

539

17004, 539

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



16/327

## Mémoire de Fin d'études Master

Filière : Informatique

Option : Ingénierie des Medias

Thème :

---

# Stratégies de coordination pour l'exploration multi robots

---

Encadré par :  
Dr. Ouarda ZEDADRA

Présenté par :  
• Nezha MECHAIRIA  
• Amira AOUISSI

Juin 2016



## *Remerciement*

*MERCI !*

*C'est un petit mot tout simple mais qui pèse lourd*

*Un grand Merci, un petit Merci*

*Peu importe sa taille Il n'a pas de dimension...*

*Que ce soit dans la joie ou dans la tristesse !*

*C'est un signe de reconnaissance qui ne connaît pas l'indifférence !*

*Merci !*

*Un petit mot qui fait du bien quand on le prononce, un petit mot gracieux qui calme et réjouit*

*Merci ! Merci !*

*Merci de nous avoir permis de vous dire : Merci !*

*Avant tout, il apparait opportun de rendre grâce à DIEU de nous avoir donné le courage et la volonté et la patience et le savoir faire afin d'accomplir ce travail.*

*Merci tout particulièrement :*

*Nous devons beaucoup à notre encadreur **Dr. Ouarda ZEDADRA** Maitre assistante à l'Université de **GUELMA** qui a pu nous faire profiter de sa science. Elle nous a offert son temps et sa patience, ses conseils, remarques et critiques ont toujours été d'une aide précieuse pour nous. Nous avons beaucoup appris à son contact et ce fut un grand plaisir de travailler avec elle. Nous voudrions lui adresser nos vifs remerciements et de lui témoigner notre sincère reconnaissance*


*Aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur de faire partie de notre jury de ce travail.*

*A tous ceux dont on a fait la connaissance dans le cadre des nos études, pour leurs conseils et leurs aides.*

*A tous les amies et les membres de la famille pour leurs aides et soutiens et leurs encouragements dans les moments difficiles.*

*Nous tenons à remercier nos parents; Sans leurs sacrifices nous ne serons pas devenu ce que nous sommes aujourd'hui.*

*Enfin merci aux personnes qui liront ces quelques pages.*



## **Résumé**

La robotique en essaim est un champ de recherche de la robotique collective qui s'intéresse à la coordination d'un grand nombre de robots dont la complexité est minimale. La plupart des robots mobiles existants utilisent une seule stratégie de locomotion tel que : la marche, le volé, la natation ou le saut. Cela les rend peu pratique pour la plupart des missions comportant des scénarios complexes ou imprévisibles, telles que les applications de recherche et de sauvetage. Cette limitation provient du fait que les robots existants exploitent habituellement seulement une stratégie de locomotion unique, ce qui limite leur flexibilité et leur capacité d'adaptation à des environnements différents de ceux pour lesquels ils ont été conçus.

Pour résoudre le problème d'exploration multi-robots (multi-agents) des environnements inconnus, nous avons proposé un algorithme nommé Flying Ant-like Searcher Algorithm (FASA). L'algorithme combine la marche aléatoire avec la recherche systématique, il utilise la communication stigmergic via des phéromones pour coordonner les mouvements des agents. L'algorithme est inspiré du comportement des fourmis *Camponotus japonicus*. Nous donnerons plus de flexibilité aux agents par l'utilisation de la locomotion multimodale où les agents peuvent marcher ou voler quand c'est nécessaire.

Pour tester les performances de l'algorithme FASA, nous comparons avec l'algorithme d'exploration Stigmergic Random Walk (SRW) dans différentes configurations environnementales. Les résultats de simulations obtenues montrent que FASA est plus performant que SRW.

**Mots clés :** robotique en essaim, coordination réactive, recherche multi-targets, recherche aléatoire, stigmergie, locomotion multimodale.

# *Sommaire*



## Sommaire

<b>Liste des Figures</b> .....	<b>4</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des Abréviations et Acronymes</b> .....	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>7</b>
1. Positionnement scientifique .....	7
2. Problématique et objectif de recherche .....	8
3. Plan de mémoire .....	9
 <b>CHAPITRE I : LES SYSTEMES MULTI-AGENTS</b>	
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>10</b>
<b>I. AGENT</b> .....	<b>10</b>
I.1. Architectures d'agents .....	12
I.1.1. Les agents cognitifs .....	13
I.1.2. Les Agents réactifs .....	14
I.1.3. Les agents hybrides .....	15
<b>II. Les SYSTÈMES MULTI-AGENTS (SMA)</b> .....	<b>15</b>
II.1. Caractéristiques des systèmes multi-agents .....	17
II.2. Organisation Multi-Agents et principes d'interactions.....	18
II.2.1. Principes d'interaction dans les organisations SMA .....	19
II.2.2. Typologie des organisations dans les SMAs .....	20
II.2.3. Communication dans les systèmes multi-agents.....	20
II.3. La coordination d'actions.....	21
II.3.1. Introduction .....	21
II.3.2. Définition de la coordination d'action .....	22
II.3.3. Pourquoi coordonner ? .....	22
II.3.4. Formes de coordination d'action .....	23
II.3.5. Coordination réactive.....	24
II.4. Domaines d'application.....	25
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>26</b>

## CHAPITRE II : TRAVAUX RELIES - ETAT DE L'ART

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>27</b>
<b>I. CONTEXTE APPLICATIF .....</b>	<b>27</b>
I.1. Intelligence en essaim .....	27
I.1.1. Définition .....	28
I.1.2. Caractéristiques génériques de l'intelligence en essaim.....	29
I.2. Robotique en essaim .....	30
I.2.1 Définition.....	30
I.2.2 Caractéristiques de robotique en essaim .....	30
<b>II. EXPLORATION MULTI-AGENTS.....</b>	<b>31</b>
II.1. Définition.....	31
II.2. Approches existantes.....	32
II.3. La robotique avec locomotion Multi-modale .....	35
II.3.1. Robotique à locomotion aérien-terrestre.....	35
II.3.2. Robotique à locomotion terrestre-aquatique.....	36
II.3.3. La robotique à locomotion aérien-aquatique.....	37
II.3.4. Les principes de conception des locomotions multi-modale dans la robotique	38
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>40</b>

## CHAPITRE III : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>41</b>
<b>I. CONCEPTION.....</b>	<b>41</b>
I.1. Objectifs de l'application.....	41
I.2. Le problème d'exploration Multi-Agents : description formelle .....	42
I.3. Flying Ant-like Searcher Algorithm(FASA): Algorithme d'exploration.....	43
I.4. L'algorithme Stigmergic Random Walk (SRW) .....	45
<b>II. Implémentation .....</b>	<b>46</b>
II.1. Environnement de développement .....	46
II.2. Présentation de l'application.....	46
II.3. Evaluation des performances .....	49
II.3.1. Indice de performance .....	49
II.3.2. Scénarios de simulation.....	49

II.3.3. Résultats de simulations et comparaisons.....	52
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSION GENERAL ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>

## *Liste des figures*



## Liste des Figures

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1:</b> Interaction de l'agent avec son environnement [Russell et Norvig, 95].....	<b>11</b>
<b>Figure I. 2:</b> Architecture BDI d'un agent [1] .....	<b>14</b>
<b>Figure I.3:</b> Architecture réactive [Russell et Norvig, 95] .....	<b>15</b>
<b>Figure I.4:</b> Représentation d'un SMA [Ferber, 95] .....	<b>17</b>
<b>Figure I.5:</b> Formes d'interactions entre agents [Weiss, 99] .....	<b>19</b>
<b>Figure I.6:</b> Principe d'un acte de communication [Kamoun, 2007].....	<b>21</b>
<b>Figure II.1:</b> Des robots air-terre .....	<b>36</b>
<b>Figure II.2:</b> Robot amphibie terre-eau inspirée de tortue de mer .....	<b>37</b>
<b>Figure II.3:</b> Chaque étape de mission aérienne-aquatique pose différents défis pour AquaMAV .....	<b>38</b>
<b>Figure III.1:</b> Model de comportement de : (a) ouvrières, (b) mâle et (c) femelle de fourmi Camponotus japonicus .....	<b>44</b>
<b>Figure III.2:</b> Model de comportement des agents FASA .....	<b>45</b>
<b>Figure III.3:</b> Interface principal .....	<b>47</b>
<b>Figure III.4:</b> Interface principal de SRW.....	<b>48</b>
<b>Figure III.5:</b> Performance de FASA et SRW avec un nombre d'agents variant entre 100 et 2500 dans un environnement de (200X200 cellule, 8%obstacle et 100 targets). .....	<b>52</b>
<b>Figure III.6:</b> Performance de FASA et SRW avec une taille d'environnement variante entre 100X100 et 1000X1000 avec 100 agent ,8%obstacle et 100 targets. ....	<b>53</b>
<b>Figure III.7:</b> Performance de FASA et SRW avec un nombre de target variant entre 1 et 1000 avec 100 agents dans un environnement de (200X 200 cellule ,8%obstacle) .....	<b>53</b>
<b>Figure III.8:</b> Performance de FASA et SRW avec une position de target variante avec 100 agents dans un environnement de (200X 200 cellule ,8%obstacle et 100 targets). ....	<b>55</b>

# *Liste des tableaux*

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1:</b> Les principes de conception de la locomotion terrestre aérienne dans la robotique et les animaux qui ont été inspiré d'eux.....	<b>39</b>
<b>Tableau II.2:</b> Les principes de conception de la locomotion terrestre aquatique dans la robotique et les animaux qui ont été inspiré d'eux.....	<b>39</b>
<b>Tableau II.3:</b> Les principes de conception de la locomotion aérienne aquatique dans la robotique et les animaux qui ont été inspiré d'eux. [Siddall et Kovač, 14].....	<b>40</b>
<b>Tableau III.1:</b> Le temps de recherche pour les différentes valeurs de x .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.2:</b> Les quatre scénarios avec ses conditions.....	<b>51</b>
<b>Tableau III.3:</b> Temps de recherche de FASA et SRW en augmentant NA .....	<b>52</b>
<b>Tableau III.4:</b> Temps de recherche de FASA et SRW en augmentant TE .....	<b>53</b>
<b>Tableau III.5:</b> $Eff_{recherche}$ % de FASA et SRW en augmentant le NT.....	<b>54</b>
<b>Tableau III.6:</b> $Eff_{recherche}$ % de FASA et SRW en variant le PT.....	<b>55</b>

*Liste des abréviations et  
acronymes*



## **Liste des Abréviations et Acronymes**

<b>APF</b>	<b>Artificial Potential Field</b>
<b>AquaMAV</b>	<b>Aquatic Micro Air Vehicle</b>
<b>BDI</b>	<b>Beliefs, Désires, Intentions</b>
<b>FASA</b>	<b>Flying Ant-like Searcher Algorithm</b>
<b>IA</b>	<b>Intelligence Artificielle</b>
<b>IAD</b>	<b>Intelligence Artificielle Distribuée</b>
<b>IAS-SS</b>	<b>Ant System-Based Surveillance Systems</b>
<b>OMA</b>	<b>Organisation Multi-Agents</b>
<b>ORMSTC</b>	<b>Online Robust Multi-robot Spanning Tree Coverage</b>
<b>PRM</b>	<b>Probabilistic Road Map</b>
<b>RRT</b>	<b>Rapidly-exploring Random Tree</b>
<b>SMA</b>	<b>Systèmes Multi-Agents</b>
<b>S-MASA</b>	<b>Stigmergic Multi AntSearch Area</b>
<b>SRW</b>	<b>Stigmergic Random Walk</b>
<b>UAV</b>	<b>Unmanned Aerial Vehicle</b>

# *Introduction générale*

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1. Positionnement scientifique

L'Intelligence Artificielle (IA) est définie comme l'élaboration des programmes informatiques imitant le comportement intelligent humain pour la résolution des problèmes donnés par intégration de capacités mentales de haut niveau tels que : l'apprentissage, l'organisation de la mémoire et le raisonnement [Minsky, 86]. Le but est de donner des notions de rationalité à travers des fonctions de décision autonomes et de perception pour commander un robot dans un milieu qui lui est inconnu. Elle trouve ses origines dans les travaux d'Alan Turing [Turing, 50], où il propose une expérience connue sous le nom de *test de Turing* permettant de qualifier une machine de consciente.

