme si difficile à cerner, l'organisation est à la fois le processus d'élaboration d'une structure et le résultat même de ce processus. » .

Dans un système multi-agent, l'organisation permet aux agents de savoir quels sont leurs partenaires et quels rôles ils jouent de façon à répondre à un objectif donné. C'est un arrangement des agents et de leurs comportements conditionné par les contraintes imposées par l'environnement [Gechter, 03].

### I.1.2. Caractéristiques générales des organisations

Les organisations ont quelques caractéristiques générales [Carley et al., 99] :

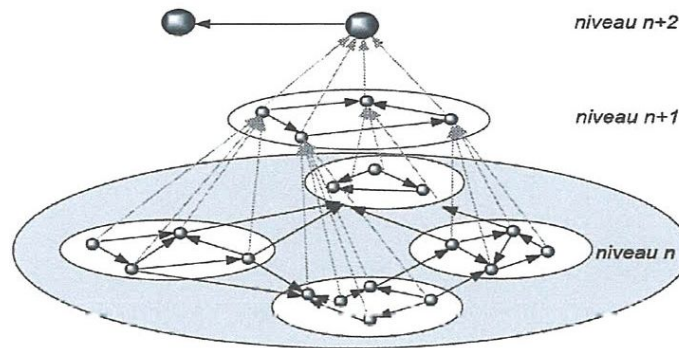
- Elles s'attachent aux techniques de résolution de problème à grande échelle.
- Elles mettent en cause plusieurs agents, qu'ils soient humains ou artificiels.
- Elles sont généralement engagées dans une ou plusieurs tâches et donc dirigées par des buts (qui peuvent néanmoins changer ou ne pas concerner tous les membres de l'organisation).
- Elles sont capables d'affecter et d'être affectées par leur environnement.
- Elles disposent d'une culture comprenant des connaissances et possèdent des capacités distinctes des agents eux-mêmes.
- Elles ont un statut distinct de celui des agents.

### I.1.3. Niveaux d'organisation

L'intérêt de la notion d'organisation est de pouvoir intégrer à la fois la notion d'agent et celle de système multi-agent. En effet, du point de vue du concepteur, un agent est non seulement un individu mais aussi un assemblage de composants. De même, un système multi-agent peut être considéré à la fois comme une composition d'agents et comme une unité.

La notion de niveau d'organisation permet de comprendre l'emboîtement d'un niveau dans un autre. Dans les SMA, on pourra considérer qu'une organisation est une agrégation

d'éléments de niveau inférieur, et un composant d'organisations de niveau supérieur. Les agents de niveau  $n$  sont regroupés en organisations qui, au niveau  $n + 1$  peuvent être considérées comme des entités individuelles. Inversement, des entités individuelles de niveau  $n + 1$  peuvent être vues comme des organisations de niveau  $n$ . Le processus peut se répéter sur un nombre quelconque de niveaux. La figure ci-dessous montre les niveaux d'organisation



*Figure 2.1 : Niveaux d'organisation [Ferber, 95]*

On distinguera enfin les organisations (ou entités) individuelles qui sont considérées de l'extérieur comme des êtres individués (c'est-à-dire comme des agents), et les organisations (ou entités) collectives qui sont composées d'un ensemble d'êtres individués, sans qu'elles soient nécessairement individuées elles aussi. [Ferber, 95]

Un SMA peut changer son organisation pour qu'il puisse s'adapter dynamiquement avec son environnement : c'est l'auto-organisation

## I.2. Auto-organisation

L'auto-organisation est un phénomène qui a été décrit dans plusieurs disciplines, notamment en physique et en biologie

### I.2.1. Définition

Plusieurs définitions existent dans la littérature, parmi lesquelles nous citons:

« L'auto-organisation est la faculté d'un système à se réorganiser de manière autonome, elle permet au système de s'adapter de manière autonome aux conditions changeantes du milieu. » [Glizes, 04].

Une autre définition a été donnée par [Dewolf et al., 04]:

«Self-organization is a dynamical and adaptive process where systems acquire and maintain structure themselves, without external control. ».

L'auto-organisation est alors un processus dynamique et adaptatif à travers lequel les systèmes peuvent acquérir et maintenir une structure sans contrôle externe.

Le préfixe « auto » accentue sur le fait qu'il peut paraître des phénomènes collectifs dans un ensemble d'entités interagissant entre eux, sans la nécessité ni d'un chef, ni d'une préparation initiale non homogène, ni de conditions extérieures déviant les interactions ou la dynamique individuelle.

Une des forces des systèmes auto-organiseurs est le couplage par interactions : le système perçoit son environnement et est capable d'agir sur lui. C'est par ce jeu d'interactions entre le système et l'environnement que l'auto-organisation sera possible.

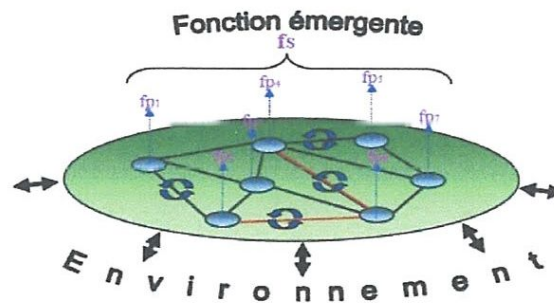


Figure 2.2 : l'adaptation par auto-organisation

### I.2.2. Conditions d'apparitions et propriétés de l'auto-organisation

L'auto-organisation n'est possible que sous certaines conditions [Daures, 06] :

- *autonomia* : le système ne doit pas être contrôlé par une entité extérieure au système.
- *parties interagissantes* : les composants du système doivent interagir puisque ce sont les interactions qui définissent l'organisation.

L'auto-organisation possède certaines propriétés [Daures, 06]:

niveau (level) se rapporte au point de vue. Le niveau macro considère le système dans son intégralité tandis que le niveau micro considère le système du point de vue des différentes entités qui le composent. [Moujahed, 07].

## II.2. Propriétés de l'émergence

L'émergence possède les propriétés suivantes [Daures, 06] :

- *dynamisme* : le comportement émergent peut changer en fonction de l'environnement ou s'auto-maintenir.
- *robustesse* : un agent défaillant ne doit pas empêcher un comportement d'émerger.
- *lien bidirectionnel* : l'émergence implique un lien bidirectionnel entre le micro et le macro-niveau. Le micro-niveau, donc les agents et leurs interactions, crée l'émergence au macro-niveau qui, en retour, influence les agents du micro-niveau.

## II.3. Conditions d'apparitions de l'émergence

L'émergence n'apparaît que sous certaines conditions [Daures, 06] :

- *micro et macro-niveau* : le système doit posséder au moins deux niveaux qu'on appelle micro-niveau et macro-niveau. Le micro-niveau est défini par les agents du système alors que le macro-niveau est le système lui-même. Ce sont les agents et leurs interactions au micro-niveau qui causent l'émergence au macro-niveau.
- *nouveauté radicale* : un comportement n'est émergent que s'il est radicalement nouveau, c'est-à-dire que ce comportement n'était pas prévu à l'avance et donc pas codé dans les agents du système.
- *irréductibilité* : la fonction émergente du système multi-agent ne peut être réduite aux fonctions des agents composant le système.
- *parties interagissantes* : l'émergence n'a lieu que si les parties du système interagissent entre elles. La combinaison des fonctions de chaque agent du système ne suffit pas pour créer une fonction qui émerge du système.
- *cohérence* : le système multi-agent doit se comporter comme un tout. Les agents le composant doivent, pour cela, interagir les uns avec les autres, se coordonner et coopérer.

- *contrôle décentralisé* : aucun contrôle sur le système ne doit être exercé par une entité extérieure au système. Cependant, il reste possible de contrôler les agents du système de manière à influencer le comportement émergent.

#### II.4. Auto-organisation et émergence

L'émergence et l'auto-organisation soulignent des caractéristiques différentes du comportement d'un système. Les deux phénomènes peuvent exister séparément comme ils peuvent coexister dans un système dynamique. En effet, alors que l'émergence est un concept utilisé pour qualifier le résultat d'un processus dont les propriétés ne semblent pas réductibles à la simple somme des composants qui l'ont généré, l'auto-organisation fait référence à une certaine catégorie de processus, de mécanismes, qui permettent d'obtenir à un niveau global des propriétés émergentes. On pourrait donc résumer la différence entre ces deux concepts de la manière suivante: **l'émergence caractérise un phénomène** alors que **l'auto-organisation est un mécanisme** qui donne lieu à **certains phénomènes émergents**.

#### II.5. Emergence dans un SMA

Dans le domaine des systèmes multi-agents, il semble essentiel de donner une définition positive, temporelle et constructive de l'émergence

Un phénomène est dit émergent si:

- Il y a un ensemble d'agents en interaction entre eux et via l'environnement dont la dynamique n'est pas exprimée dans les termes du phénomène émergent à produire mais dans un vocabulaire ou une théorie D;
- La dynamique des agents en interaction produit un phénomène global qui peut être une structure stable, une trace d'exécution ou n'importe quel invariant statique ou dynamique;
- Ce phénomène global est observé soit par un observateur extérieur, soit par les agents eux-mêmes en des termes distincts de la dynamique sous-jacente, c'est à dire, avec un autre vocabulaire ou théorie D'.

L'importance de l'émergence dans le cadre de l'utilisation de SMA pour le contrôle de systèmes complexes est double. D'une part, cette émergence peut apparaître au sein des systèmes à contrôler, produisant ainsi des comportements complexes que les méthodes de



contrôle classiques isolées au niveau local ne permettent pas de gérer. L'émergence implique, dans ce cas, d'être en mesure de fournir un outil de contrôle capable de s'adapter aux changements de dynamique du système provoqués par les phénomènes émergents. D'autre part, l'émergence peut intervenir au sein même du SMA développé, en particulier, lorsque celui-ci est auto-organisé. [Videau, 11]

## II.6. Rôle de l'observateur

Un *utilisateur* du SMA peut avoir le double rôle d'observer le système pour identifier et classer les formes émergentes, et d'agir sur le SMA pour orienter l'émergence. En réalité, le phénomène global identifié par un observateur possède un sens pour lui, et peut correspondre à des états intéressants, à des solutions recherchées. En tant qu'utilisateur, il cherche à assurer un résultat émergent. Pour y parvenir, une analyse est nécessaire : explorer les états en faisant varier la source d'imprévisibilité, et classifier les résultats en observant leurs régularités [Klein, 09].

Un SMA exploite le principe d'auto-organisation afin de fournir une fonctionnalité adaptée à l'environnement dans lequel il est plongé, on parle alors des Systèmes Multi-Agents Adaptatifs (AMAS).

## III. Systèmes Multi-Agents Adaptatifs (ou AMAS)

L'équipe SMAC (Systèmes Multi-Agents et Comportements) a développé cette théorie pour des Systèmes Multi-Agents destinés à être immergés dans des environnements à forte évolutivité (comme un écosystème). De tels environnements voient apparaître de nouvelles composantes ou disparaître des composantes existantes contrairement à des environnements clos ou à faible évolutivité, où les composantes changent rarement.

Le but de la théorie Adaptive Multi-Agent Systems (AMAS) est de permettre à un système, utilisant des critères de réorganisation locale au niveau de ses entités, d'atteindre l'adéquation fonctionnelle. Par « adéquation fonctionnelle », nous nous référons au comportement global du système qui doit être adapté à la tâche courante. Pour vérifier cette adéquation, le comportement doit être jugé par un observateur extérieur au système qui connaît sa finalité.

### III.1. Présentation de la théorie

Un système multi-agent adaptatif est un système multi-agent qui est capable de changer son comportement en cours de fonctionnement pour l'ajuster dans un environnement dynamique, soit pour réaliser la tâche pour laquelle il a été conçu, soit pour améliorer sa fonction ou ses performances. Cela signifie que les agents du système vont évoluer vers une bonne répartition des tâches à effectuer, en fonction de leurs compétences propres afin que ce système soit fonctionnellement adéquat.