A la différence de l'IA qui modélise le comportement intelligent d'un seul agent, l'intelligence artificielle distribuée (IAD) s'intéresse à des comportements intelligents qui résultent de l'activité coopérative de plusieurs entités (agents), elle partage la résolution du problème entre différents agents autonomes, dotés de capacités de perception et d'action sur l'environnement [Dufee et al., 87]. Le but de l'IAD est de concevoir des approches de développement de communautés d'agents intelligents qui puissent interagir de façon coopérative mais aussi conflictuelle ou concurrente afin de résoudre des problèmes complexes. Le partage de la résolution crée, par sa nature, plusieurs problèmes parmi lesquels les plus importants sont ceux du contrôle, de la coordination, de la communication et de l'organisation des agents.

Au même moment, une autre révolution a envahi l'IAD, où l'intelligence n'est pas uniquement individuelle mais également collective, provoquant l'établissement du domaine des Systèmes Multi-Agents [Simonin, 10].

Un domaine de recherche relativement complexe, dérivé de l'IAD, est celui des systèmes multi-agents (SMA). La thématique SMA se focalise sur l'étude des comportements collectifs et sur la répartition de l'intelligence sur des agents plus au moins autonomes, capables de s'organiser et d'interagir pour résoudre des problèmes. Ferber [Ferber, 95], présente une étude détaillée sur les SMA dans son célèbre livre "*Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*", où il classifie les différents types des SMA selon différents critères, ainsi que les enjeux de leur conception et de leur maîtrise dans le cadre de l'informatique et de la robotique.



Il définit deux types d'SMA *délibératifs (communicants)* ou *réactifs (collectifs)* selon que les agents utilisent un raisonnement symbolique et des capacités cognitives (anticipation, mémorisation...), ou des réactions simples de type stimulus-réponse [Brooks, 91]. Plusieurs méta-heuristiques inspirées des techniques collectives des insectes sociaux (éco-résolution [Ferber, 90], ACO [Dorigo et al., 96] ont montré leurs succès et provoquent ainsi l'intérêt pour ces approches dans la modélisation des systèmes complexes, ainsi que dans la robotique mobile. Cette approche a remis en cause l'utilisation des processus de prise de décision complexes basés sur des représentations symboliques (processus cognitif). Les interactions locales à travers des actions simples résultent en un comportement collectif global complexe [Thomas, 05].

L'intelligence en essaim est une forme particulière de ce type d'intelligence, elle se base sur un essaim d'individus pourvus d'une intelligence minimale, mais totalement autonomes. La robotique en essaim est actuellement l'un des plus importants domaines d'application de l'intelligence en essaims, elle est une branche de la robotique collective axée sur l'étude des groupes relativement importants de robots avec des capacités de communication et de détection limitées [Pinciroli et al., 13].

## 2. Problématique et objectif de recherche

L'exploration de l'environnement est l'un des problèmes les plus étudiés en robotique collective [Wurm et al., 08] [Burgard et al., 05]. Le but de l'exploration avec ou plusieurs robots est de minimiser le temps globale d'exploration. Le principal problème à résoudre dans le cadre multi-robots est d'assurer une large dispersion de robots par l'évitement des régions déjà explorées. Lorsque les agents (robots) ne disposent pas d'informations complètes de leur environnement (position des targets, nombre des agents,...), la recherche systématique devient moins efficace et l'utilisation de recherche aléatoire peut améliorer les chances pour localiser plus de targets en augmentant l'exploration de certaines régions non encore visitées. Dans ces stratégies aléatoires l'agent tend à explorer une région donnée de l'espace mais il a tendance à revenir au même point plusieurs fois avant de finalement aller plus loin, et cela influe négativement sur le temps d'exploration et la consommation d'énergie.

Nous intéressons dans ce manuscrit à la résolution d'un tel problème. Nous avons proposé une stratégie d'exploration qui combine la marche aléatoire, la communication stigmergic via phéromone et l'utilisation des informations historique pour assurer une exploration complète de l'environnement. La stratégie est inspirée du comportement des fourmis naturelles. Nous



utilisons de la même façon que les fourmis : (1) des phéromones pour la communication indirecte en agents et pour marquer les régions comme déjà explorés cela aide à éloigner les agents de ces dernières, (2) des comportements de volé (comme le font les fourmis lors de la période d'accouplement) vers des zones connus ou aléatoirement, qui permettent aux agents de sortir des zones complètement visités pour aller chercher d'autres zones.

### 3. Plan de mémoire

Ce manuscrit est réparti en trois chapitres:

**Le premier chapitre :** présente le domaine SMA autant que contexte de recherche pour notre problématique, nous rappelons les concepts marquants de ce paradigme de l'agent aux SMA, aux modèles de coordination et de coordination réactive, l'organisation dans les systèmes multi agents et les domaines d'application.

**Le deuxième chapitre :** divisé en trois parties. La première présente le contexte applicatif de nos travaux à savoir l'intelligence en essaim et la robotique en essaim. La deuxième partie focalise sur la présentation du problème traité dans ce travail (l'exploration multi-agents) et la présentation des travaux reliés. Dans la troisième partie, nous présentons une nouvelle branche de robotique mobile qui utilise la multi-locomotion dans des robots (marche, volé, nagé) similaire à des animaux. Ces travaux forment des inspirations pour le cadre applicatif de notre proposition (algorithme FASA- chapitre III).

**Le troisième chapitre :** se compose de deux parties. La première présente la conception du problème contenant les objectifs de l'application et notre algorithme proposé (FASA). La deuxième partie, présente les résultats de mise en œuvre et de test de la solution proposée.

Le présent manuscrit est clôturé par une conclusion récapitulative et quelques perspectives intéressantes à explorer en continuité de ce travail.

# ***Chapitre I : Les systèmes multi-agents***

## **INTRODUCTION**

### **I. AGENT**

#### **I.1. Architectures d'agents**

### **II. Les SYSTÈMES MULTI-AGENTS (SMA)**

#### **II.1. Caractéristiques des systèmes multi-agents**

#### **II.2. Organisation Multi-Agents et principes d'interactions**

#### **II.3. La coordination d'actions**

#### **II.4. Domaines d'application**

## **CONCLUSION**

# CHAPITRE I : LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

## INTRODUCTION

L'intelligence artificielle classique est une discipline scientifique qui vise la modélisation du comportement intelligent d'un seul agent, tandis que l'intelligence artificielle distribuée s'intéresse à des comportements intelligents qui sont le produit de l'activité coopérative de plusieurs agents [Abidi et Lejouad, 93].

Dans la première partie de ce chapitre nous commençons par présenter quelques définitions sur les agents, puis nous citons leurs différentes catégories d'architectures. Dans la deuxième partie Nous nous focaliserons sur les systèmes multi-agents. Nous survolerons leurs caractéristiques, organisation ainsi que les principes d'interaction et les typologies d'organisation. Par la suite nous nous intéressons sur la coordination d'action, nous présentons ses diverses formes, ensuite nous mettons l'accent sur la coordination réactive et enfin nous concluons par aborder les domaines d'application des systèmes multi-agents.

## I. AGENT

Le terme agent est utilisé dans plusieurs domaines il est souvent défini comme étant une entité autonome capable de réaliser des actions [Glad, 11]. Cependant il n'y a pas un accord général sur la définition de la notion d'agent, nous présentons dans ce qui suit quelques définitions plus importantes :

### **Définition 1.1 : Agent selon Le petit robert [Le petit robert, 92]**

*"Un agent . De agere<sup>1</sup> « agir, faire ». (1) Celui qui agit (opposé au patient qui subit l'action). (2) Ce qui agit, opère (force, corps, substance intervenant dans la production de certains phénomènes) » "*

### **Définition 1.2 : Agent selon RUSSELL [Russell, 97]**

*" Un agent est une entité qui perçoit son environnement et agisse sur celui-ci "*

---

1. agere : un verbe latin qui signifie agir.



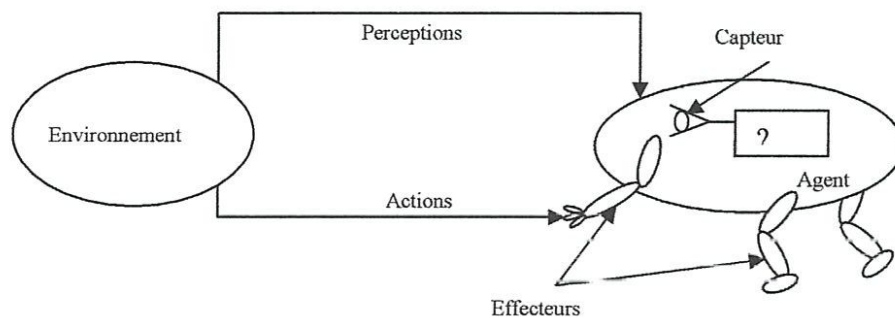
**Définition 1.3: Agent selon RUSSELL et NORVIG [Russell et Norvig, 95]**

" Un agent est tout ce qui peut être vu comme percevant son environnement au moyen de capteurs et agissant sur cet environnement au moyen d'effecteurs<sup>2</sup>".

**Definition 1.4: Agent selon WOOLDRIDGE et JENNINGS [Wooldridge et Jennings, 94]**

" Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome pour atteindre les objectifs (buts) pour lesquels il a été conçu ".

La figure I.1 donne un aperçu de l'interaction d'un agent avec son environnement.



**Figure I. 1.** Interaction de l'agent avec son environnement [Russell & Norvig, 95].

Les définitions précédentes définissent l'agent comme entité en isolation et ne prennent pas en considération la dimension sociale. Dans ce qui suit, nous présentons quelques définitions qui considèrent l'existence d'autres agents ainsi que la notion de l'interaction entre eux et avec leur environnement.

**Définition 1.5 : Agent selon SHOHAM [Shoham, 93]**

" Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent ".

**Définition 1.6 : Agent selon FERBER [Ferber, 95]**

" Une entité physique ou virtuelle qui :

- Est capable d'agir dans un environnement ;
- Peut communiquer directement ou non avec les autres agents ;
- Peut être menée par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuel sous de fonction de satisfaction/survie qu'elle essaie d'optimiser) ;
- Possède des ressources propres ;

<sup>2</sup> .An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting up on that environment through effectors.



- Capable de percevoir son environnement (mais de manière limitée) ;
- N'a qu'une représentation partielle de son environnement;
- Possède des compétences et peut offrir des ressources ;
- Peut être capable de se reproduire ;

*Et dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences qu'elle possède tout en dépendant de ses perceptions, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit ".*

Par ailleurs un agent peut aussi être défini par rapport à ses propriétés.

**Définition 1.7 : Agent selon JENNINGS, SYCARA et WOOLDRIDGE [Jennings et al., 98]**

*"Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu ".*

Selon les auteurs dans [Maes, 94][O'Hare et Jennings, 96][D'Inverno et al., 97], un agent est une entité logicielle d'un système informatique doté des propriétés suivantes :

- **Autonomie** : les agents contrôlent leurs actions et leurs états internes. Le système dans son ensemble est capable de réagir sans l'intervention d'un humain ou d'un autre agent.
- **Flexibilité** : l'agent dans ce cas est capable de répondre à temps, l'agent doit être capable de percevoir son environnement et élaborer une réponse dans les temps requis.

### **I.1. Architectures d'agents**

Le terme "architecture" est utilisé dans l'intelligence artificielle avec différentes façons. Le point de vue le plus concret consiste en ce qu'une architecture est une collection spécifique de logiciel (matériel) typiquement désignés par des boîtes avec des flèches indiquant le flux de données et de contrôle entre les modules[Kaelbling, 91].

C'est une méthodologie particulière pour créer des agents. Elle spécifie comment l'agent peut être décomposé dans la construction d'un ensemble de modules de composants et comment ces modules doivent être faits pour interagir [Maes, 91].

Dans un espace multidimensionnel les agents sont classés selon leurs diverses propriétés en trois types d'agent : **agents cognitifs, agents réactifs et agents hybrides.**

### I.1.1. Les agents cognitifs

Les agents cognitifs sont des agents qui effectuent une certaine délibération pour choisir leurs actions. Une telle délibération peut se faire en se basant sur les buts de l'agent ou sur une certaine fonction d'utilité. Elle peut prendre la forme d'un plan qui reflète la suite d'actions que l'agent doit effectuer en vue de réaliser son but [Chaib-Draa et al., 01].

L'architecture BDI (*Beliefs, Désires, Intentions*) est une classe importante de modèles cognitifs dans le domaine de l'intelligence artificielle. Ces modèles reposent sur trois ensembles principaux :

- **croiances (*Beliefs*)** : Les croyances d'un agent sont les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement. Les croyances peuvent être incorrectes, incomplètes ou incertaines et à cause de cela, elles sont différentes des connaissances de l'agent, qui sont des informations toujours vraies. Les croyances peuvent changer au fur et à mesure que l'agent, par sa capacité de perception ou par l'interaction avec d'autres agents, recueille plus d'information.
- **Désirs (*Desires*)** : Les désirs d'un agent représentent les états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir réalisés. Un agent peut avoir des désirs contradictoires ; dans ce cas, il doit choisir parmi ses désirs un sous-ensemble qui soit consistant. Ce sous-ensemble consistant de ses désirs est parfois identifié avec les buts de l'agent.
- **Intentions (*Intentions*)** : Les intentions d'un agent sont les désirs que l'agent a décidé d'accomplir ou les actions qu'il a décidé de faire pour accomplir ses désirs. Même si tous les désirs d'un agent sont consistants, l'agent peut ne pas être capable d'accomplir tous ses désirs à la fois.

Un agent BDI doit mettre à jour ses croyances avec les informations qui lui proviennent de son environnement, décidé quelles options lui sont offertes, filtrer ces options afin de déterminer de nouvelles intentions et poser ses actions en se basant sur ses intentions [Chaib-Draa et al., 01].

L'architecture BDI d'un agent est représentée dans la figure I.2.

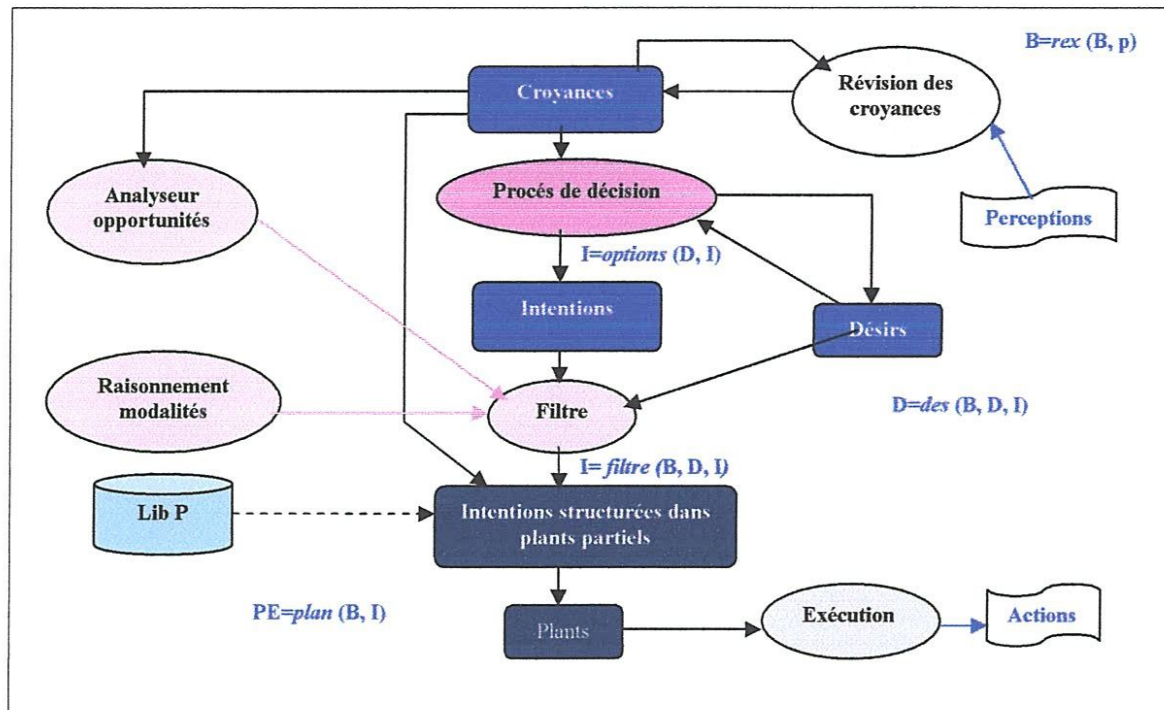


Figure I. 2. Architecture BDI d'un agent [1].

### I.1.2. Les Agents réactifs

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 en appliquant certaines règles prédéfinies. La relation d'un agent réactif à son environnement est un couplage par stimulus/réaction. Dans ce cadre, la perception dénote le fait pour l'agent de ne considérer que certains éléments constitutifs de son environnement, qui seront les entrées ou les stimuli, auxquels correspondront des réactions sous la forme d'actions (voir Figure I.3). Le comportement des agents réactifs est donc basé sur le principe de l'action comme réaction à un stimulus [Drogoul, 93].



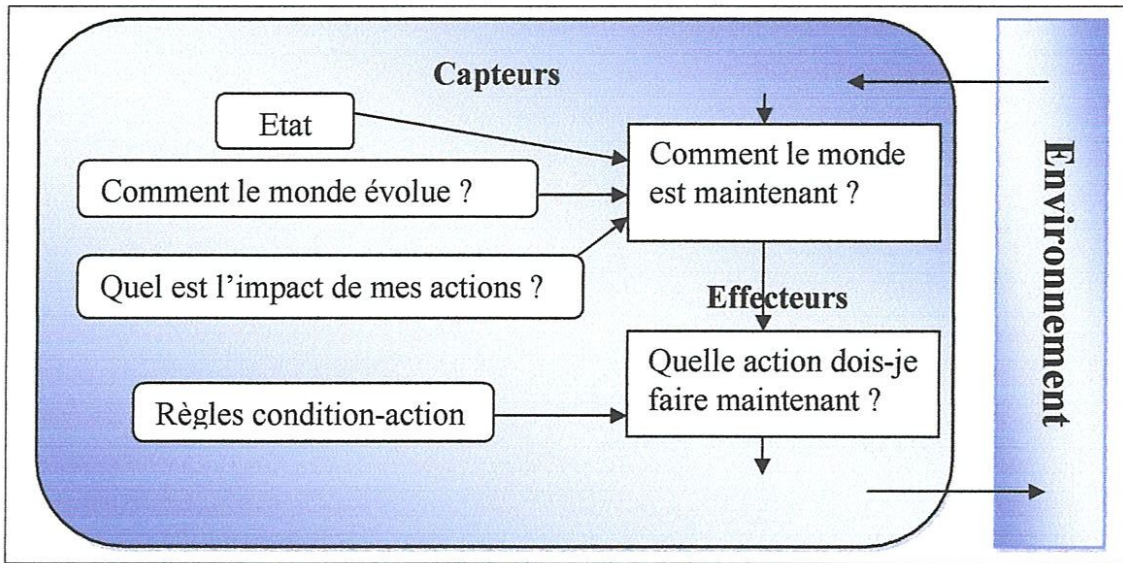


Figure I.3. Architecture réactive [Russell et Norvig, 95].

### I.1.3. Les agents hybrides

Dans ce type d'architecture, les couches sont arrangées de manière hiérarchique. Les différents niveaux de la hiérarchie traitent les informations provenant de l'environnement à différents niveaux d'abstraction. La plupart des architectures considèrent que trois couches suffisent amplement [Chaib-Draa et al., 01].

Au lieu d'avoir un seul agent en charge de l'intégralité d'un problème, plusieurs agents sont considérés, et qui n'ont chacun en charge qu'une partie de ce problème. La solution au problème initial est alors obtenue au travers de l'ensemble des comportements individuels et des interactions, c'est à dire par une résolution collective, comparable à celles observées dans les systèmes biologiques [Deneubourget al., 91].

Après avoir vu dans la première partie de ce chapitre ce qu'est un agent ainsi que ses diverses architectures, nous allons parler dans la partie qui se suit sur les concepts liés aux systèmes multi-agents. Dans un premier temps nous allons voir les définitions de ces derniers. Puis, Nous allons présenter leurs caractéristiques. Ensuite, nous allons nous intéresser à l'organisation et aux principes d'interaction dans ces systèmes.

## II. Les SYSTÈMES MULTI-AGENTS (SMA)

Les SMA sont devenus, depuis quelques années, un domaine de recherche en pleine effervescence et suscitant de plus en plus d'intérêt parmi la communauté scientifique. Il s'agit d'un paradigme assez récent des sciences et technologies de l'information et de la communication, principalement issu du domaine de l'IA mais qui prend aussi ses sources



d'inspiration de plusieurs autres disciplines telles que l'informatique répartie, les sciences cognitives, la sociologie, etc. Par ailleurs, le domaine des SMA s'articule autour de nouvelles notions telles que l'autonomie, la décentralisation et l'interaction [Hmida, 13].

**Définition 1.8 : SMA selon BOND et GASSER [Bond et Gasser, 88]**

*"Un ensemble d'entités qui coordonnent leurs connaissances, buts, expériences et plans pour agir ou résoudre des problèmes, incluant le problème de coordination inter agents lui-même".*

**Définition 1.9 : SMA selon FERBER [Ferber, 95]**

*"On peut définir un système multi-agents comme un système composé des éléments suivants:*

- *Un environnement (par exemple un espace disposant d'une métrique) ;*
- *Un ensemble d'objets situés, c'est-à-dire auxquels on peut associer une position dans l'environnement ;*
- *Un ensemble d'agents, qui sont des objets particuliers (les agents diffèrent des autres objets par leur capacité à agir sur eux mêmes et sur l'environnement) ;*
- *Un ensemble de relations, ou de contraintes, qui unit des objets et/ou des agents entre eux ;*
- *un ensemble d'opérations déterminant les façons dont les agents peuvent agir sur les objets ;*
- *un ensemble d'opérateurs représentant la façon dont ces actions sont effectuées et leur effet sur l'environnement ".*

Les systèmes multi-agents reposent sur le principe de faire interagir plusieurs agents entre eux pour réaliser un objectif global. Chacun de ces agents détient une représentation partielle de son environnement, et possède des connaissances et des compétences propres qui lui permettent d'évoluer dans l'environnement commun de manière à satisfaire son but local.

Les composantes d'un système multi-agents sont représentées par la figure I.4

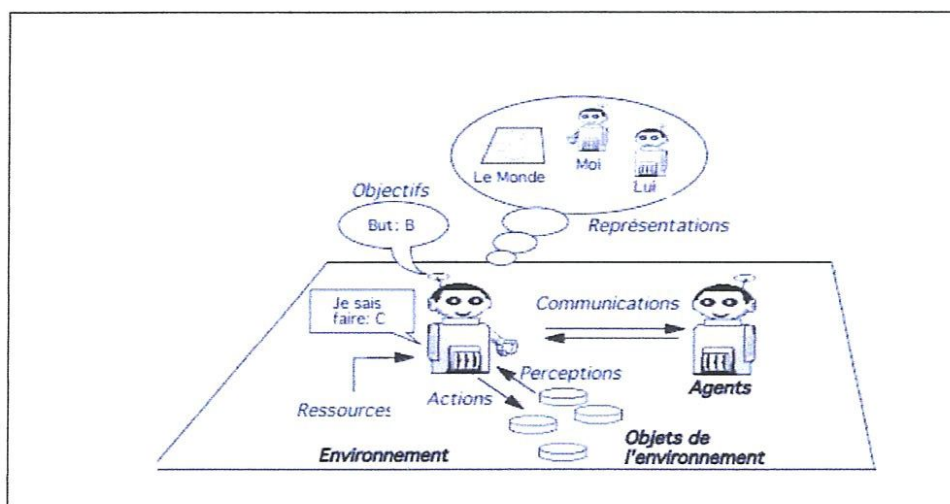


Figure I.4. Représentation d'un SMA [Ferber, 95].

**Définition 1.10 : SMA selon FAYECH [Fayech, 01]**

*"Un système multi-agents est un réseau d'agents (solveurs) faiblement couplés qui coopèrent ensemble pour résoudre des problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chaque agent".*

Les agents d'un SMA sont regroupés en relations organisationnelles et ont chacun "une sphère d'influence", c'est-à-dire que chaque agent possède le contrôle d'une partie de l'environnement. Ces sphères d'influence peuvent parfois interférer et c'est ce qui engendre les situations d'interactions entre les agents des diverses organisations. La force du paradigme multi-agents provient de la flexibilité et de la variété des types de ces interactions et des modèles d'organisation impliqués dans de tels systèmes. Par ailleurs, les SMA doivent leurs succès à bien d'autres raisons, principalement du fait qu'ils répondent à certains besoins et qu'ils présentent certaines caractéristiques fonctionnelles qu'on ne retrouve pas forcément dans les autres technologies telles que la technologie orientée-objet [Green, 97].