La particularité de la théorie des AMAS réside dans le fait que l'on ne code pas le moyen d'atteindre la fonction globale au sein d'un agent. Grâce à la capacité des agents à s'auto-organiser, le système est capable de s'adapter par lui-même et réalise une fonction qui n'est pas codée dans l'agent. Cette fonction émerge et ceci est dû, en partie, aux interactions entre composants. Si l'organisation entre les agents change, la fonction qui est réalisée par la collectivité change aussi.

L'une des questions principales liées à l'émergence et aux SMA est de déterminer comment concevoir le niveau local du système (les agents et leurs interactions par exemple) pour garantir l'obtention d'un comportement émergent particulier au niveau global.

Généralement, la démarche consiste en une élaboration préalable d'un SMA grâce à des considérations heuristiques, suivie d'une phase empirique composée d'une succession de tests et d'adaptations permettant de parvenir à une configuration voulue. Il n'y a pas de vérification formelle possible des propriétés du SMA. Des protocoles expérimentaux permettent toutefois de couvrir largement l'espace des réponses, mais se heurtent à la difficulté de spécifier formellement les comportements émergents. La phase d'élaboration préalable du SMA repose sur des principes d'ingénierie qui cherchent à reproduire des phénomènes naturels connus, en particulier, le biomimétisme et le sociomimétisme [Klein, 09].

## IV. Intelligence collective

### IV.1. Définition

Selon Pierre Levy, l'intelligence collective est « une intelligence partout distribuée, sans cesse valorisée, coordonnée en temps réel, qui aboutit à une « pleine » mobilisation des

compétences. [...] L'intelligence collective réfère à l'intelligence réalisée à différents niveaux collectifs de l'organisation, sinon dans l'organisation toute entière. Il ne s'agit donc pas de la somme des intelligences individuelles. L'intelligence collective, c'est l'intelligence des groupes de travail. ». [Levy, 95]

### IV.2. Caractéristiques de l'intelligence collective

L'intelligence collective a donc les caractéristiques suivantes [Heutte et al., 06] :

- Décentralisation du savoir et des pouvoirs,
- Autonomie des individus valorisés en tant que créateurs de sens,
- Interactivité constante entre les individus et leur environnement (technique, économique, écologique...) dont les modifications sont perçues et contrôlées en temps réel,
- Désagrégation des structures massives au profit d'entités autonomes, petites et conviviales,
- Émergence d'une nouvelle convivialité et d'une nouvelle éthique.

### IV.3. Intelligence collective naturelle

Cette intelligence collective s'observe principalement chez les insectes sociaux (fourmis, termites et abeilles), les animaux se déplaçant en formation (oiseaux migrateurs, bancs de poissons) et, dans une moindre mesure, les mammifères sociaux chassant en meute (loups, hyènes). Les points communs de ces diverses espèces sont exactement ceux qui caractérisent l'intelligence collective :

- Les individus aiment la proximité de leurs semblables et tendent à être grégaires car ils obtiennent un avantage substantiel à chasser, se déplacer ou vivre en groupe

- Ils interagissent de manière locale par le moyen de signaux (grognement, phéromones, attitudes).
- L'individu seul répond instinctivement à certains stimuli. La coordination du groupe est implicite et se fait au travers de règles comportementales très simples au niveau individuel.

**Les fourmis: un modèle naturel de résolution de problèmes distribué :**

Les fourmis comme d'autres insectes sociaux, présentent des particularités qui rendent la vie en collectivité très profitable à l'espèce :

- Un registre comportemental limité.
- Des capacités cognitives pas assez développées pour permettre à un seul individu d'obtenir assez d'informations sur l'état de la collectivité pour garantir une division des tâches efficace, condition nécessaire au bon fonctionnement de la colonie.
- Des facultés de communication avancée par le biais des phéromones, favorisant des interactions multiples.

La colonie dans son ensemble est un système complexe stable et auto-régulé capable de s'adapter très facilement aux variations environnementales les plus imprévisibles, mais aussi et surtout de résoudre des problèmes, sans contrôle externe ou mécanisme de coordination central, de manière totalement distribuée. Les tâches accomplies par la colonie ne sont naturellement pas à la portée d'un individu seul ou d'un groupe identique dénué d'intelligence collective.



*Figure 2.3: Une fourmilière*

La **bio-inspiration** a amené de nombreux chercheurs à s'inspirer de la nature pour développer de nouveaux algorithmes pour la résolution de certains problèmes.

#### IV.4. Intelligence collective artificielle

L'intelligence collective désigne les capacités cognitives d'une communauté résultant des interactions multiples entre les membres (ou agents) de la communauté. Des agents, au comportement très simple, peuvent ainsi accomplir des tâches complexes grâce à un mécanisme fondamental appelé synergie. Sous certaines conditions particulières, la synergie créée, par la collaboration entre individus, fait émerger des possibilités de représentation, de création et d'apprentissage supérieures à celles des individus isolés.

Les formes d'intelligence collective sont très diverses selon les types de communauté et les membres qu'elles réunissent. Les systèmes collectifs sont, en effet, plus ou moins sophistiqués. Les sociétés humaines en particulier n'obéissent pas à des règles aussi mécaniques que d'autres systèmes naturels, par exemple du monde animal. Pour des systèmes simples les principales caractéristiques sont :

1. *L'information locale* : Chaque individu ne possède qu'une connaissance partielle de l'environnement et n'a pas conscience de la totalité des éléments qui influencent le groupe,
2. *L'ensemble de règles* : Chaque individu obéit à un ensemble restreint de règles simples par rapport au comportement du système global,
3. *Les interactions multiples* : Chaque individu est en relation avec un ou plusieurs autres individus du groupe,
4. *La collectivité* : les individus trouvent un bénéfice à collaborer (parfois instinctivement) et leur performance est meilleure que s'ils avaient été seuls.

#### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques concepts importants liés aux systèmes multi-agents qui sont « l'auto-organisation, l'émergence, l'AMAS et l'intelligence collective ».

L'auto-organisation permet au système multi-agent de modifier son comportement en modifiant lui-même l'organisation de ses agents, l'interaction entre ces entités fait apparaître un nouveau phénomène imprévisible qui est l'émergence.

La théorie des AMAS permet de concevoir des systèmes dont la fonction globale émerge à partir d'un processus d'auto-organisation de ses parties.

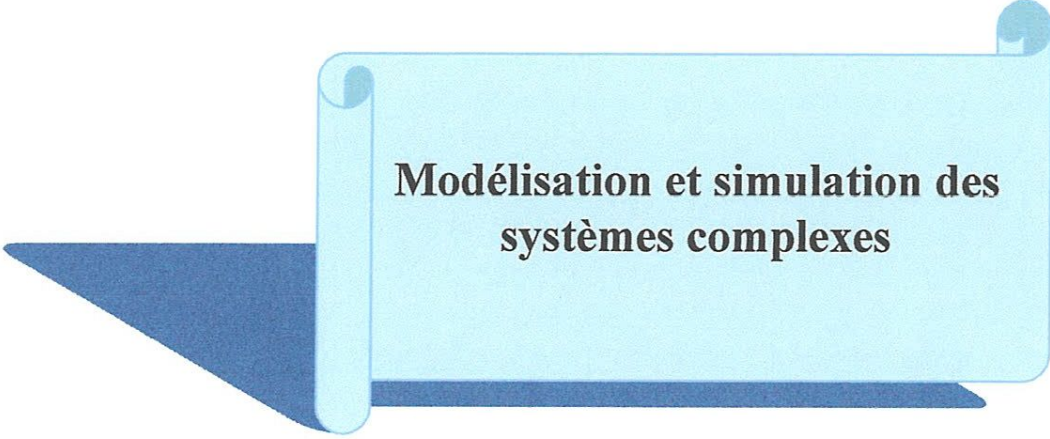
L'intelligence collective reste le point commun entre l'émergence et SMA

Dans le chapitre qui suit, nous allons décrire les systèmes complexes, par la suite nous décrivons le problème de la segmentation d'image comme un exemple

---

## Chapitre 3

---



**Modélisation et simulation des  
systèmes complexes**

---

# Chapitre III : Modélisation et simulation des systèmes complexes

## Introduction

De nombreux systèmes qualifiés comme complexes nécessitent dans leurs résolutions des méthodes spécifiques qui diffèrent d'un domaine à un autre. Lorsque les méthodes classiques semblent incapables à la résolution de ces systèmes, la modélisation et la simulation apparaît donc comme une voie prometteuse pour la résolution de ces systèmes.

Dans ce chapitre, nous décrivons la notion des systèmes complexes, leurs caractéristiques et leurs méthodes de résolution. Nous présentons ensuite la modélisation et la simulation de ces systèmes. Nous terminons ce chapitre, avec un exemple d'un problème de traitement d'image « segmentation d'image » présenté comme problème complexe.

## I. Systèmes complexes

### I.1. Définition d'un système complexe

Il n'existe pas de définition précise largement acceptée de ce qu'est un système complexe :

« Un système complexe est une sous-partie du monde réel composée d'éléments en interactions, qui fait l'objet de modélisation et de simulation à des fins de compréhension du monde réel, la complexité pouvant provenir du nombre important de parties du système qui interagissent d'une manière non simple, et conduisant à de l'imprévisibilité possible, de l'émergence du nouveau et du sens plausible » [Ralambondralny, 09] .

Une certaine confusion peut apparaître dans le langage courant entre complexe et compliqué. Compliqué signifie qu'il est difficile de comprendre l'objet d'étude, alors que complexe signifie qu'il y a beaucoup d'intrications, que « tout est lié » et que l'on ne peut étudier une petite partie du système de façon isolée. Les systèmes complexes sont généralement compliqués, mais le contraire n'est pas toujours vrai [Rouquier , 08]



## I.2. Caractéristique :

Un système est complexe s'il a les caractéristiques suivantes [Rouquier , 08] :

- Il est composé d'un grand nombre fini d'entités.
- Un comportement global structuré émerge.
- Les interactions sont locales, de même que la plupart des informations, il y a peu ou pas d'organisation centrale.
- Le graphe d'interaction est non trivial : ce n'est pas simplement tout le monde qui interagit avec tout le monde (il y a au moins des liens favorisés).
- Il y a des boucles de rétroaction (feedback) : l'état d'une entité a une influence sur l'état d'autres entités, qui en retour ont une influence sur la première.

## I.3. Comportement

Un système complexe il présente la plupart des comportements suivants [Rouquier , 08] :

- Il y a auto-organisation et émergence de propriétés ou de structures cohérentes, apparition de motifs. Le système a donc une mémoire de son évolution, son état influence les états futurs.
- si un élément est affecté par un événement extérieur, ses voisins le seront aussi.
- la connaissance d'une partie du système ne permet pas d'affirmer que le reste du système.
- Plusieurs comportements possibles sont en compétition, certains sont simples, d'autres chaotiques (désordonnés).

La résolution des systèmes complexes nécessite des modèles et des méthodes spécifiques aux problèmes.

## I.4. Méthodes de résolution des systèmes complexes :

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des systèmes complexes nous pouvons citer .

### a) Méthode mathématique

La description formelle des systèmes est généralement exprimée sous forme mathématique. La mise en œuvre d'outils mathématique pour la modélisation ou l'analyse de systèmes complexes permet de prévoir leur fonctionnement, leur évolution afin de les résoudre.

Si le nombre de paramètres de ces systèmes augmente la modélisation et la résolution mathématique devient très difficile voir impossible.

#### **b) Méthode par construction**

Le plus connu c'est l'algorithme gloutons (greedy algorithms en anglais) c'est un algorithme pour lequel, à chaque itération, on fixe la valeur d'une (ou plusieurs) variable(s) décrivant le problème sans remettre en cause les choix antérieurs.

Le principe est donc de partir d'une solution incomplète (éventuellement totalement indéterminée) que l'on complète de proche en proche en effectuant des choix définitifs : à chaque étape, on traite une partie des variables sur lesquelles on ne revient plus. Mais il existe des problèmes pour lesquels une petite augmentation de la quantité de données à traiter mène rapidement du problème hors des capacités des machines, tant le nombre de possibilités devient important.