**II.1. Caractéristiques des systèmes multi-agents**

Il est important à ce stade de distinguer entre les caractéristiques fonctionnelles des SMA et les besoins non fonctionnels auxquels ils peuvent répondre tels que l'extensibilité, la portabilité, la fiabilité ou la robustesse [Boissier, 04]. Selon les applications, ces caractéristiques ne sont pas forcément toutes nécessaires. Nous nous présentons dans ce qui suit une liste où nous référons à une étude effectuée dans [Boissier, 04]:



- **L'autonomie** : se définit en trois points essentiels : l'existence propre et indépendante de l'agent, le maintien de sa viabilité en dehors de contrôle extérieur et la prise de décision en tenant compte uniquement de ses perceptions et de ses connaissances.
- **La distribution** : est une caractéristique qui répond au besoin de distribution physique des connaissances et des traitements. Dans un environnement multi-agents, la distribution signifie donc que plusieurs agents participent à la réalisation d'un objectif global en se partageant les connaissances, les traitements, les tâches et les ressources.
- **La décentralisation** : c'est la répartition du contrôle, peut être dictée entre autres par des contraintes liées à la distribution physique du système ou par des limitations des capacités de décision globale.
- **La communication** : permet aux agents d'échanger des informations et assure la cohérence du comportement du système. Il existe deux moyens de communication indirectement en agissant sur l'environnement commun ou bien directement en s'envoyant des messages de manière souvent asynchrone.
- **L'interaction** : Les agents interagissent au sein de l'environnement dans lequel ils évoluent. Ces interactions permettent ainsi d'exprimer des stratégies de coopération, de collaboration, de compétition, de négociation entre les agents.
- **L'organisation** : Les organisations offrent un moyen de spécifier et de concevoir une structure du SMA qui définit l'ensemble des rôles et des relations existant entre ces rôles.
- **L'adaptation** : est la capacité du système à modifier son comportement en cours de fonctionnement pour l'ajuster dans un milieu dynamique.
- **L'ouverture** : les SMA sont caractérisés par l'ouverture qui se manifeste par l'évolution fonctionnelle (ajout, la modification ou la suppression d'entités système).
- **L'émergence** : est l'apparition progressive de comportements non spécifiés a priori au sein du système. En effet, la fonction globale du système est attendue à partir des spécifications locales de chacun des agents, elle n'est pas programmée à l'avance et elle semble comme résultat des interactions des agents entre eux.

## II.2. Organisation Multi-Agents et principes d'interactions

L'organisation d'un système multi-agents, définit l'architecture globale du système. Elle précise aussi pour chaque agent son rôle et ses fonctions par rapport au groupe, et les règles d'interaction à adopter dans son environnement. Ces organisations d'agents logiciels

s'inspirent des organisations des sociétés humaines et animales, et ce pour la définition des rôles et des interactions [Kamoun, 07].

### II.2.1. Principes d'interaction dans les organisations SMA

La figure I.5 résume les différents types d'interactions possibles entre agents.

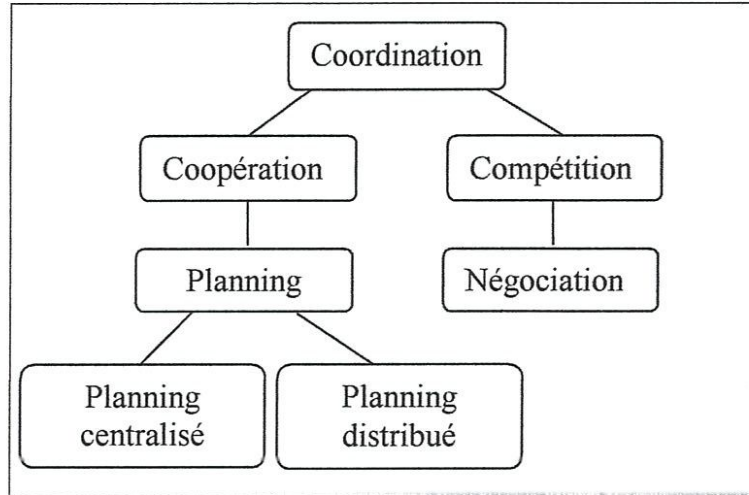


Figure I.5. Formes d'interactions entre agents [Weiss, 99].

#### ❖ Coordination

La coordination est définie selon [Weiss, 99] comme "la propriété d'un système composé d'au moins deux agents, exécutant des actions dans un environnement partagé". Cette notion de ressources partagées dans l'environnement implique la nécessité de la coordination. Les agents devraient coordonner leurs actions individuelles avec les autres pour aboutir à l'objectif global du groupe. Cette coordination permet alors :

- D'éviter les situations de conflits par la négociation pour les agents antagonistes (ayant des buts et des objectifs contradictoires).
- D'améliorer l'efficacité et l'utilité de chaque agent par la coopération pour les agents non antagonistes.

#### ❖ Négociation

C'est une méthode de coordination qui permet à plusieurs agents, d'atteindre -suite à un processus de communication et d'échange d'informations- un accord mutuel pour entreprendre une action donnée d'une certaine manière. Elle induit, par cette communication, des relaxations de buts initiaux, des concessions mutuelles, des mensonges ou des menaces [Fayech, 03]. Elle est donc considérée comme une méthode de résolution de conflits et de recherche de consensus.



### ❖ **Coopération**

D'après [Weiss, 99], la coopération est la coordination parmi des agents non antagonistes, qui cherchent à se satisfaire mutuellement sans se gêner. Cette coopération, initiée par un échange d'information, est souvent associée à la notion de collaboration. La collaboration est une forme d'interaction qui étudie la manière de répartir le travail, et par conséquent l'allocation de tâches, entre plusieurs agents. En effet l'allocation de tâches peut se faire dès la conception du système multi-agents, en définissant une organisation de résolution de problèmes qui est non adaptable. Mais dans d'autres cas, on peut avoir une allocation de tâches qui se fait d'une manière dynamique suite à un processus de coopération entre agents, de manière à ce que la planification des actions individuelles à entreprendre par chaque agent, se fasse aussi d'une manière dynamique.

#### **II.2.2. Typologie des organisations dans les SMA**

Les auteurs dans [Mandiau et al., 02] distinguent deux modèles d'organisation fondamentalement différents :

**1. L'organisation émergente :** Il s'agit d'une organisation qui n'est pas prédéfinie dès la conception du système, mais qui se définit "graduellement" avec les interactions et les échanges inter-agents. Une structure organisationnelle apparaît ou émerge à partir des comportements individuels. Ce type d'organisation fait, généralement, intervenir un grand nombre d'agents et ne dispose pas d'un dispositif pour le contrôle global : "chaque entité, par son action locale, participe au développement de l'ensemble sans qu'aucune d'entre elle ne dirige les autres".

**2. l'organisation support d'activités :** c'est une organisation qui s'inspire des organisations humaines dans les sociétés et notamment dans les entreprises. En effet la structure organisationnelle est prédéfinie dès la conception du système. Elle précise le rôle, les compétences, et les possibilités d'interactions associés à chaque agent. Elle impose aussi un contrôle global au système, qui peut être centralisé (un agent coordinateur) ou décentralisé sur différents agents.

#### **II.2.3. Communication dans les systèmes multi-agents**

Pour se coordonner entre eux, pour négocier, et pour coopérer les agents ont besoin de communiquer. Cette communication peut être directe ou indirecte :

– **La communication indirecte** : se fait en apportant des modifications sur l’environnement. Ainsi un agent émetteur effectue des modifications sur l’environnement ; l’agent récepteur perçoit la modification et interprète le message. L’agent émetteur peut propager des signaux, ou laisser des traces dans l’environnement.

– **La communication directe** : se fait via l’envoi de messages entre agents, elle est souvent associée à une action. Cet acte de communication directe consiste en une transmission d’informations d’un émetteur vers un récepteur. Pour faciliter cette transmission, l’information est codée à l’aide d’un langage, par l’émetteur, et elle est décodée par le récepteur dès son arrivée [Badeig, 05]. Ce phénomène est illustré par la figure I.6.

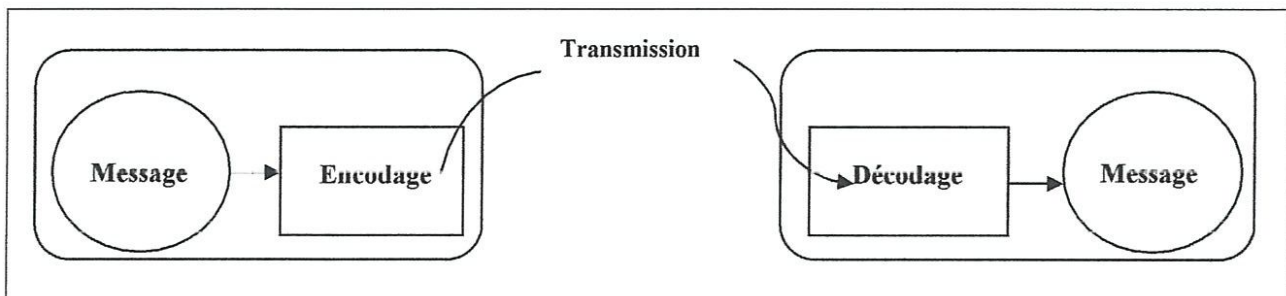


Figure I.6. Principe d'un acte de communication [Kamoun, 2007].

## II.3. La coordination d'actions

### II.3.1. Introduction

Les systèmes multi-agents se composent d'un ensemble d'agents indépendants par le fait que les agents interagissent afin d'effectuer une tâche ou atteindre un but spécifique. Les agents peuvent interagir en communiquant directement entre eux ou par l'intermédiaire d'un autre agent ou même en agissant sur leur environnement [Bonabeau et al., 98].

Durfee et ses collègues [Durfee et Lesser, 89] ont proposé quatre buts généraux afin d'établir la coopération dans un groupe d'agents:

- Augmenter le taux de finalisation des tâches grâce au parallélisme
- Augmenter le nombre de tâches réalisables grâce au partage de ressources (information, expertise, dispositifs physiques, etc.).
- Augmenter les chances de finaliser des tâches en les dupliquant et en utilisant éventuellement des modes de réalisation différents.
- Diminuer les interférences entre tâches en évitant les interactions négatives.

La coopération est la forme générale de l'interaction. Elle est nécessaire quand un agent ne peut pas atteindre ses buts sans l'aide des autres agents. Elle représente la forme d'interaction



qui s'intéresse à la manière de répartir le travail, et par conséquent, l'allocation des tâches entre plusieurs agents [Bayindir et Şahin, 07].

Dans [Ferber, 95] un certain nombre de méthodes de coopération a été proposé sont les suivantes :

- Le regroupement et la multiplication
- La communication
- La spécialisation
- La répartition des tâches, des informations et des ressources
- La coordination d'actions

Dans cette partie de ce chapitre nous allons nous intéresser sur une méthode de coopération qui est : la coordination d'action.

### **II.3.2. Définition de la coordination d'action**

Dans le cadre de la coopération, elle peut être définie comme l'articulation des actions individuelles accomplies par chacun des agents de manière à ce que l'ensemble aboutisse à un tout cohérent et performant [Ferber, 95].

Dans [Boussebough, 11] certains chercheurs distinguent la coopération indirecte qui est due aux actions individuelles émises par les agents faisant évoluer l'environnement et la coopération directe résultante des signaux directs émis par les agents. Donc un système coopératif doit avoir les caractéristiques suivantes :

- C'est un système composé d'agents coopératifs ;
- Ce sont des agents qui doivent accomplir la tâche pour laquelle ils ont été conçus dans un milieu coopératif ;
- Le maintien d'un degré de coopération élevé assure la survie du système.

### **II.3.3. Pourquoi coordonner ?**

Ferber [Ferber, 95] pense que la nécessité de la coordination d'actions se base essentiellement sur les raisons suivantes:

- Les ressources sont limitées : On ne fait parfois attention aux actions des autres que parce que les ressources dont on dispose sont réduites et que d'autres utilisent ces mêmes ressources. Le contrôle du trafic aérien constitue un exemple paradigmatique de la nécessité d'une coordination pour éviter les collisions éventuelles.