#### **c) Méthode de recherche locale**

Le principe des méthodes de recherche locale (ou méthodes d'amélioration itérative) est inspirée des méthodes d'optimisation continue. Ces méthodes consistent à déterminer itérativement la solution d'une fonction continue en utilisant des outils comme les dérivées partielles ou les gradients, suivant que la fonction soit ou non dérivable.

La construction essentielle de ces méthodes repose en effet sur la détermination d'un bon voisinage. Ensuite, suivant la façon de choisir une solution dans le voisinage, on obtient différentes méthodes de recherche locale : méthode tabou, descente pure, descente stochastique, recuit simulé. Le problème de ces méthodes c'est qu'elles tombent parfois dans un minimum local.

#### **d) Méthode évolutives**

Les méthodes évolutives dites aussi à base de population, basées sur le principe du processus d'évolution naturelle. Elles considèrent un ensemble de solutions, appelé population. Ils font évoluer une population de solutions à chaque étape de processus de recherche.

Parmi les méthodes de cette catégorie, on peut citer les algorithmes évolutionnaires, les algorithmes génétiques, les algorithmes des essaims de particules, les automates cellulaires, les algorithmes de colonies de fourmis qui s'inspirent des comportements des fourmis observés dans la nature notamment l'utilisation de la communication indirecte (à travers l'environnement), les traces de phéromone que les fourmis laissent sur leur passage, et la construction itérative d'une solution globale qui se base sur une sorte d'intelligence collective.

Cet algorithme est composé de trois éléments essentiels :

- 1) une population constituée de plusieurs individus représentant des solutions potentielles (configurations) du problème donné.
- 2) un mécanisme d'évaluation de l'adaptation de chaque individu de la population à l'égard de son environnement extérieur
- 3) un mécanisme d'évolution de comportement et d'environnement.

Une étape primordiale de la résolution des systèmes complexes est sa modélisation

## II. Modélisation des systèmes complexes

L'activité de modélisation consiste à créer une représentation simplifiée (appelée modèle) d'un phénomène pour pouvoir l'étudier, nous commençons par sa définition

### II.1. Définition d'un modèle :

Nous donnons quelques définitions de « modèle » citées dans la littérature :

« Pour un observateur B, un objet  $A^*$  est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser  $A^*$  pour répondre aux questions qui l'intéressent à propos de A » [Minsky, 65].

« Un modèle est une approximation, une vue partielle plus ou moins abstraite de la réalité afin d'appréhender plus simplement, selon un point de vue et il est établi pour un objectif donné » [Ferrier, 03].

D'après les définitions précédentes un modèle est donc une abstraction qui permet de répondre à des questions sur l'objet réel, un modèle est toujours subjective puisqu'il est établi en fonction des objectifs, du jugement, de la nature et de la qualité des informations dont dispose le concepteur.

### II.2. Objectif de la modélisation

La modélisation vise deux objectifs majeurs:

- *Tester une entité physique avant de la construire*: la construction de mondes artificiels, nous permet de mieux comprendre le monde réel.
- *Réduire la complexité*: la principale raison sans doute de la modélisation, est sa possibilité d'appréhender des systèmes qui seraient trop complexes à comprendre directement. Les modèles réduisent la complexité dans la mesure où ils isolent un petit nombre d'objets importants à examiner à la fois.

### II.3. Types de modèles

Trois types de modèles sont définis dans [Ralambondrainy, 09] qui sont :

- *Modèle du domaine* : Modèle réalisé à partir du monde réel, contenant les connaissances des spécialistes de la partie du monde réel considérée.
- *Modèle informatique* : Modèle correspondant à l'implémentation informatique du modèle du domaine.
- *Modèle simulé* : Modèle qui est une instance du modèle informatique initialisée avec des paramètres définis et qui peut évoluer au cours d'un temps virtuel.

### II.4. Modélisation orientée agents

Les modèles individus centrés, ou *Individual Based Models*, s'intéressent à l'étude des interactions entre entités élémentaires et de leurs organisations. Ces modèles reposent sur une approche de modélisation qui est largement reprise dans la communauté des systèmes multi-agents. La modélisation orientée agents, ou *Agent Based Modeling*, s'intéresse à la représentation des comportements des entités du système et de leurs interactions. L'utilisation des systèmes multi-agents pour modéliser les systèmes dynamiques complexes conduit à des modèles plus réalistes [Parunak, 96].

Du fait de l'existence de propriétés émergentes dans les systèmes complexes, la simulation apparaît être un nécessaire complément à la modélisation pour l'étude de ces systèmes.

## III. Simulation des systèmes complexes

### III.1. Définition

« On nomme simulation la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée **modèle**, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues » [Drogoul, 93].

### III.2. Objectifs de la simulation

La simulation est intéressante surtout pour des problèmes complexes, qui sont difficilement abordables par l'expérimentation. Elle est souvent utilisée pour reproduire des tests, et de cette façon elle peut contribuer à leur compréhension. Elle peut étendre les champs de ces tests sur le système à étudier et elle permet d'en modifier les paramètres caractéristiques pour comparer plusieurs cas similaires.

Les objectifs des études qui reposent sur la simulation sont :

- la compréhension de la structure et des rapports à l'intérieur d'un système.
- l'analyse et la prédiction du comportement du système.
- la conception et le dimensionnement de l'équipement.
- l'aide et le remplacement de l'expérimentation.
- la validation des systèmes de contrôle.

### III.3. Etape de simulation

La démarche de simulation passe donc par trois étapes distinctes:

- l'étape de modélisation : qui consiste à construire le modèle du phénomène à étudier,
- l'étape d'expérimentation, qui consiste à soumettre ce modèle à un certain type de variations,
- l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité.

Cette démarche est illustrée par la figure suivante

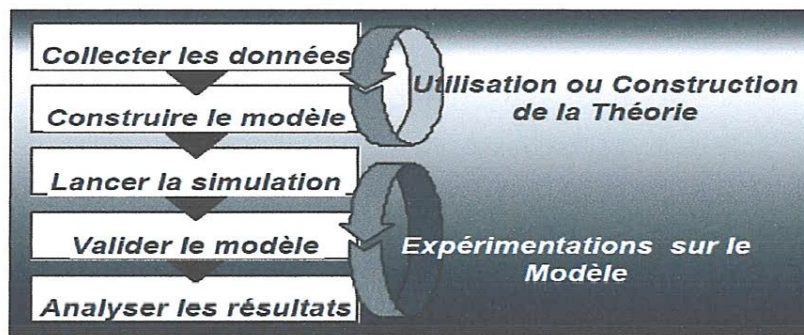


Figure3.1 : Principe de la simulation

L'apport essentiel de la simulation réside donc dans une expérimentation d'un modèle théorique lorsque l'exploration du processus modélisé par des expériences de terrain s'avère impossible pour des raisons techniques, financière, déontologique.

#### **III.4. Simulation orientée agents**

Les propriétés des systèmes multi-agents favorisent la conduite de simulations basées sur des entités autonomes afin d'appréhender le fonctionnement complexe du système réel modélisé. Ce type de simulation s'intéresse à la description et à l'étude comportementale du système réel par l'exécution des agents en interactions, et ce, dans un contexte dynamique. Les simulations orientées agents sont constitués d'un ensemble d'entités autonomes, les agents, dont les comportements dépendent de leurs interactions et de l'environnement au sein duquel ils sont situés. Ces modèles représentent les actions individuelles des agents, les interactions entre les agents ainsi que les conséquences de ces interactions sur l'environnement [Labarthe, 06].

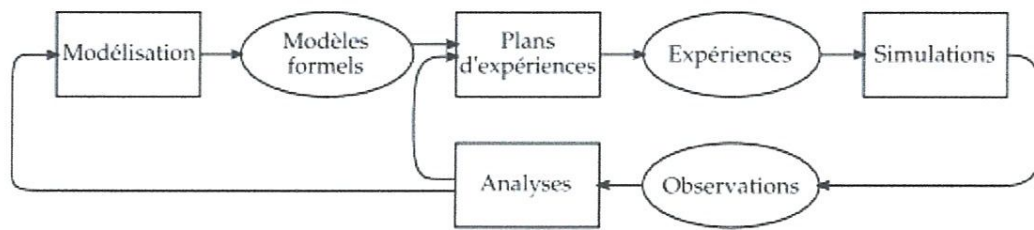
### **IV. Mise en place d'un modèle de simulation**

La mise en place d'un modèle de simulation passe par trois phases essentielles [Julien, 11] qui sont:

#### **a. Activité de modélisation**

L'activité de modélisation et de simulation dans son ensemble consiste donc tout d'abord à concevoir un modèle. Ensuite il est nécessaire de simuler ce dernier pour obtenir des résultats. Enfin, ces résultats doivent être vérifiés afin de savoir s'ils peuvent s'appliquer au système étudié. Si tel est le cas, alors le modèle est valide et représente le comportement du système étudié sous certaines conditions énoncées par le cadre expérimental. Il est alors possible d'utiliser le modèle pour comprendre, prédire ou mettre au point des méthodes qui permettent de contrôler le système réel étudié en faisant de nouvelles expériences en simulation.

Si le modèle n'est pas valide alors, il est nécessaire de le modifier et de recommencer ce processus jusqu'à l'obtention d'un modèle valide. Le schéma emprunté à [Quesnel, 06] et présenté par la figure résume ce processus



*Figure 3.2 : L'activité de modélisation et de simulation*

### b. Paradigme

Le paradigme est le point de vue qui va diriger la conception du modèle. C'est en quelque sorte la vision scientifique à laquelle adhère le modélisateur et qui va lui permettre d'exécuter sa tâche.

Il existe plusieurs paradigmes, on peut citer notamment

- Le paradigme *systemique* dans lequel tout objet ou phénomène étudié est vu comme une entité appelée système : entité qui possède une frontière, une dynamique interne et un ensemble deux entrants et sortants.
- Le paradigme des *systèmes multi-agents*, dans lequel le monde peut être décrit comme un ensemble d'entités autonomes (appelées les agents) situées au sein d'un ou plusieurs environnements et qui interagissent entre elles, au travers et avec leur environnement.

### c. Formalisme

Pour donner corps au modèle, il est nécessaire de le décrire d'une manière formelle. Le langage formel particulier qui permet cette description est appelé formalisme. Pour un paradigme donné, il peut exister plusieurs formalismes. Généralement, ceux-ci sont classifiés selon plusieurs critères : la représentation et la gestion du temps, la représentation de l'espace et des objets modélisés.

## V. Modélisation et simulation orienté agent

Ce type de modélisation est plus souvent abrégé par ABMS (Agent Based Models and Simulation). Ce modèle a été bien détaillé par [Forbor, 99]

- Modéliser et simuler un phénomène naturel, économique, social, ou “éco-socio-naturel”
- Créer un monde artificiel composé d'agents en interaction
- Chaque agent est décrit comme une entité autonome

- Le comportement des agents est la conséquence de leurs observations, de leurs tendances internes, de leurs représentations (éventuellement) et de leurs interactions avec l'environnement et les autres agents (communications, stimuli, action directe, etc..)
- Les agents agissent et modifient l'état de leur environnement par leurs actions
- On observe les résultats de leurs interactions comme si l'on était dans un laboratoire (notion de laboratoire virtuel)
- Simuler: reproduire un phénomène afin de :
  - Tester des hypothèses permettant d'expliquer le phénomène
  - Prévoir l'évolution du phénomène

## VI. Traitement d'image comme problème complexe

Le traitement d'image est une science qui vise à traiter et à analyser les images numériques par un ensemble de techniques et méthodes, afin d'en tirer des informations qui pourront être utilisées pour répondre à des questions importantes et à régler des problèmes liés à un domaine bien précis.

On peut résumer le traitement d'image en quatre étapes principales :

1. Acquisition des images : Mise en œuvre des processus physiques de formation des images suivis d'une mise en forme pour que ces images puissent être traitées par des systèmes informatiques.
2. Traitement des images : Son but est d'améliorer ces images lorsqu'elles possèdent du bruit ou des défauts.
3. Segmentation des images : Son but est de construire une image symbolique en générant des régions homogènes selon un critère défini a priori.
4. Analyse des images : Consiste à extraire des paramètres ou des fonctions représentatives de l'image ou des régions.

### V.1. Présentation du problème « segmentation d'image »

La segmentation est un vaste sujet d'étude qui fait partie des grands thèmes de l'imagerie numérique. Elle consiste à partitionner l'image en un ensemble de régions homogènes, pour pouvoir y appliquer un traitement spécifique et interpréter le contenu de l'image.



Il est difficile de définir de manière absolue, une bonne segmentation, il y a toujours des difficultés à cause de la complexité des images naturelles et de la définition du niveau de précision du résultat. Un bon résultat de segmentation ne permet pas forcément une bonne interprétation. Une bonne méthode de segmentation sera donc celle qui permettra d'arriver à une bonne interprétation.

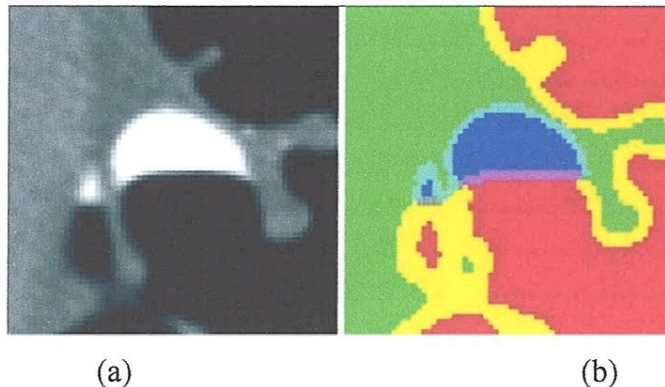
De plus, il est difficile de dire si une méthode de segmentation est meilleure qu'une autre dans un contexte donné, le choix d'une technique est lié à :

- La nature de l'image (éclairage, contours, texture...)
- Aux opérations en aval de la segmentation (compression, reconnaissance des formes, mesures...)
- Aux primitives à extraire (droites, régions, textures,...)
- Aux contraintes d'exploitation (temps réel, espace mémoire, ...)

Plusieurs techniques de segmentation existent, deux grandes catégories de segmentation peuvent se distinguer : la segmentation par régions et la segmentation par contours.

### V.1.1. Segmentation par région

Les approches régions cherchent à détecter les zones de l'image présentant des caractéristiques d'homogénéité et vérifiant un critère d'homogénéité et de similitude. Parmi les approches régions on retrouve les méthodes de fusion de division, ligne de partage des eaux, et d'autres méthodes.

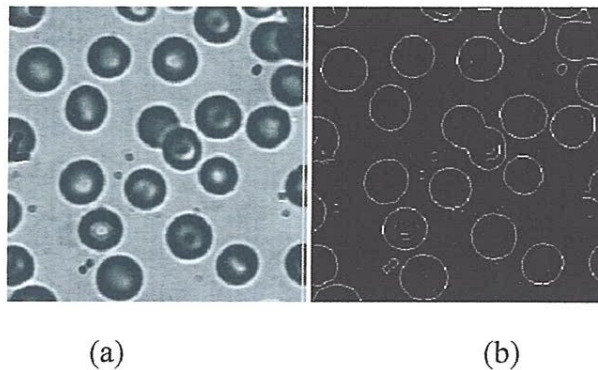


**Figure 3.3** : Segmentation par région : (a) Image originale, (b) Image segmenté

### V.1.2 Segmentation par contour

La détection des contours dans une image est un problème très étudié dans le domaine du traitement et de l'analyse de l'image. Ce sont les premiers modèles de segmentation, ils s'appuient sur des détections de changement rapide d'intensité lumineuse ou de couleur, c'est-à-dire les contours de l'image ou les frontières entre régions.

De façon générale, un contour est défini comme le lieu de variation significative de l'information. Par conséquent, trouver les contours dans une image revient à évaluer la variation de couleur dans de l'image



*Figure 3.4 : Illustration de la détection de contours. (a) Image originale, (b) Détection des contours.*

### V.2. Méthode de segmentation de contour

Un nombre important de méthodes a été développé. Ces méthodes s'appuient sur la détection des discontinuités dans l'image. Dans ce qui suit quelques méthodes seront exposées :

#### a. Méthodes dérivatifs

Les méthodes dérivatives permettent de trouver les contours dans une image d'une manière simple. On peut détecter le point de contour par la détermination du maximum de la norme du gradient (première dérivée) ou bien en étudiant le passage par zéro du Laplacien (deuxième dérivée)

Parmi les opérateurs qui utilisent les méthodes dérivatifs, on trouve les opérateurs de Robert, Sobel, Prewitt, les différentes variantes existantes dont ces opérateurs apportent des améliorations à l'estimation discrète du gradient (dérivée) et à la prise en compte de l'orientation du contour.

Toutefois, ces opérateurs ne donnent souvent pas, à eux seuls, de bons résultats sur une image réelle ou les changements d'intensité sont rarement nets et abrupts. Une opération de seuillage est nécessaire pour éliminer le bruit et affiner les contours à une épaisseur d'un pixel.

#### **b. Morphologie mathématique**

La morphologie mathématique consiste à appliquer sur une image un ou plusieurs opérateurs morphologiques au moyen d'un masque ou motif géométrique prédéfini (carré, rectangle, cercle. . .). Le motif géométrique, appelé élément structurant, est déplacé dans l'image de façon à ce que son centre occupe toutes les positions de l'espace (les pixels). [Meziane, 11]

#### **c. Modèles déformables**

Les modèles déformables ont été largement appliqués pour la segmentation des images médicales. Ils consistent à déformer un modèle géométrique (surface, courbe, . . .) sous l'influence de forces internes issues de la modèle lui-même et de forces externes calculées à partir des données de l'image. On démarre généralement d'un modèle initiale proche du contour recherché et l'évolution se fait à travers un processus itératif qui déforme la courbe à chaque itération jusqu'à ce que le modèle vienne se plaquer sur la structure d'intérêt.

Cependant, la convergence de ce modèle est dépendante du placement initial du contour, et cela peut conduire à une détection des minimums locaux. [Azerradj et al., 07]

Jusqu'à présent, il n'existe pas de méthode universelle de segmentation d'images. Toute technique n'est efficace que pour un type d'image donné, pour un type d'application donné, et dans un contexte informatique donné. Il est donc nécessaire de chercher de nouveau horizon pour trouver de nouvelles méthodes.

### **V.3 Méthodes Bio-inspirés pour la segmentation d'image**

Depuis quelques années, les chercheurs en informatique trouvent dans la de la vie naturelle une source d'inspiration pour la conception de nouveaux systèmes informatiques. De nouvelles méthodes ont été apparues pour la résolution des problèmes complexes. Parmi ces méthodes, on trouve les algorithmes de colonies de fourmis.

En ce qui suit, Nous allons présenter deux algorithmes de colonie de fourmis

**Optimisation par algorithme à base de fourmis (ACO)**

L'optimisation par colonie de fourmis (ACO) est un algorithme d'optimisation inspirée par la nature, qui est motivée par le comportement naturel de recherche de nourriture des espèces de fourmis. Les fourmis déposent de la phéromone pour marquer les chemins entre une source de nourriture et leur colonie, qui devrait être suivie par d'autres membres de la colonie.

Dans un algorithme ACO, les fourmis déplacent dans un espace de recherche « l'image ». Le mouvement des fourmis est probabiliste dicté par les probabilités de transition. La probabilité de transition reflète la probabilité qu'une fourmi se déplace à partir d'un pixel donné à l'autre. Cette probabilité est calculée par la formule suivante :

$$P_{i,j}^{(n)} = \frac{\left(\tau_{i,j}^{(n-1)}\right)^a (\eta_{i,j})^b}{\sum_{j \in \Omega} \left(\tau_{i,j}^{(n-1)}\right)^a (\eta_{i,j})^b} \tag{Equation 1}$$

a et b sont deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste  $\tau_{i,j}^{(n-1)}$  et à l'information heuristique  $\eta_{i,j}$ .

Les valeurs phéromones sont utilisées et mis à jour lors de la recherche de la nourriture. La règle de la mise à jour de phéromone est la suivante :

$$\tau_{i,j}^{(n)} = (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j}^{(n-1)} + \rho \cdot \Delta\tau_{i,j} \tag{Equation 2}$$

Où  $\rho$  est le taux d'évaporation  $0 < \rho < 1$  ( $\rho \in \mathbb{R}$ )

Où  $\Delta_{i,j}^{(k)} = \eta_{i,j}$  si  $i, j$  est un countour et  $\epsilon$  la taboue *Equation 3*

$k$  est la fourmi,  $\rho$  est le taux d'évaporation

**Ant Colony System (ACS)**

L'algorithme Ant Colony System (ACS) à été introduit pour améliorer les performances du premier algorithme. ACS est fondé sur des modifications de l'ACO :

Au niveau de l'algorithme ACS deux mises à jour de phéromone sont effectuées. Une mise à jour locale est effectuée une fois que chaque fourmi a terminé son cycle afin de garder trace de la partition trouvée. A la fin de chaque itération de l'algorithme une mise à jour globale est effectuée mais uniquement par la fourmi qui a obtenu la meilleure partition. Cette mise à jour va permettre le renforcement des choix des classes qui ont contribué à la construction de cette partition.

Règle de mise à jour de phéromone locale :

$$\tau_{i,j}^{(n)} = (1 - \varphi) \cdot \tau_{i,j}^{(n-1)} + \varphi \cdot \tau_0 \quad \text{Equation 4}$$

Où  $\varphi$  est le coefficient de décroissance phéromone, est  $\tau_0$  le la valeur initiale de la phéromone.

Règle de mise à jour de phéromone global :

$$\tau_{i,j}^{(n)} = (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j}^{(n-1)} + \rho \cdot \Delta\tau_{i,j} \quad \text{Equation 2}$$

#### V.4. Travaux connexes

La vie artificielle est un domaine récent pour la segmentation d'image, il existe quelques travaux qui combinent ces deux domaines, et qui offrent une indication prometteuse de découvrir de nouvelles techniques, plus efficace. Dans la suite, nous exposons quelques travaux utilisant l'approche multi-agents pour la segmentation d'images.

[Liu et al., 99] ont présenté un algorithme pour segmentation d'image en niveaux de gris, basé sur le comportement des agents qui se reproduisent dans les zone des domaines d'intérêt.

[Bourjo et al.,03] ont présenté un algorithme basé sur le comportement des araignées pour une segmentation région de l'image. Le principe est de tisser une toile sur l'image en fixant les soies entre pixels.

[Ouedfel , 06] utilise l'algorithme "ACO " comme un outil de modélisation pour concevoir un algorithme de segmentation d'images. Dans cette approche, une colonie de fourmis artificielles recherche une solution globalement optimale. Un algorithme de recherche locale

simple est utilisé dans le but d'améliorer la qualité de la solution trouvée par une des fourmis en rendant la convergence de l'algorithme plus rapide.

[Batrina et al., 10] ont utilisé l'algorithme "ACS" l'un des prolongements principaux du système de fourmi originale comme un algorithme de segmentation d'images. Le mouvement des fourmis est guidé par la variation locale dans les valeurs d'intensité de l'image.

[Jevtic et al., 09] utilise l'algorithme "ACO", pour détecter des contours, et adapter l'algorithme pour différentes images

La méthode exige un ensemble d'images originales. Le résultat est un ensemble de matrices de phéromone qui sont sommés pour produire l'image de sortie.

### Conclusion

Ce chapitre a été riche en notions. Nous avons présenté tout d'abord les systèmes complexes ainsi que leurs méthodes de résolution. Ensuite, nous avons décrit le processus de la modélisation et la simulation comme outil très adéquat pour la résolution des problèmes complexe.