- Optimiser les coûts : Coordonner des actions permet aussi de diminuer les coûts en éliminant les actions inutiles et en évitant les redondances d'action. Par exemple, si deux personnes doivent se rendre au même endroit, elles pourront n'utiliser qu'une seule voiture et économiser ainsi l'essence correspondant à un trajet supplémentaire.
- Permettre à des agents ayant des objectifs distincts mais dépendants les uns des autres de satisfaire ces objectifs et d'accomplir leur travail en tirant éventuellement parti de cette dépendance.

### II.3.4. Formes de coordination d'action

Selon Ferber [Ferber, 95] il existe quatre formes de coordination d'action:

1. **Coordination par synchronisation** : Cherche l'enchaînement des actions lorsqu'il s'agit de gérer la simultanéité de plusieurs actions et de vérifier que les résultats des opérations soit cohérent.
2. **Coordination par planification** : Repose sur une répartition de l'action en deux phases : Dans la première nous réfléchissons sur l'ensemble des actions à réaliser afin d'aboutir à un but en produisant un ensemble de plan tandis que dans la deuxième, nous choisissons l'un de ces plans que nous l'exécute.
3. **Coordination par réglementation** : Repose sur le fait de donner des règles de comportement qui ont pour but d'éliminer les conflits possibles. Cette méthode est inspirée du code de la route.
4. **Coordination réactive** : Elle considère qu'il est souvent plus simple d'agir directement sans planifier au préalable ce que nous devons faire. Les agents réactifs sont très simples et ne possèdent pas de représentations de leur environnement. Alors, toutes les informations relatives à leur comportement se trouvent dans l'environnement et leurs réactions dépendent uniquement de la perception qu'ils peuvent en avoir. Les agents réactifs sont donc situés, c'est-à-dire qu'ils ne mémorisent pas les événements passés et ne peuvent pas non plus anticiper sur le futur. Bien que cette simplicité les rende souvent sans défense lorsqu'ils sont utilisés de manière isolée, les agents réactifs prennent leur force du travail en groupe, ce qui leur donne la possibilité de réaliser des actions dont ils auraient été bien incapables individuellement. Les agents déterminent à la fois des contraintes, des capacités d'actions et définissent des relations de coopération privilégiées [Ferber, 95].



### II.3.5. Coordination réactive

La coordination réactive s'intéresse à la coordination des agents non intelligents (réactifs). Elle a vu le jour en intelligence artificiel depuis les années 80, à la suite des travaux de Reynolds sur le flocking [Reynolds, 87], de Khatib sur la navigation de champs de potentiel [Khatib, 86] et de Minsky sur la simulation du comportement du cerveau humain [Minsky, 86]. Elle se présente comme une solution alternative aux approches de planification avec la particularité d'utiliser l'environnement comme élément central de communication où le comportement des agents dépend uniquement de la perception courante de l'agent dans un rayon limité dans son voisinage. L'environnement est utilisé par les agents comme une mémoire partagée dans le but de stocker ou modifier les informations. Cet aspect est connu sous le nom calcul via l'environnement [Simonin, 10]. C'est une approche inspirée de l'étude de processus de la stigmergie<sup>3</sup> introduit initialement par Grassé [Grassé, 59] sur le comportement de construction collective du nid observé chez les termites. Un exemple de la stigmergie classique [Sumpter et Beekman, 03] chez les colonies de fourmis est représenté par les chemins de phéromones, dont les fourmis déposent de phéromone à leurs retour à la fourmilière lorsque une nourriture est trouvée. Cette substance attire et recrute les autres fourmis dans les chemins créés, qui à leurs tours renforcent ces chemins par le dépôts de phéromone, cela résulte en l'apparition d'un réseaux de chemins efficace qui inclut des chemins optimaux vers toutes les localisation de nourriture [Heylighen, 15]. Avec le développement du paradigme agent dans la simulation informatique, les insectes sociaux ont été conceptualisés comme des essaims d'agents simples, qui peuvent collectivement réaliser des tâches complexes à l'aide de la stigmergie connu sous le nom intelligence en essaim [Deneubourg et al., 92] [Bonabeau et al., 99] [Kennedy, 06].

La stigmergie a vu une large diffusion dans divers domaines depuis les années 1990. Elle a été appliquée non seulement aux agents logiciels mais à leurs analogues aussi : Les robots autonomes dans le domaine de la vie artificielle, de l'intelligence artificielle et la robotique mobile vu que ses capacités à résoudre des tâches compliquées sans aucune planification, aucun contrôle et aucune interaction directe [Heylighen, 15].

Dans les années 2000, l'étude du modèle par marquage de phéromone prend différentes formes. En particulier, par la généralisation de processus de diffusion /évaporation de phéromone sur

---

3. La stigmergie est un concept biologique énoncé par Grassé [Grassé, 1959] qui réfère à l'utilisation de l'environnement, par un groupe d'agent, comme moyen de communication et de coordination à travers l'utilisation de marqueurs chimiques, les phéromones.

des environnements grille s'appellent phéromones digitales [Panait et Luke, 04] [Sauter et al., 05] [Sauter et al., 02].

Certains travaux visent à traiter le marquage de l'environnement par des valeurs entières permettant la création des champs de potentiels numériques (marquage passif).

Ils existent plusieurs méthodes de la coordination réactive qui se résument à l'utilisation des techniques suivantes [Ferber, 95] :

1. L'utilisation de champs de potentiels ou plus généralement de vecteur pour la détermination du déplacement des agents mobiles
2. L'utilisation de marque pour coordonner l'action de plusieurs agents, ces marques peuvent exploiter l'environnement comme un système de communication souple, robuste et simple
3. L'utilisation de l'éco-résolution: c'est une méthode de résolution par coordination à reformuler un problème en un ensemble d'agents en interaction - les éco-agents - qui tendent de satisfaire individuellement leur propre but. Chaque éco-agent tente de réaliser son but, et s'il perçoit un gêneur il l'agresse. Un agent agressé tente de fuir en tenant compte des contraintes de son agresseur.

## II.4. Domaines d'application

Les SMA sont un cadre propice pour la conception et la réalisation de systèmes complexes, ouverts, coopératifs, décentralisés et à des niveaux d'abstraction de plus en plus évolués. Ils possèdent des champs d'application très vastes couvrant des domaines scientifiques très variés. Selon [Boissier, 2004] Les champs d'application des SMA peuvent être regroupés en trois grandes catégories:

- **La résolution** : Cette catégorie englobe les applications destinées à résoudre des problèmes complexes tels qu'ils sont définis en IA classique, étendue à un contexte d'informatique distribuée. Dans ce cadre, les agents participent à la résolution d'un problème global en se partageant les tâches, les ressources et les connaissances. Comme :
  - **La robotique mobile** : c'est le fait d'intervenir au moins deux robots qui doivent coordonner leurs déplacement coopérer à l'accomplissement de tâches telles que nettoyer le plancher, surveiller des bâtiments, intervenir pour secourir des personnes, réparer des canalisations ou explorer des espaces lointains ou dangereux [Ferber, 95]. De nombreuses contributions ont été



avancées dans ce domaine, notamment par M. Mataric [Mataric, 94], L. Steels [Steels, 94a][Steels, 94b] et J.-L. Deneubourg [Beckers et al., 94].

- **La coordination de véhicules** : qu'il s'agisse d'avions, de voitures ou de bateaux, appartient à ce domaine d'application. Plusieurs véhicules, en se déplaçant, risquent de se gêner mutuellement [Ferber, 95].
- **L'intégration** : Cette catégorie englobe les applications qui visent à intégrer des logiciels existants, des systèmes mécaniques et des êtres humains et à faire inter opérer l'ensemble d'une manière cohérente. On peut citer par exemple les applications de commerce électronique, de collecticiel ou d'informatique diffuse.
- **La simulation** : Cette catégorie englobe les applications destinées à modéliser et à reproduire des phénomènes du monde réel tels que les phénomènes sociaux, environnementaux ou éthologiques, afin de les comprendre et d'expliquer les comportements émergents.

## CONCLUSION

La première partie de ce chapitre s'est intéressée au concept d'agent. Une multitude de définitions de cette notion, les types des agents ont été présentés. La deuxième partie de ce chapitre s'est focalisée sur les systèmes multi-agents. En plus des définitions, nous avons présenté les concepts d'interaction et d'organisations fondamentales dans ces systèmes puisqu'il s'agit du concept qui assure le lien entre les comportements individuels des agents et le comportement global qui en résultent. La troisième partie s'est concentrée sur les techniques de coordination dans les systèmes multi-agents plus spécifiquement celle abordée dans notre travail: *la coordination réactive*. La quatrième partie s'est attardée sur les domaines d'applications des SMA.

# ***Chapitre II : Travaux reliés - Etat de l'art***

## **INTRODUCTION**

### **I. CONTEXTE APPLICATIF**

**I.1. Intelligence en essaim**

**I.2. Robotique en essaim**

### **II. EXPLORATION MULTI-AGENTS**

**II.1. Définition**

**II.2. Approches existantes**

**II.3. La robotique avec locomotion Multi-modale**

## **CONCLUSION**



## CHAPITRE II : TRAVAUX RELIES - ETAT DE L'ART

### INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'une coordination des agents aboutira à la réalisation collective d'une tâche donnée, le recours aux techniques "classiques" de l'IA (apprentissage, planification, théorie de la décision approches symboliques, . . .) pour assurer cette coordination s'avère difficile à mettre en œuvre dès que le nombre d'agents augmente [Charrier, 09]. A partir de ce constat des approches décentralisées voient progressivement le jour, certaines de ces approches fondent sur l'observation des espèces du monde vivant où l'activité de chacun des individus combinée à celle de tous les autres selon des principes d'interaction souvent très simples qui fait émerger une organisation fonctionnelle à l'échelle de la société. Lorsque cette organisation permet de résoudre des problèmes, elle peut être assimilée à une forme d'intelligence, qui apparaît seulement lorsque les individus sont en groupe. Cette intelligence "en groupe" est appelée intelligence "en essaim" (swarm intelligence en anglais) [Gamier, 08].

Ce chapitre présente le contexte applicatif de notre travail : l'intelligence en essaim, la robotique en essaim et les travaux reliés.

Ce chapitre se divise en trois parties : la première présente le contexte applicatif de nos travaux, la deuxième partie concerne des définitions du problème traité dans ce travail à savoir l'exploration multi-agents des environnements inconnus et la présentation des travaux reliés. Dans la troisième partie nous <sup>nous</sup> focalisons sur une nouvelle branche de robotique mobile qui présente la multi-locomotion similaire à des animaux d'où nous avons inspiré notre nouvel algorithme d'exploration (algorithme FASA- chapitre III)

### I. CONTEXTE APPLICATIF

#### I.1. Intelligence en essaim

Aujourd'hui, l'intelligence en essaim est un champ de recherche scientifique, multidisciplinaire, qui s'intéresse aux processus distribués (*i.e.* non supervisés) d'organisation et de résolution de problèmes présents dans un certain nombre de sociétés animales et dans des systèmes artificiels qui en sont inspirés [Garnier, 08].

### I.1.1. Définition

Le terme d'intelligence en essaim est apparu au cours de l'année 1989 dans des publications de Beni, Hackwood et Wang portant sur les systèmes de robotique cellulaire [Garnier, 08]. Dans un article plus récent [Beni, 05], Gerardo Beni revient sur cette terminologie et son extension à d'autres contextes scientifiques. Il raconte que, Alexander Meystel qualifia son système de "sort of swarm" (genre d'essaim). Trouvant l'expression accrocheuse, il choisit de la conserver dans ses articles. Les robots cellulaires deviennent des essaims de robots, et l'intelligence développée par ses essaims devient l'intelligence en essaim [Garnier, 08].

#### Définition2.1 : intelligence selon Beni [Beni, 05]

« Une aptitude à générer des schémas ordonnées de façon imprévisible, schémas sur lesquels une analyse est faite par chaque robot pour optimiser si besoin ses actions en vue d'atteindre un objectif collectif fixé à l'avance (formalisé par une certaine fonction) » [Beni, 05].

De façon paradoxale le concept d'intelligence en essaim n'est pas né directement de la biologie, D'ailleurs la définition qu'en donnent Bonabeau, Dorigo et Theraulaz dans [Bonabeau et al., 99] étend la définition de l'intelligence en essaim au-delà du contexte robotique d'origine.

#### Définition2.2 : intelligence en essaim selon Bonabeau et al [Bonabeau et al., 99]

« L'intelligence en essaim inclut toute tentative de conception d'un algorithme ou d'un dispositif visant à résoudre des problèmes de façon distribuée, inspirée du comportement collectif des insectes sociaux ou d'autres sociétés animales. »

Une autre définition de point de vu informatique était proposée par Merkle et Blum dans l'ouvrage [Blum et Merkle, 08] :

#### Définition2.3 : intelligence en essaim selon Merkle et Blum [Blum et Merkle, 08]

« L'intelligence en essaim est une discipline de l'intelligence artificielle moderne qui traite de la conception de systèmes multi-agents en vue d'applications telles que l'optimisation et la robotique. »

nest  
pas  
pertinente

Charrier donne sa propre définition selon son point de vu dans [Charrier ,09]:

#### Définition2.4 : intelligence en essaim selon Charrier [Charrier, 09] :



*« Nous considérons l'intelligence en essaim (informatique) comme un domaine fortement bio-inspiré dont l'objectif est de modéliser au moyen de systèmes multi-agents, les mécanismes d'auto-organisation et d'adaptation observés dans le vivant. Ces modèles donnent lieu à terme à des algorithmes permettant de simuler des phénomènes naturels de façon logicielle (sur ordinateur) ou matérielle (avec des robots), ou bien de servir de métaheuristiques pour les problèmes de l'intelligence artificielle. »*

### **I.1.2. Caractéristiques génériques de l'intelligence en essaim**

Les insectes sociaux sont des maîtres dans l'art de l'organisation des foules, de la construction de structures gigantesques et de la résolution des problèmes à l'échelle de leur société toute entière [Bonabeau et al., 97], [Camazine et al., 01],[Detrain et al., 06]. Ce qui les rend une source importante d'inspiration pour la conception des systèmes artificiels. Mark Millonas [Millonas, 92] a choisi les colonies des fourmis pour tirer une proposition de caractérisation en cinq principes des systèmes d'intelligence en essaim en les résumant ci dessous.

- **Principe de proximité :** Ce premier principe pose la nécessité d'une capacité des entités du groupe à répondre dans une localité spatiale et temporelle aux signaux/stimuli de l'environnement. Cela implique une capacité de calcul local, calcul dont l'objectif est de décider d'un comportement qui maximiserait au mieux l'utilité pour l'activité du groupe entier (par exemple le fourragement, la construction d'un nid, le déplacement de groupe,...) [Charrier, 09].
- **Principe de qualité :** Le groupe doit pouvoir répondre aussi à des critères de qualité par rapport à l'objectif recherché (qualité de la source de nourriture, de l'emplacement du nid,...). Il s'agit là d'optimiser un critère de qualité pour l'essaim [Charrier, 09].
- **Principe de réponse diversifiée :** Le groupe doit pouvoir répondre dynamiquement aux éventuels changements de l'environnement, et donc diversifier autant que possible ses modes de fonctionnement [Charrier, 09].
- **Principe de stabilité :** Ce principe vient compléter et limiter le précédent. Le groupe doit également maintenir une forme de stabilité afin d'éviter de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre au moindre changement de l'environnement, ce qui serait une perte d'énergie considérable [Charrier, 09].
- **Principe d'adaptabilité :** Le changement de mode de fonctionnement, lorsque le mode courant n'est plus suffisamment satisfaisant, s'opère par adaptation à une nouvelle situation environnementale [Charrier, 09].



## I.2. Robotique en essaim

La robotique en essaim constitue l'une des principales applications de l'intelligence en essaim.

### I.2.1 Définition

La robotique en essaim « Swarm Robotics » est une nouvelle approche de la coordination des systèmes multi-robots. Contrairement aux systèmes multi-robots traditionnels qui utilisent un système de contrôle et de communication centralisé ou hiérarchique afin de coordonner les comportements des robots, la robotique en essaim adopte une approche décentralisée dans laquelle les comportements collectifs souhaités émergent d'après les interactions locales entre les robots et leur environnement. Ces comportements collectifs, auto-organisés sont inspirés de l'intelligence d'essaim observé chez les insectes sociaux [Şahin et Winfield, 08].

### I.2.2 Caractéristiques de robotique en essaim

La robotique en essaim, comme son nom l'indique, met en place un groupe de robots qui vont résoudre des problèmes complexes. Mais n'était pas seulement un "groupe". Il y avait quelques caractéristiques spéciales, qui, en fait, on les trouve dans les essaims des insectes.

D'après Beni [Beni, 05] "essaim" n'était pas seulement un mot à la mode, mais un terme tout à fait approprié de distinguer un groupe avec un contrôle décentralisé, manque de synchronisation, simple, des éléments identiques. La taille de groupe aussi est importante, à savoir, le nombre d'unités. Ce n'était pas aussi grand que d'être traitées avec des moyennes statistiques, pas aussi petites que d'être traitée comme un problème quelques-corps. Le nombre d'unités a été pensé pour être réaliste de l'ordre de  $(10^2-10^{23})^4$ .

Alors que Şahin dans [Şahin, 04] voit qu'elle est basée sur les mêmes principes que l'intelligence en essaim ce qui démontrent trois caractéristiques souhaitées pour les systèmes multi-robots: robustesse, flexibilité, extensibilité :

- **La robustesse** peut être définie comme le degré auquel le système peut encore fonctionner en présence partielle des défaillances ou d'autres conditions anormales. Les insectes sociaux sont très robustes. Leurs systèmes auto-organisés peuvent encore travailler même après avoir perdu beaucoup de composants du système ou de modifier les paramètres de l'environnement considérablement [Şahin, 04].
- **La flexibilité** Le système peut s'adapter à un environnement changeant afin de garder une bonne exploitation de celui-ci. La flexibilité et la robustesse ont des définitions en partie

4. Le nombre doit être supérieur ou égale à 100 et inférieur au nombre d'Avogadro «  $10^{23}$  »

contradictoires. La différence entre les deux se produit dans le niveau de problème. Lorsque le problème change, le système doit être flexible (non robuste) suffisant pour passer à un comportement approprié pour résoudre le nouveau problème. Les systèmes biologiques ont ce niveau de flexibilité et peut facilement changer leurs comportements lorsque les problèmes changent [Şahin, 04].

- **L'extensibilité** exige qu'un système robotique en essaim doive être fonctionné avec un grand nombre d'agents. Autrement dit, les mécanismes de coordination qui assurent le fonctionnement de l'essaim doivent être relativement peu perturbés par les changements de taille de groupe [Şahin, 04].

## II. EXPLORATION MULTI-AGENTS

L'exploration robotique a été un domaine de recherche actif depuis le début de la robotique lui-même, à partir du milieu du 20<sup>ème</sup> siècle [De Hoog, 11]. Les premières approches en robotique tenté de créer des modèles internes du monde, mais depuis le milieu des années 1980, il y a eu une plus grande attention sur la robotique réactive et basée sur le comportement [Brooks, 86], [Balch et Arkin, 94]. Maintenant il existe plusieurs applications telles que l'exploration planétaire [Apostolopoulos et al., 01], la reconnaissance [Hougen et al., 00], le sauvetage [Murphy, 04], [Thrun et al., 03], le fauchage [Huang et al., 87], ou de nettoyage [Endres et al., 98], [Jäger et Nebel, 02], [Simoncelli et al., 00] dans lesquelles la couverture complète d'un terrain fait partie des parties intégrantes d'une mission robotique.

### II.1. Définition

L'exploration multi-agents est l'usage de plusieurs robots afin d'explorer un environnement inconnu pour atteindre un but qui consiste à couvrir tout l'environnement dans un coût minimum qui généralement représenté par le temps. Par conséquent, il est essentiel que les robots gardent la trace des zones de l'environnement ont déjà été explorées pour éviter la redondance d'exploration est dans minimiser le temps d'exploration.

Les premiers efforts dans l'exploration robotique ne concernaient que des robots isolés, grâce à la grande disponibilité et fonctionnalité de communication matérielle et technique, attention décalé dans le début des années 1990 vers l'exploration multi-robots [De Hoog, 11]. De nombreux avantages de l'utilisation des groupes au lieu des robots isolés, ont été identifiés dans les littératures [Cao et al., 97], [Rekleitis et al., 97], [Arkin et Balch, 98], [Parker, 98], [Dias et Stentz, 00], [Simoncelli et al., 00], [Zlot et al., 02]



- Plusieurs robots peuvent couvrir plus d'espace en moins de temps qu'un seul robot ;
- Utilisation de plusieurs robots peut conduire à l'amélioration de la localisation par l'observation mutuelle ;
- S'ils sont correctement mises en œuvre, une équipe de robots peut être plus robuste qu'un seul robot en raison de la redondance et l'élimination des points de défaillance ;
- Hétérogénéité peut être un avantage: différents robots au sein de l'équipe peut être particulièrement adapté pour certaines sous-tâches de la mission ;
- Plusieurs robots peuvent échanger des informations et détecter l'environnement à partir de multiples points de vue ;
- En fonction de la tâche, plusieurs robots peuvent aider mutuellement à éviter les obstacles ou collaborer pour manipuler des objets dans l'environnement ;
- Il peut être plus facile de construire et de maintenir de nombreux robots simples au lieu d'un seul robot complexe.

## II.2. Approches existantes

Dans le contexte des problèmes d'exploration multi-robots, l'objectif est de minimiser le temps total d'exploration tout en conservant une faible consommation énergétique des robots. Ceci est difficile à assurer avec l'approche d'exploration basés sur la marche aléatoire où l'agent retourne à la même cellule plusieurs fois, avant d'explorer les autres zones éloignées à cause du manque d'information historique sur les régions déjà visitées. Donc pour atteindre l'objectif désiré il serait efficace de guider l'agent vers des cellules non encore visitées et le repulser de celles déjà visitées. Nous présentons dans ce qui suit les travaux les plus intéressants sur l'exploration multi-agents. Inverse Ant System-Based Surveillance Systems (IAS-SS), est une technique de coordination distribuée et coopérative, appliquée à la surveillance des environnements inconnus [Calvo et al., 11]. Elle est basée sur la version modifiée du système des fourmis artificielle. La zone couverte est marquée avec une quantité de phéromone. La phéromone provoque la répulsion des robots. La marche aléatoire et le guidage stigmergic ont été combinés pour produire une stratégie d'exploration probabiliste guidée pour les environnements inconnus [Kuyucu et al, 12]. Un algorithme basé sur l'intelligence en essaim, pour l'exploration distribuée et le nettoyage [Liu et al., 10], divise toute la carte en un ensemble de sous-espaces distinctes et chaque sous-espaces est divisée en grilles. L'agent calcule dynamiquement la probabilité des sous-espaces et le coût de déplacement vers eux, puis choisit la meilleure pour déplacer selon ses interactions et informations locales. Une communication directe par WIFI est utilisée entre les robots dans le