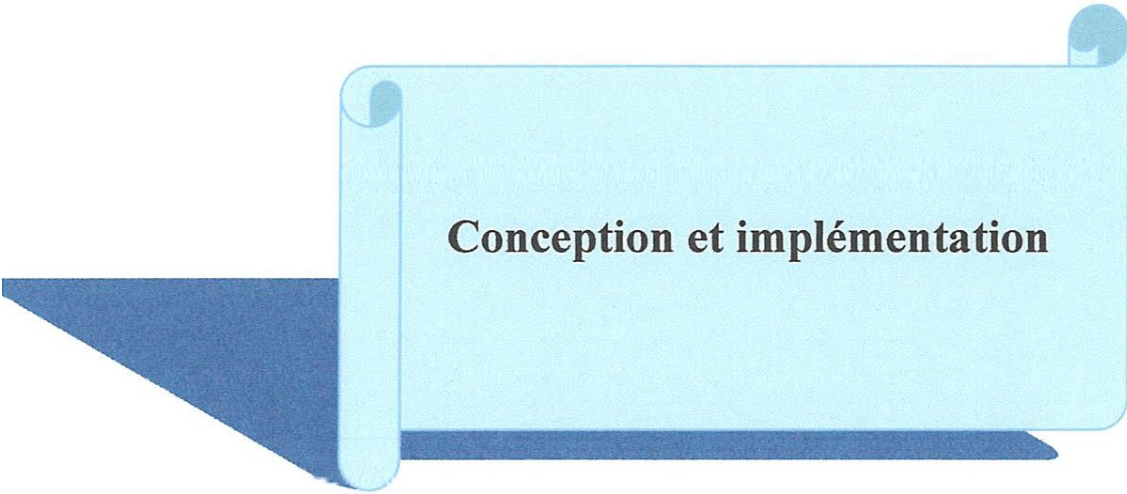
Enfin nous avons introduit un des problèmes du domaine de traitement d'image qui est la segmentation d'image.

Nous décrivons dans le chapitre suivant l'un des outils bio-inspiré utilisé pour la segmentation d'image

---

## Chapitre 4

---



**Conception et implémentation**

---

## Chapitre IV : Conception et implémentation

### Introduction

Ce chapitre traite la conception et l'implémentation d'un modèle de simulation par colonie de fourmi appliqué à la résolution d'un problème complexe. Il est organisé comme suit :

Premièrement, nous allons décrire le choix et l'objectif de notre application. Deuxièmement nous présentons les étapes de conception et de réalisation de notre système et nous terminerons par la discussion des résultats.

### I. Description et objectifs de l'application

#### I.1. Choix de l'application

La segmentation est un problème largement abordé dans le domaine du traitement d'images. Cette tâche est en réalité complexe, elle reste un véritable défi pour la communauté du traitement de l'image malgré plusieurs décennies de recherche.

Les raisons pour lesquelles on a opté pour ce choix sont :

- ✓ Le problème de non satisfaction des résultats de segmentation d'images. les diverses stratégies de segmentation qui ont été proposées ont affirmé leurs insuffisances et leurs limitations.
- ✓ La segmentation d'image est un problème complexe, cela est dû à la nature des images (éclairage, contours, texture...).
- ✓ L'utilisation des ABMS et les méthodes bio-inspirés comme une nouvelle approche ouverte de résolution de problème et comme une voie intéressante pour la recherche.

#### I.2. Objectifs de l'application

La méthode appliquée dans ce travail repose sur le comportement d'un système multi-agents qui émerge vers une segmentation de l'image.



Nous nous intéressons à la segmentation de contour. Le problème est de détecter donc les contours dans une image en utilisant un algorithme des colonies de fourmis. Dans ce contexte notre application vise les buts suivants :

- ✓ Développer un algorithme constitué d'une population de fourmis qui utilise la notion d'autonomie et d'adaptation pour la modélisation de comportements d'un système complexe.
- ✓ Essayer de remplacer les méthodes traditionnelles de segmentation d'image qui utilisent une approche séquentielle consistant à traiter l'image pixel par pixel, par une approche qui consiste à utiliser les systèmes multi-agents (traitement parallèle).
- ✓ Construire un système multi-agent auto-organisé qui s'adapte au changement d'environnement.

## II. Conception

### II.1. Modélisation du problème

#### II.1.1 Modélisation de l'environnement

L'image représente l'environnement dans lequel les agents « fourmis » sont placés et évolués à la recherche de la nourriture ; cette dernière représente les différents contours de l'image.

Cette population d'agents réactifs « fourmis » est dirigée par le stimulus perception/action, elle a comme caractéristique principale d'être autonome, elle présente des capacités d'adaptation et d'auto-organisation.

#### II.2. Comportement de l'agent réactif « fourmis »

Contrairement aux fourmis naturelles, les fourmis artificielles ont une mémoire qui représente la liste des pixels que la fourmi a déjà visités. La fourmi se déplace d'un pixel à un pixel. Les pixels voisins admissibles pour le déplacement sont ceux qui ne sont pas dans sa liste. La fourmi dépose lors de son passage une quantité de phéromone.

#### II.3. Algorithme principal

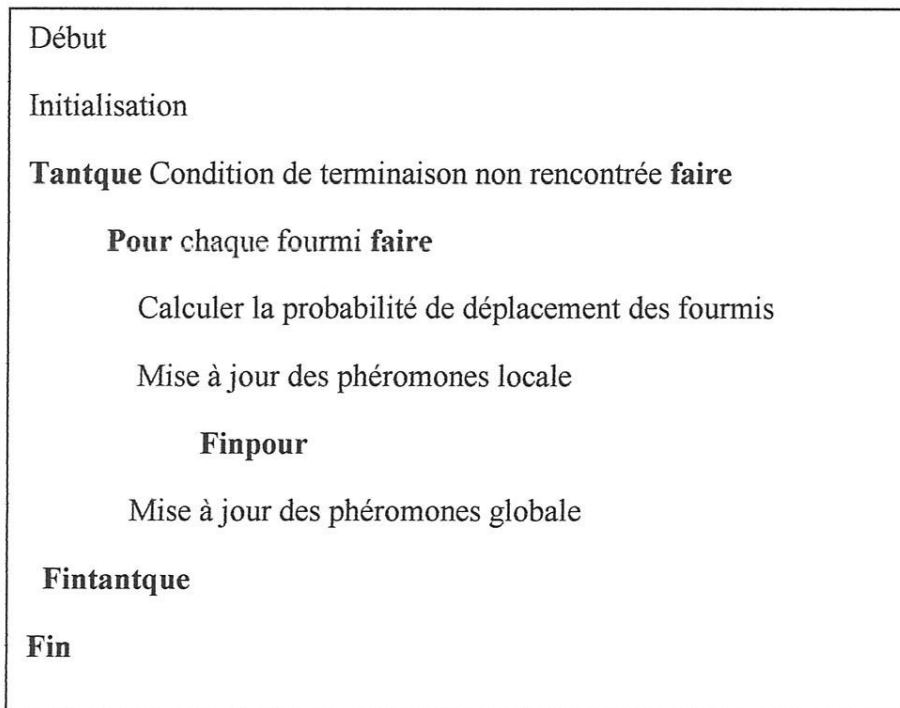
Nous allons présenter deux algorithmes inspirés du comportement des colonies de fourmis naturelles. Le premier algorithme Ant Colony System (ACS) est utilisé pour l'extraction des contours de l'image. Cette méthode met en relief l'étude de l'adaptation de la détection de

contour sur un ensemble d'images d'un contour variable selon le changement de l'environnement. Le deuxième algorithme complémentaire au premier, permet d'améliorer les résultats des contours.

#### a. Phase de détection et d'adaptation de contour

Les fourmis explorent leurs environnement à la recherche de la nourriture, elles déposent dans leurs passages une quantité de phéromones qui s'évapore au cours du temps, la nourriture recherchée représente le contour de l'image. La phéromone attire les autres fourmis qui vont déposer à leur tour de la phéromone. Au cours d'exécution, plusieurs environnements seront chargés. Les fourmis vont s'auto-organiser d'une manière adaptative pour détecter les nouveaux contours.

Pour mieux comprendre ce principe, nous le présentons par l'algorithme de segmentation suivant:



*Figure 4.1 : Algorithme ACS*

#### b. Phase d'amélioration de contour

Une deuxième étape consiste à améliorer les résultats précédents de la segmentation en essayant de détecter le maximum de contours. Le principe de cet algorithme est le suivant :

### b. Présentation de l'application

L'interface graphique de notre application contient un ensemble d'options à partir desquelles nous pouvons accéder à notre système, la figure suivante présente ces options :

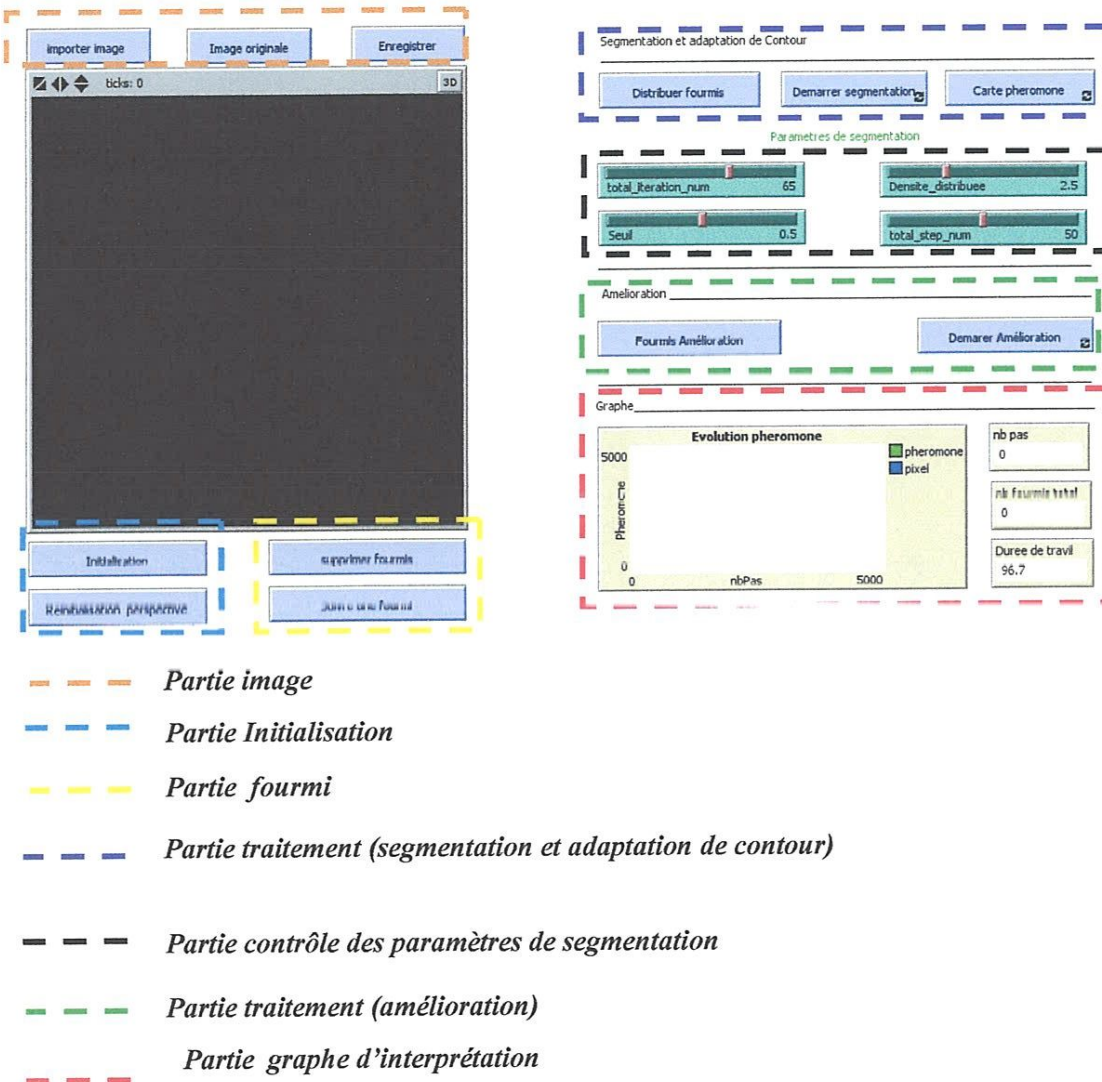


Figure 4.4: Interface de l'application

Cette interface est organisée en sept parties comme suit :

1) **Partie image** : C'est une collection de trois boutons qui sont :

Bouton **Importer image** : permet d'importer les images à segmenter (couleurs ou niveaux de gris) en format BMP, JPG, GIFF, PNG. Comme le montre la figure 4.5

Bouton **Image Originale** : pour revoir l'image originale pendant l'exécution.