*C'est vous qui a fait tout cette synthèse*



voisinage. Une synthèse des stratégies d'exploration dans des environnements 2D a été présentée dans [Ghosh et Klein, 10]. L'algorithme S-MASA [Zedadra et al., 14], utilise les phéromones pour guider la recherche, où les agents utilisés sont des agents réactifs sans mémoire. Il peut localiser très rapidement les objets, à un pourcentage proportionnel au nombre des agents. Il fonctionne comme certains animaux, qui recherche leur nourriture autour de leur nid, connu sous le nom central place foraging theory [Orians et Pearson, 79]. Pour le processus d'exploration, la planification de chemin est éminemment nécessaire pour un robot mobile, puisque par définition, un robot accomplit des tâches en se déplaçant dans le monde réel [Latombe, 12], les robots doivent aussi s'éviter, en effet même si l'affectation de frontières leur permet de se répartir dans l'environnement il est possible que plusieurs robots se dirigent vers la même zone ou bien vers des zones distinctes uniquement accessibles par un chemin commun. La planification devra donc prendre en compte la position des autres robots qui sont des obstacles dynamiques [Yan, 12]. La planification de chemin est un problème complexe, reliée au problème d'optimisation. Dans des environnements complètement inconnus, une solution optimale est presque impossible à attendre [Julià et al., 08]. Et des heuristiques ou méta-heuristiques sont utilisés pour améliorer les résultats [Pei et al., 10]. Les principales approches de planification sont des extensions de celles proposées dans le cadre mono-robot. Dans [Bennewitz et al., 01], une approche basée sur l'algorithme de planification [Haumann et al., 10] a été proposée, c'est une méthode aléatoire qui redéfinit itérativement l'organisation des robots pour trouver une séquence correspondante au plan minimisant les longueurs de l'ensemble des chemins à parcourir pour l'ensemble des robots. Une approche basée sur l'algorithme de planification de chemin [Stentz, 94] est ainsi proposée [Guo et Parker, 02] l'optimisation (planification de chemin) est réalisée au niveau du robot individuel en définissant la fonction de coût à minimiser, et aussi au niveau de l'équipe par une fonction de mesure globale reflétant les indices de performance d'intérêt comme une équipe. Dans la littérature, certaines méthodes de planification marquantes se regroupent sous les catégories : la feuille de route probabiliste (Probabilistic Road Map ou PRM) [Kavraki et al., 98], qui a été largement utilisée pour les bras manipulateurs [Saha et Isto, 06] [Sanchez et Latombe, 02]. Une autre méthode probabiliste est l'exploration rapide par arbres aléatoires (Rapidly-exploring Random Tree ou RRT) [La Valle, 98] [Bruce et Veloso, 02]. Le diagramme de Voronoi, est employé en robotique dans la résolution des problèmes d'exploration. Wurm et ses collègues [Wurm et al., 08], présentent une stratégie de coordination d'une équipe de robots explorateurs, utilisant le diagramme de voronoi pour segmenter la carte de



l'environnement en un squelette permettant de définir des chemins. D'autres travaux à base de la feuille de route probabiliste incluent [Canny, 85] [Canny, 87] [Xue et al., 94][Yu et Li, 11] [Haumann et al., 10]. Dans le cadre de *la décomposition de l'espace des configurations (cell decomposition)*, deux grandes familles des approches sont connues sous le nom de décomposition en cellules et de squelettisation. Dans ces méthodes, l'espace initial est divisé en un ensemble de cellules individuelles, puis la relation d'adjacence entre les cellules est calculée. Elles placent les problèmes de planification dans des espaces géométriques discrets. Par association d'une valeur de surface à chaque cellule, la méthode de décomposition en cellules permet un calcul de couverture. L'algorithme ORMSTC (Online Robust multi-robot Spanning Tree Coverage) [Hazon et al., 06], algorithme s'exécutant en ligne, basé sur une de composition approximative en cellules, est l'un des algorithmes les plus connus dans ce cadre, Une approche nommée champ de potentiel artificiel (**Artificial Potential Field** ou **APE**) est largement utilisée pour le contrôle de formation des systèmes Multi-Robots, lié au problème de planification. Khatib [Khatib, 86], été le premier a appliqué les champs de potentiel artificiel à la planification de mouvement d'un robot. Tanner et Kumar [Tanner et Kumar, 05] ont présenté une stratégie pour des ensembles de robots dans des formations choisies.

Certaines des méthodes présentées posent des problèmes qui rendent inefficaces en réalité :APF(minima locaux), Silhouette (complexité inévitable dans les environnements de grande taille), De nouvelles méthodes sont ainsi présentées pour surmonter de tels problèmes tels que : **PRM** et **RRT** (pour les espaces de grande dimension), des heuristiques et méta-heuristiques telles que : réseau neuronal artificiel [Zacksenhouse et al., 88][Engedy et Horváth, 09], les algorithmes génétiques [Parker et al., 89][Boeringer et Wemer, 03], les essaims des particules[Kennedy, 11][Peyvandi et al., 11], recuit simulé [Carriker et al., 90][Miao et Tian, 08], optimisation de colonie de fourmi [Deneubourg et al., 94][Zhao et Fu, 12], la théorie des ondelettes [Altes, 90][Takano et Suzuki, 11], la logique flou [Vachtsevanos et Hexmoor, 86][Chen et Lian, 10] et recherche tabu [Muller et al., 95] [Masehian et Naseri, 08] (pour le problème des minima locaux). En réalité, les heuristiques n'atteignent pas nécessairement la solution optimale, mais il rapproche une solution candidate plus rapidement que les méthodes déterministes. D'autres alternatives ont été proposées dans le cadre d'évitement des minima locaux dans les approches basé le système des fourmis artificielles [Kuyucu et al., 12] [Oliveira et al., 14] [Cazangi et al., 06]. Ce travail exploite la communication stigmergic (la phéromone) dans une recherche aléatoire stratégique pour résoudre le problème d'exploration multi-agents dans les environnements inconnus.

Bien que ces approches se révèlent un succès, les avantages supplémentaires que peuvent apporter plus d'adaptabilité sont également recherchés.

Les travaux sur l'exploration multi-robots (multi-agents) dans leur totalité s'intéresse à l'utilisation d'un robot ou plusieurs avec un seul type de locomotion. Dans la littérature, des travaux sur la réalisation de robots avec locomotion multi-modale par imitation du comportement des animaux. Dans ce qui suit, nous présentons une liste des travaux qui peuvent être utilisés pour une implémentation réelle de notre algorithme proposé.

### **II.3. La robotique avec locomotion Multi-modale**

La plupart des robots existants sont conçus pour explorer uniquement par un mode de locomotion unique, tel que la marche, le volé, la natation ou le saut, ce qui limite leur flexibilité et leur capacité d'adaptation aux différents environnements où des spécifiques et différentes capacités de locomotion pourraient être plus efficaces. La locomotion principale des nombreux animaux est généralement mono-modale; où la majorité de leurs tâches dans l'espace exigent qu'une seule modalité, et un besoin minimal de substitution morphologique pour le transport. Certains organismes cependant, fonctionnent aux niveaux élevés de compétence [Lock et al., 13], Ceci pouvant être une source d'inspiration précieuse pour la conception de robots multi-modale.

Les modes de locomotion dans la nature peuvent être décomposés largement en trois catégories; terrestre, aérien et aquatique. Il y a des situations floues telles que le mouvement sur la surface d'eau ou dans le tunnel souterrain, mais généralement les modes de locomotion utilisés par les animaux peuvent être classés dans l'un de ces trois catégories [Low et al., 15].

Les locomotions aérienne-terrestre terrestre-aquatique aquatique-aérienne ont été largement étudiés par les chercheurs tandis que l'aérienne-terrestre-aquatique n'est pas encore concernée.

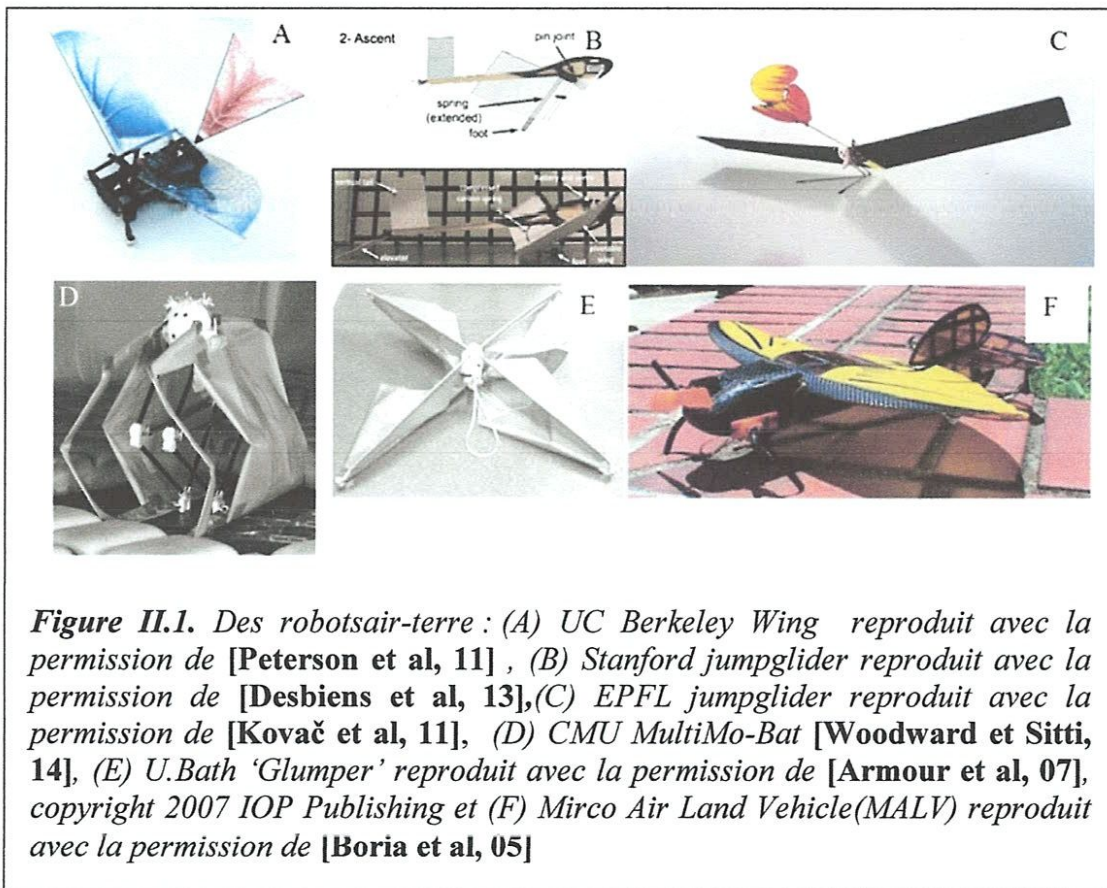
Les sections suivantes fournissent des exemples réussis d'applications multimodales.

#### **II.3.1. Robotique à locomotion aérien-terrestre**

La combinaison des locomotions aérien-terrestre apporte l'avantage d'une couverture efficace des zones vastes, d'un déplacement rapide à travers les longues distances, d'une exploration en profondeur pour les régions spécifiques sur le terrain, par exemple : recherche des victimes piégées dans des bâtiments partiellement effondrés [Daler et al., 15], plus l'évitement facile des différents obstacles. Les robots air-terre utilisent la mobilité terrestre



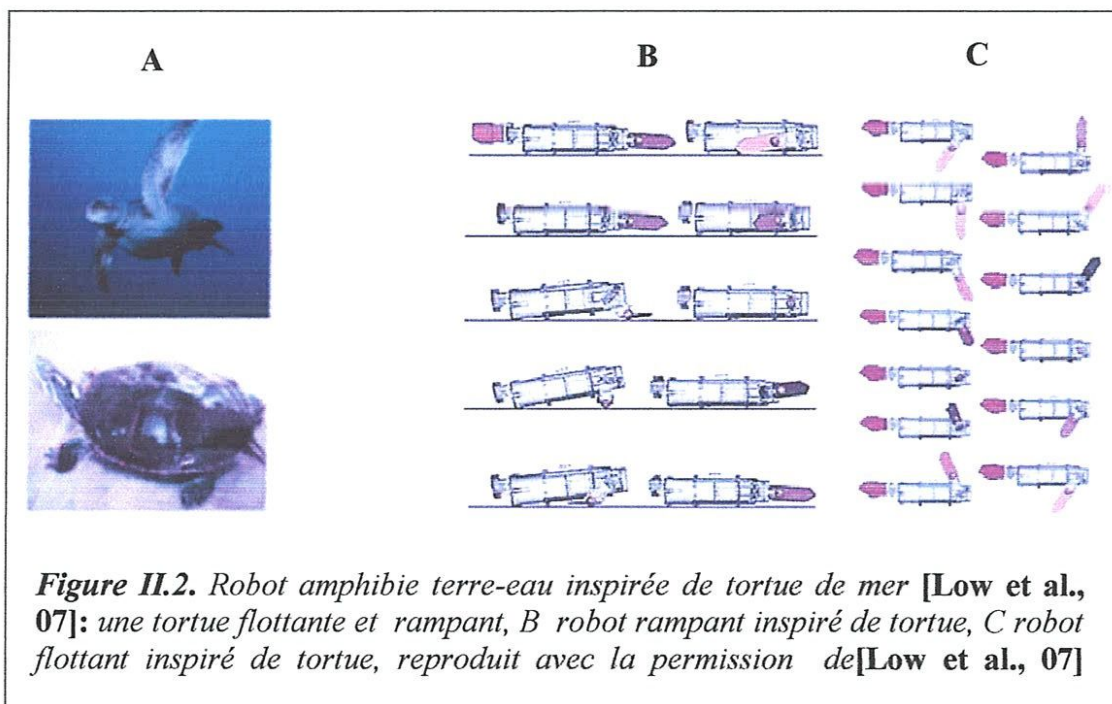
comme un moyen de faire la transition entre la terre et l'air soit en marchant, rampant ou en sautant. Ceux qui transitent en sautant « Sauter-glisser » fait l'objet de plusieurs groupes de recherche (voir prototypes développés en Figure II.1. (A)–(D)) [Lock et al., 13] avec la motivation de réduire le coût énergétique de transport. Une classe apparentée de robots mobiles inclut les véhicules hélices ou (flapping-wing-propelled) en ajoutant la mobilité [Peterson et al., 11] au terrain par l'utilisation des jambes ou les ailes (figure II.1. (E) et (F)). Ces robots hybrides offrent la preuve de concept d'implémentation de mobilité multi modales pour les véhicules aériens, et ils démontrent le potentiel de la combinaison des locomotions aérien-terrestre.