Bouton **Enregistrer** : permet d'enregistrer le résultat de la segmentation.

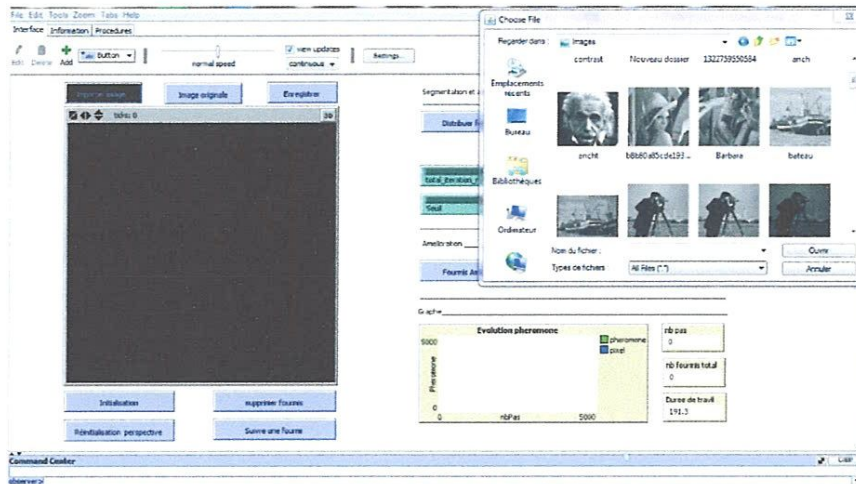


Figure 4.5 : Importer image

2) **Partie Initialisation** : Contient deux boutons qui sont :

Bouton **Initialisation** : permet initialiser la zone d'affichage et le graphe à l'état initial.

Bouton **Réinitialisation perspective** : permet d'arrêter le suivi des fourmis.

3) **Partie fourmis** : Contient les boutons suivants :

Bouton **Supprimer fourmis** : permet la suppression des fourmis pour la visualisation claire des résultats.

Bouton **Suivre une fourmi** : permet de visualiser et suivre une fourmi pendant la simulation.

4) **Partie traitement (segmentation contour)** : Contient les boutons suivants :

Bouton **Distribuer fourmis** : permet la distribution aléatoire des fourmis sur l'image.



Figure 4.6: Distribution de fourmis sur

Bouton **Démarrer simulation** : permet le lancement de la segmentation de contour.

Bouton **carte phéromone** : pour visualiser la carte de la phéromone qui représente le résultat de la segmentation

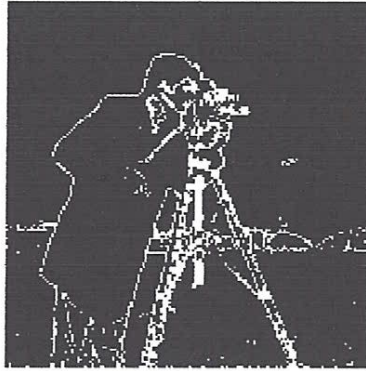


Figure 4.7 : Carte de la phéromone

5) **Partie contrôle des paramètres de segmentation :**

C'est un ensemble des curseurs qui permet de modifier les paramètres de segmentation afin d'ajuster la segmentation.

6) **Partie graphe d'interprétation :**

Le graphe permet la visualisation de l'évolution de la quantité de phéromone en fonction du nombre d'itération, la stabilisation de la courbe indique que la segmentation est terminée.

D'autres paramètres afficheurs sont rajoutés pour indiquer le changement de paramètres pendant la simulation.

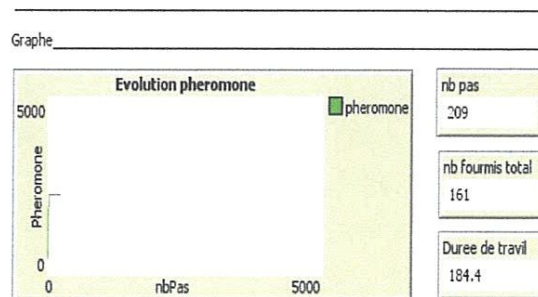


Figure 4.8 : Graphe d'interprétation

7) **Partie amélioration :** C'est une collection de deux boutons qui sont :

Bouton **Fourmis Amélioration** : pour la distribution des fourmis sur les points d'extrémités.



Figure 4.9 : Distribution de fourmis

Bouton **Démarrer Amélioration** : permet le lancement d'exécution et la visualisation des résultats.

### III. Résultats expérimentaux

#### III.1. Discussion

Afin d'évaluer l'efficacité de notre algorithme, nous l'avons appliqué sur un ensemble d'images.

##### 1) Discussions en fonction du nombre d'itération et du nombre de pas

Les figures ci-dessous présentent les résultats de la segmentation des contours d'une image en niveau de gris « House ». Dans un premier cas le nombre de pas est fixé à « 50 » tout en changeant le nombre d'itération [Figure 4.10], dans un deuxième cas le nombre d'itération est fixé à 45 et le nombre de pas est varié [Figure 4.11].

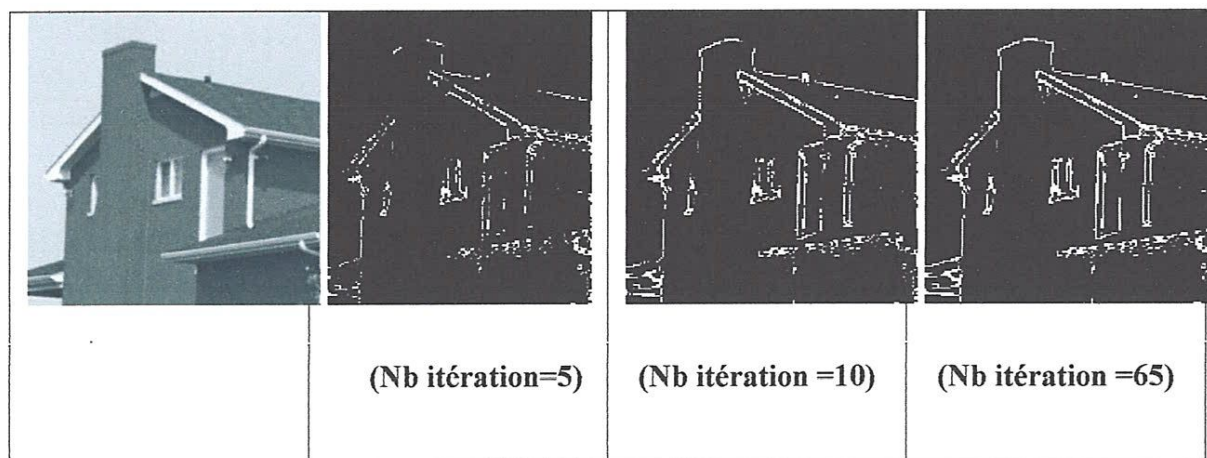
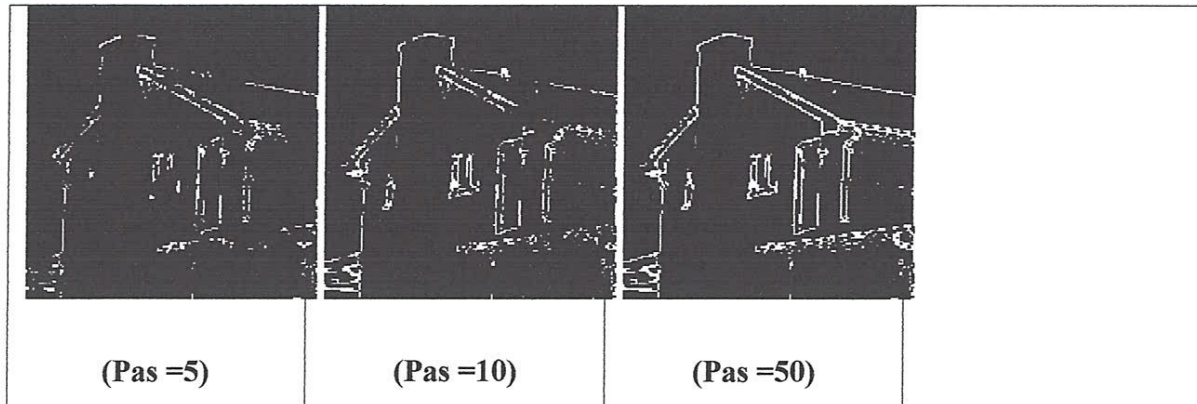


Figure 4.10 : Segmentation de contour nombre de pas=50 et nombre d'itération varié



*Figure 4.11 : Segmentation contour nombre d'itération = 45 et nombre de pas varié*

Les résultats obtenus sont influencés par l'utilisation de ces deux paramètres « nombre de pas et nombre d'itération », alors pour l'obtention des bons résultats le choix de ces paramètres doit être soigneux.

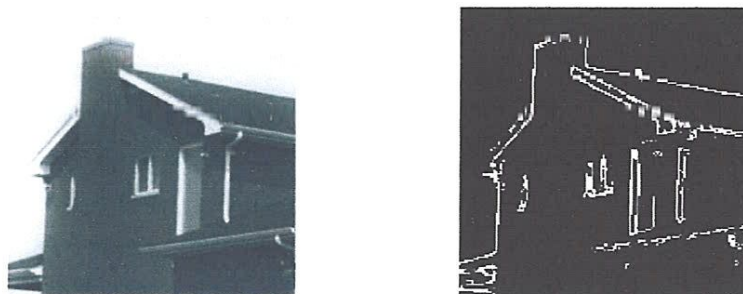
Dans la section suivante nous allons présenter la capacité d'adaptation de l'algorithme proposé. Dans ce contexte deux configurations expérimentales sur deux ensembles d'images ont été réalisées.

## 2) Adaptation par Changement d'environnement

### a. Changement d'environnement

Dans la première configuration expérimentale, nous avons choisi un ensemble de trois images, ces dernières ont été obtenues en modifiant le contraste de l'image de "Cameraman".

La figure suivante présente cette configuration :



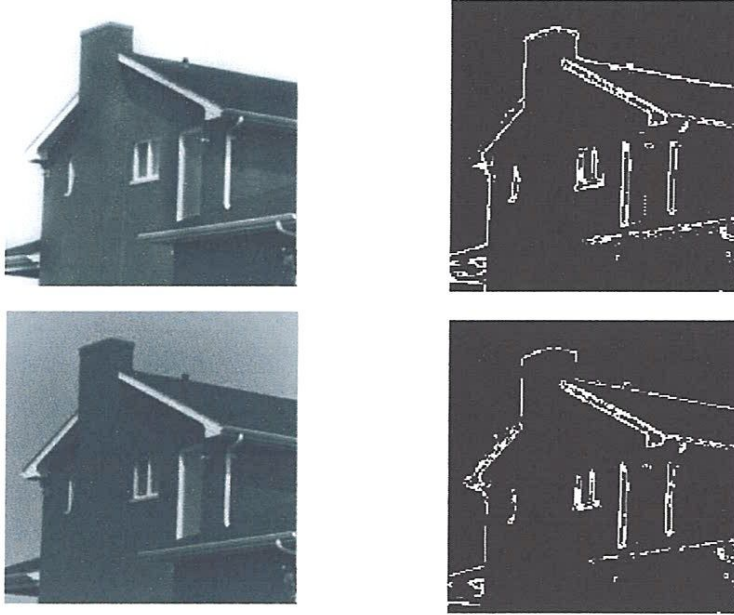


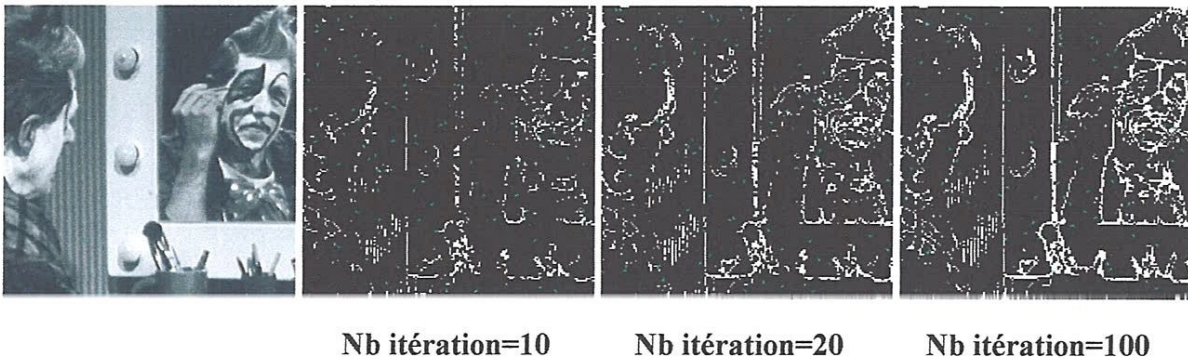
Figure 4.12 : Adaptation de l'algorithme

Les résultats montrent que notre algorithme est capable de détecter l'objet principal du fond malgré le changement effectué.

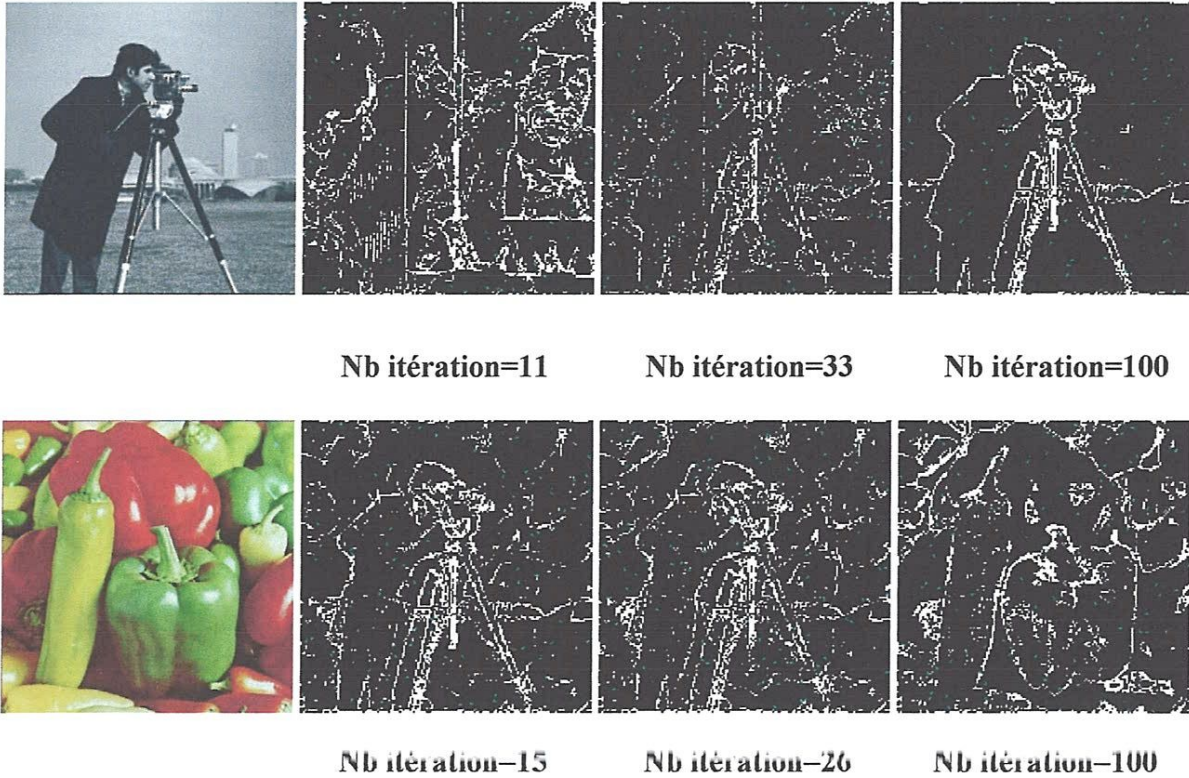
#### b. Changement de l'image

Dans la deuxième expérimentation, une suite d'images (niveaux de gris, couleurs) a été chargée, à chaque « N = 100 itérations » une image a été remplacée par la suivante.

La figure suivante présente cette configuration :





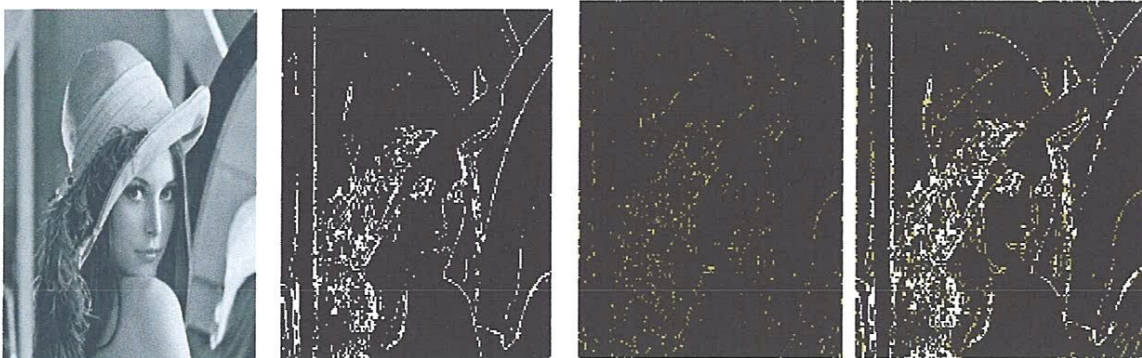


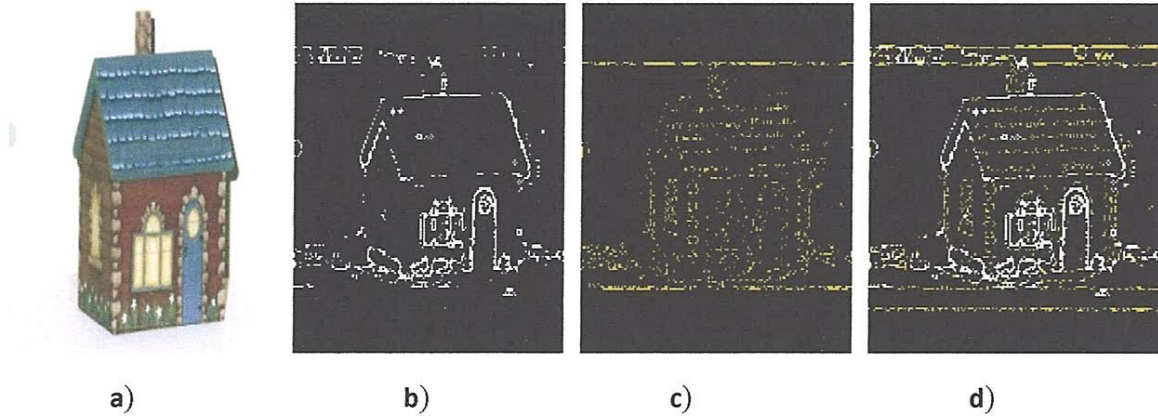
*Figure 4.13 : L'adaptation de l'algorithme aux changements d'environnement*

Les résultats obtenus par notre système montrent qu'il est capable de s'adapter aux changements qui sont survenus à la suite du remplacement d'une image par une autre, les contours de la nouvelle image seront accentués alors que ceux de la précédente seront évaporés graduellement.

### 3) Application de l'algorithme « amélioration »

Afin d'améliorer les résultats de la segmentation obtenues par l'algorithme précédent, nous avons appliqué l'algorithme d'amélioration. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :





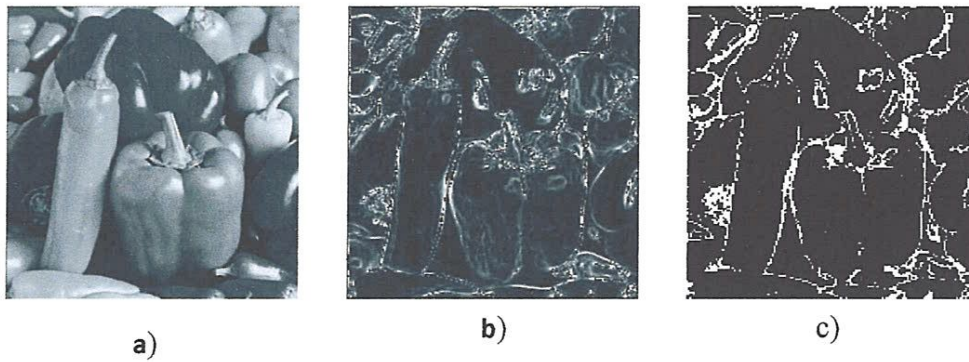
**Figure 4.14 :** Résultats de l'algorithme d'amélioration a) image originale b) segmentation par l'algorithme proposé c) amélioration par algorithme proposé d) l'image b) + c)

Les résultats montrent que l'algorithme a détecté de nouveaux contours qui n'ont pas été présents dans les résultats de l'ACS ce qui a permis d'améliorer la segmentation contours de l'image.

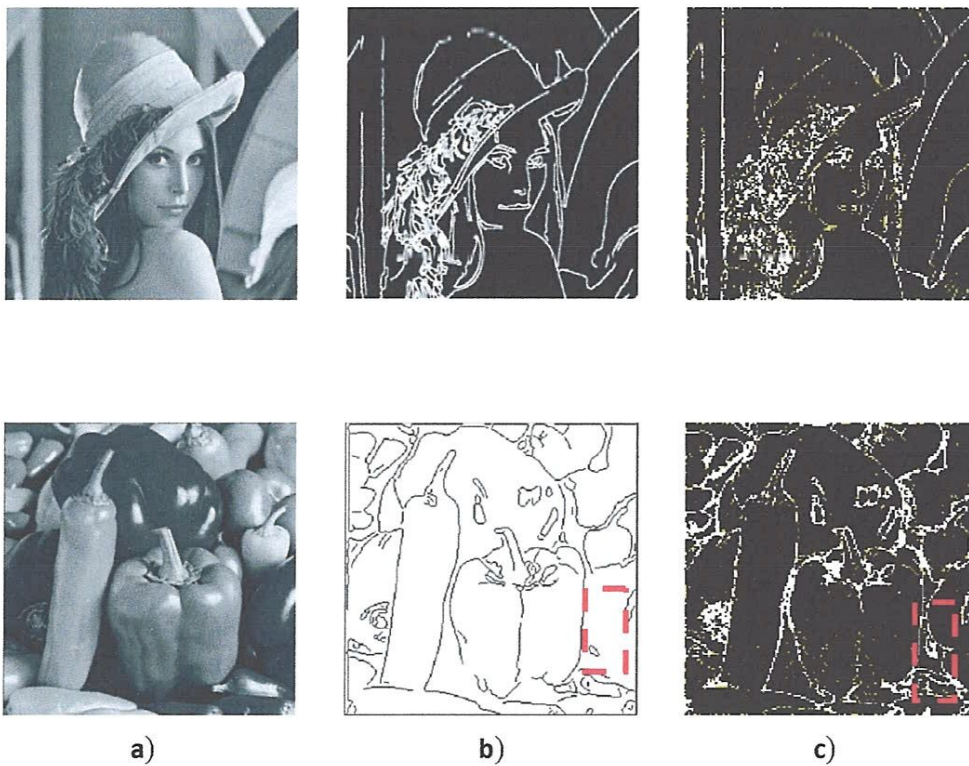
### III.2. Comparaison des résultats

Afin d'évaluer les résultats obtenus, nous avons opté pour une comparaison entre nos résultats et ceux obtenus en appliquant deux filtres linéaires de Sobel et de Canny. Ces filtres utilisent une opération mathématique appelée « convolution » afin d'extraire les points contours.





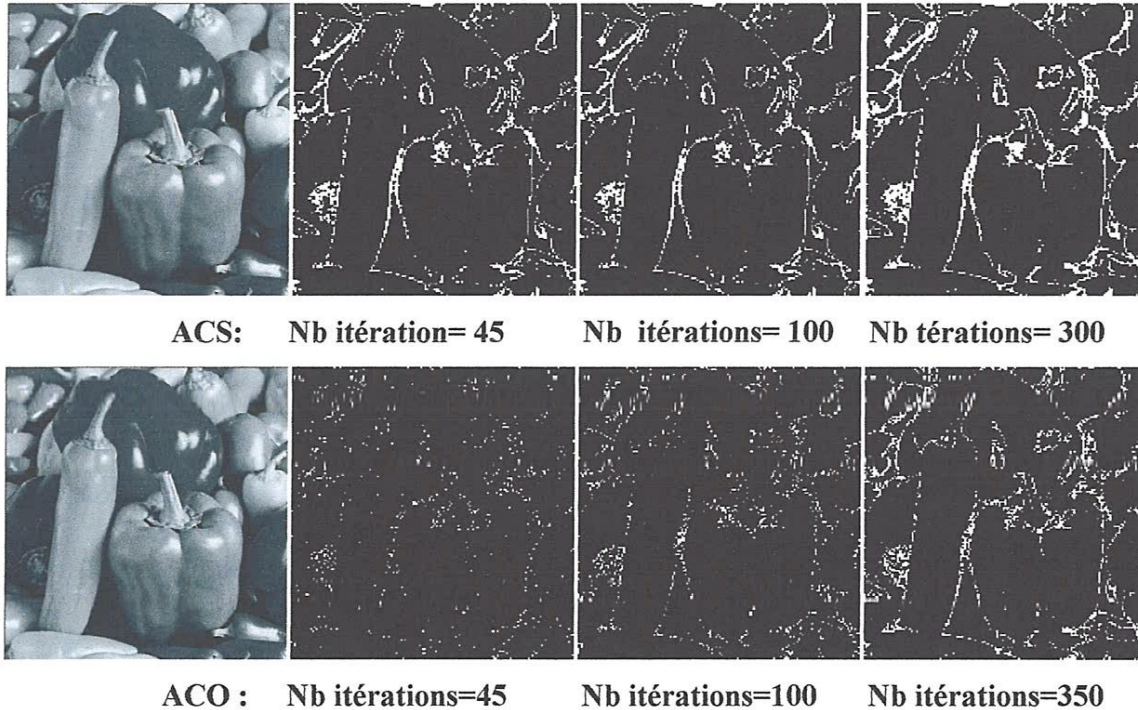
**Figure 4.15 :** Comparaison entre notre algorithme et filtre de sobel : a) Images originaux, b) Application de filtre de Sobel, c) Application de l'algorithme (ACS) proposé



**Figure 4.16 :** Comparaison entre notre algorithme et filtre de Canny : a) Images originaux, b) Application de filtre de Canny, c) Application d'amélioration proposé.

D'après ces résultats, nous observons que les contours détectés par le filtre de Sobel présentent une distorsion du bruit, ils ne sont pas bien précis c'est le cas de sur-segmentation lorsque il s'agit d'une image complexe. Les résultats obtenus par notre algorithme (ACS) ont détectés des contours non présentés dans les résultats de Canny.

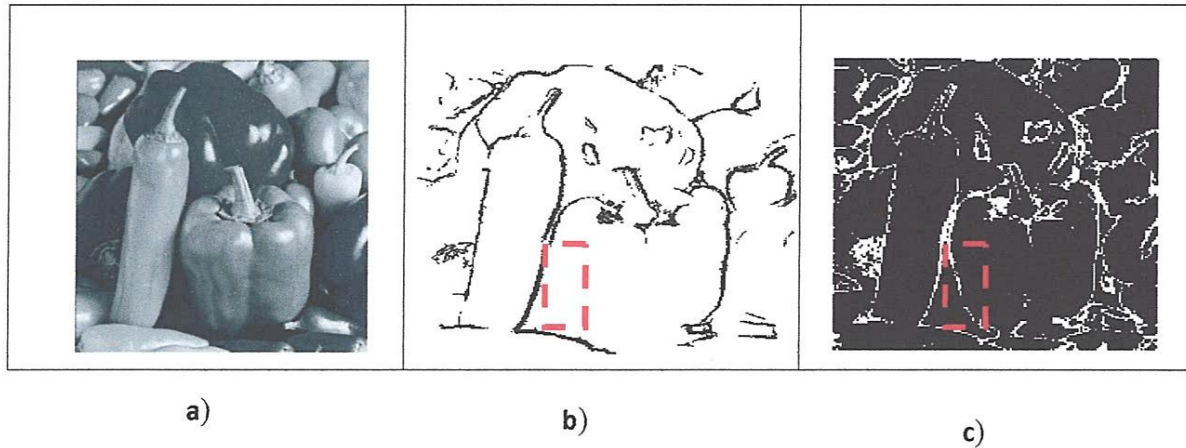
Dans la section suivante nous allons comparer les résultats obtenus par l'algorithme ACS avec ceux obtenus avec l'algorithme ACO en modifiant le nombre d'itération.



*Figure 4.17: Comparaison entre notre algorithme ACS et l'algorithme ACO*

Les résultats montrent que l'algorithme « ACS » converge par un nombre minimum d'itération ce qui n'est pas le cas de l'algorithme « ACO ».

Dans la section suivante, les résultats ont été comparés avec ceux de [Baterina et .al, 10] pour la même application de l'algorithme (ACS)

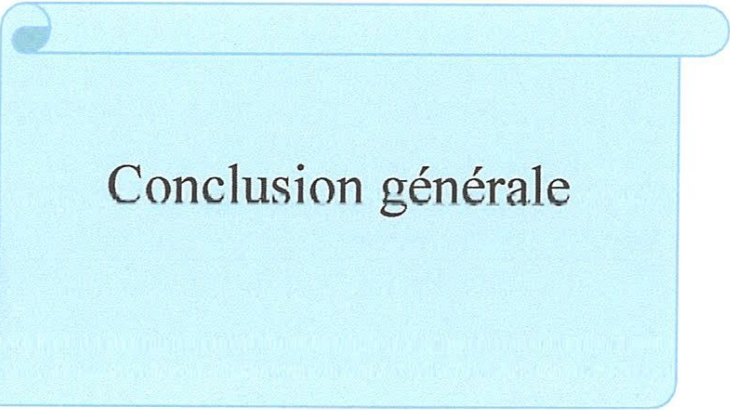


**Figure 4.18:** Adaptation de l'algorithme a) Image originale b) Bateria et .al c) Application de l'algorithme proposé

Notre algorithme permet d'extraire des contours non présentés dans ceux de [Bateria et .al, 10].

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails notre application « Segmentation contour d'image par la colonie de fourmis », nous avons appliqué un algorithme « ACS » inspiré par le comportement des fourmis naturelles. Cet algorithme a été testé sur une base d'image (couleurs, niveaux de gris) et a été comparé par d'autres méthodes (Sobel, ACS, ACO, Canny), en plus, une étude sur l'adaptabilité de l'algorithme a été faite. Nous avons essayé d'améliorer nos résultats par l'application d'un algorithme complémentaire inspiré par le comportement des fourmis, les résultats sont satisfaisants.



**Conclusion générale**

---

---

## *Conclusion générale et perspectives*

L'objectif principal de ce mémoire était de concevoir un système multi-agents adaptatif et auto-organisé. Nous avons voulu défendre l'idée que la résolution des problèmes complexes avec une population d'agent réactive « fourmis » était possible, et même très pertinente pour pouvoir obtenir des solutions très satisfaisantes.

Après une présentation du domaine sur la simulation orientée-agents et du domaine de la résolution distribuée de problèmes, nous avons construit un système intelligent à base de fourmis artificielles.

Nous avons choisi le domaine de traitement d'images et plus précisément « la segmentation d'image », comme application de cette méthodologie de résolution de problèmes. La population de fourmi est capable de s'adapter aux variations environnementales et de s'auto-organisé afin de produire un comportement global qualifié comme intelligent. Une segmentation optimale a émergé des différentes interactions locales entre les fourmis d'une part et entre les fourmis et leur environnement d'autre part.

L'analyse de l'adaptation de l'algorithme a été réalisée sur un ensemble dynamique d'images. L'algorithme s'adapte avec succès à ces changements. Les résultats sont satisfaisants.

Nous n'avons pas inclus le temps de calcul comme élément de comparaison entre notre système et les méthodes classiques car la programmation de ces méthodes était essentiellement séquentielle et donc pas réellement comparables à la programmation parallèles.

En conclusion, nous pouvons espérer que l'approche de segmentation par les Systèmes Multi-Agents adaptatifs deviendra un des éléments essentiels de la boîte à outils de l'analyse d'images.

---

---

## *Bibliographie*

---

---

[Azerradj et al., 07] D.Azerradj et D.Kessoum, "Application des contours actifs géodésiques sur des séquences d'images", mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Institut National de formation en Informatique(I.N.I), Alger, 2007

---

---

[Batrina et al., 10] A.Veronica Baterina et C.Oppus, "Image Edge Detection Using Ant Colony Optimization", International Journal of circuits, systems and signal processing, 2010

---

---

[Bourjo et al., 03] C.Bourjo,V.Chevrie et V.Thomas, "A new swarm mechanism based on social spiders colonies: from web weaving to region detection". Web intelligence and agent systems: an international journal, vol 1, pp 47-64, WIAS (2003).

---

---

[Carley et al., 99] K. M. Carley et L.Gasser, "Computational Organization Theory. Dans Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence". Weiss G., MIT Press, Cambridge, MA, pp. 299-330, 1999.

---

---

[Dewolf et al., 04] T. DEWOLF et T.HOLVOET, "Emergence and self-organisation: a statement of similarities and differences", in Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications, pages 96–110, 2004

---

---

[Ferber, 95] J. Feber, " Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective". Ed, InterEditions, 1995

---

---

[Ferber, 97] J. Ferber, " Les systèmes multi-agents : un aperçu général. Techniques et sciences informatiques", 16(8) : 979-1012, 1997

---

---

[Ferber ,09] J.Ferber, "La simulation multi-agents(Agent Based Simulation) ",version 1.0,2009

---

---



---

---

**[Rouquier , 08]** Jean-Baptiste **Rouquier** "Robustesse et émergence dans les systèmes complexes : le modèle des automates cellulaires", thèse de doctorat, l'École normale supérieure de Lyon, 2008

---

---

**[Russel et al., 06]** S. Russel et P. Norvig, "Intelligence Artificielle", 2 édition, Pearson Education, France. 2006.

---

---

**[Sycara,98]** K. P. Sycara, "Multiagent Systems", AI Magazine, vol. 10, n°2, pages 79-93, 1998.

---

---

**[Vidau, 11]** S. Vidau, "Contrôle de processus dynamiques par systèmes multi-agents adaptatifs : application au contrôle de bioprocédés", thèse doctorat, Université de Toulouse, 2011

---

---

**[Wooldridge et al., 95]** M. Wooldridge et N. R. Jennings, " Intelligent agents: Theory and practice ". The Knowledge Engineering Review, vol. 10(2) pp.115-152, 1995

---

---