### II.3.2. Robotique à locomotion terrestre-aquatique

La majorité des travaux faits dans le cadre de la robotique à locomotion multi-modale se focalisent sur des robots qui combinent la locomotion terrestre-aquatique [Lock et al., 13]. L'observation expérimentale sur la locomotion multi-modale terrestre-aquatique est souvent limitée aux comportements volontairement exécutés par des animaux amphibies. Un exemple est la version étanche à l'eau dans la série RHex des robots rampants celle qui a été équipé par

des pieds en forme d'ailerons qui lui permettent de nager sous l'eau [Georgides et al., 04]. Low et al [Low et al., 07] ont proposé et développé les modèles d'action d'un robot amphibie terre-eau : la natation, la marche inspirée par les tortues de mer, comme il est représenté dans la Figure II.2. Tant que le robot AmphiBot I et l'ultérieure conception AmphiBot II sont capables de faire les deux locomotions terrestre et aquatique en utilisant la technique d'ondulatoire d'un serpent quand il est sur la terre et la technique de natation anguilliforme un peu comme un serpent de mer quand il est dans l'eau [Crespi et al., 05] [Crespi et Ijspeert, 08]. Un autre exemple est AmphiRobot qui utilise la propulsion à roues pour le déplacement sur terre et les ondulations du corps dans l'eau [Ding et al., 10].



L'obstacle majeur dans les conceptions des robots amphibie est la nécessité de rendre le système électrique imperméable à l'eau.

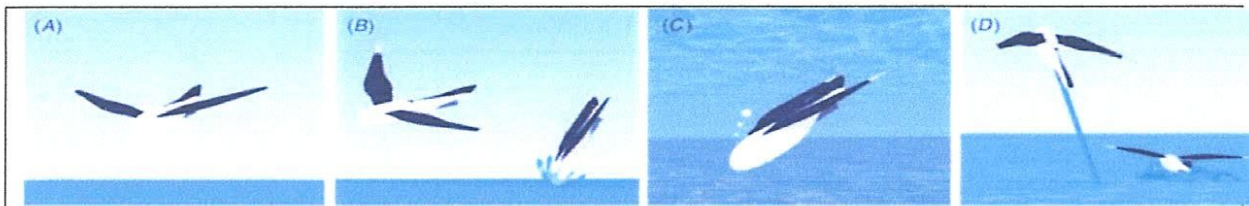
### II.3.3. La robotique à locomotion aérien-aquatique

Dans le royaume animal, la combinaison d'antenne avec la locomotion sous-marine est très répandue, plusieurs espèces capables de faire la transition entre les deux modes de façon très efficace, mais sur les plates-formes multimodales actuellement développés, les véhicules avec la dualité de fonction permettant les modes de locomotion aériens et aquatiques sont de loin le plus immature des cas [Lock et al., 13]. Bien qu'aucun véhicule aquatique vraiment volant n'existe avant le 2014, des études ont récemment été menées sur la mise en œuvre de capacité de plongée dans un véhicule volant. Liang et ses collègues [Liang et al., 13] ont conçu des



tests d'une plate-forme capable de se replier ses ailes avant de plonger dans l'eau. Cependant, ce dispositif est actuellement une plate-forme expérimentale utilisée pour évaluer les conditions requises pour un véhicule plongeur plongée et ne possède pas encore la capacité de vol. Tan que Lock [Lock, 11] utilise des données expérimentales pour élaborer un modèle pour l'effet de dimensionnement et modulation les ailes sur les besoins d'énergie dans l'air et l'eau inspiré du guillemot, mais ce travail n'a pas été développé dans un robot pratique.

D'autre part beaucoup de véhicules robotiques aériens existants qui utilisent la surface d'eau comme une piste allongée. Deux exemples d'UAV (Unmanned Aerial Vehicle) hydravions sont Warrior Aero-marine 'Gull' (le combattant 'Gull') et 'flying fish' d'université de Michigan. Le premier véhicule est exploité à distance, mais il est capable d'atterrir et le décoller de façon autonome, tandis que 'flying fish' est entièrement autonome et conçu pour fonctionner comme une bouée de surveillance mobile [Siddall et Kovač, 14]. En 2014 Siddall et Kovač [Siddall et Kovač, 14] ont réussi de concevoir Aquatic Micro Air Vehicle (AquaMAV) multimodale qui peut voler efficacement, plonger dans l'eau et de reprendre le vol, il permettrait les applications de surveillance distribuée de qualité de l'eau, des recherches et des opérations de sauvetage et d'exploration sous-marine Figure II.3.



**Figure II.3.** Chaque étape de mission aérienne-aquatique pose différents défis pour AquaMAV : (A) vol sec, (B) l'entrée dans l'eau, (C) mouvement immergée, (D) la sortie hors l'eau [Siddall et Kovač, 14].

#### II.3.4. Les principes de conception des locomotions multi-modale dans la robotique

A cause de la différence morphologique des espèces animales, Chacun d'eux ont ses propres stratégies et méthodes de déplacements, même s'ils ont des modes de locomotion commune. Considérant que les comportements des robots sont inspirés de ceux des espèces animales, chaque robot a une stratégie de locomotion particulière. Cette stratégie peut être par fois semblables et d'autre fois se diffère d'un robot à un autre. Les tableaux (Tableau II.1 ; Tableau II.2 ; Tableau II.3) illustrent les différents principes de conception de la locomotion dans la robotique.



Robot	Animal	L.Terrestre	L.Aérienne
UC Berkeley Wing [Peterson et al., 11]	les oiseaux et les insectes volants	La course avec ses 6 pieds	battement des ailes
Stanford jumpglider [Desbiens et al., 13]	Polatouche	La marche	utiliser des surfaces aérodynamiques sur leur corps pour étendre considérablement la portée et la précision de leurs sautes.
EPFL jumpglider [Kovač et al., 11]	chauve souris papillon criquets	La saute	De saute planeuse à glisser
CMU MultiMo-Bat [Woodward et Sitti, 14]	chauve souris	La marche et la torsion en utilisant ses longs pieds	De saute planeuse à glisser
U.Bath 'Glumper' [Armour et al., 07]	chauve souris	La marche et la saute	De saute planeuse à glisser
Mirco Air Land Vehicle (MALV) [Boria et al., 05]	cafard	jambes roue	Vol

*Tableau II.1. Les principes de conception de la locomotion terrestre aérienne dans la robotique et les animaux d'inspiration.*

Robot	Animal	L.Terrestre	L. Aquatique
La série RHex [Georgides et al., 04]	Cancer	La marche avec ses pieds	Notation avec ses pieds semblables aux ailerons
Le robot tortu [Low et al., 07]	Tortue de mer	La marche	La natation
AmphiBot I AmphiBot II [Crespi et al., 05] [Crespi et Ijspeert, 08]	Serpent, anguille de mer	La technique d'ondulatoire de serpent	La natation anguilliforme
AmphiRobot [Ding et al., 10]	Serpent	la propulsion à roues	ondulations du corps dans l'eau

*Tableau II.2. Les principes de conception de la locomotion terrestre aquatique dans la robotique et les animaux d'inspiration.*

Robot	Animal	Vol sec	L'entrée dans l'eau	Movement submergé	Sortie de l'eau	Volhumide
Bionic Gannet (Morus biunique) [Liang et al., 13]	Morus	Actuellement, une plate-forme de test sans vol	l'impact réduit par balayage d'aile variable	plonge passive	Pas possible	une plate-forme de test sans vol
'Gull' Warrior Aero-marine [2]	Mouette	hydravion conventionnel	Lent, autonome atterrissage sur double flotteurs	Pas possible	Coque Svelte, l'utilisation des ondes de surface, pontons pour la stabilité	/
'Flying fish' De l'université de Michigan [3]	Poisson volant	Hélice électrique avec des cellules solaires. aile conventionnelle	Lent, autonome atterrissage sur double flotteurs	Pas possible	Hydroplanage avec les pontons, décollage dans le vent	Détection les conditions météorologiques pour déterminer le bon moment pour le vol
Aquatic Micro Air Vehicle (AquaMAV) [Siddall et Kovač, 14]	Poisson volant Calamar volant Morus	vol à faible énergie, un faible poids, la robustesse et la stabilité	Détection exacte, contrôle, atterrissage en douceur (directe plongée)	plongée en profondeur une faible flottabilité, imperméabilisation et la navigation autonome	Haute densité de puissance (décollage direct)	/

**Tableau II.3.** Les principes de conception de la locomotion aérienne aquatique dans la robotique et les animaux d'inspiration [Siddall et Kovač, 14].

## CONCLUSION

Nous avons présenté dans cette partie, le contexte applicatif de notre proposition, le problème à résoudre et le domaine d'inspiration de notre travail, l'intelligence en essaim et l'exploration multi-robots en utilisant des robots avec des locomotions multi-modale. Nous avons commencé par collecter des définitions de l'intelligence en essaim ainsi que ses caractéristiques génériques. Puis nous avons présenté une définition de la robotique en essaim et ses caractéristiques. Une étude détaillée sur le problème d'exploration multi-agents et les travaux reliés a été faite. Enfin, nous avons résumé les travaux de la robotique à locomotion multi-modale qui fournit des inspirations à l'application réelle de notre algorithme.

Par l'algorithme FASA qui sera présenté dans le chapitre suivant, Nous voulons faire le progrès vers une nouvelle génération de la robotique en essaim qui adapte une locomotion multi-modale

# ***Chapitre III : Conception et Implémentation***

## **INTRODUCTION**

### **I. CONCEPTION**

- I.1. Objectifs de l'application**
- I.2. Le problème d'exploration Multi-Agents : description formelle**
- I.3. Flying Ant-like Searcher Algorithm(FASA): Algorithme d'exploration**
- I.4. L'algorithme Stigmergic Random Walk (SRW)**

### **II. Implémentation**

- II.1. Environnement de développement**
- II.2. Présentation de l'application**
- II.3. Evaluation des performances**

## **CONCLUSION**



# CHAPITRE III : CONCEPTION ET IMPLEMENTATION

## INTRODUCTION

La transition d'un seul robot complexe à des essaims de plusieurs robots simples apporte des avantages et des inconvénients. Il réduit la complexité de conception et de matériel de chaque robot, ce qui réduit le coût de la conception et augmente la robustesse. On n'a plus besoin d'un algorithme qui indique au robot comment faire toute la tâche, au lieu de cela, chaque robot exécute un algorithme simple en utilisant ses simples capacités, l'interaction de tous ces robots doit produire le résultat désiré. En contrepartie, la difficulté de l'algorithme augmente en raison de la nécessité d'une coordination. Le défi consiste à programmer un algorithme pour un essaim de robots simples, avec une communication et capacité individuelle simple, pour effectuer une complexe exploration des environnements inconnues et stochastiques en tant que collective.

Ce chapitre se trouve divisé en deux parties. La première présente la conception du problème contenant les objectifs de l'application et la description de l'algorithme proposé (Flying Ant-like Searcher Algorithm-FASA). La deuxième partie présente l'évaluation des performances de FASA à travers des simulations dans différentes configurations environnementales par la variation de plusieurs paramètres (nombre d'agents, taille d'environnement, nombre et position de targets). Nous discutons par la suite les résultats obtenus et nous les comparons avec l'algorithme de Stigmergic Random Walk (SRW). Nous terminerons le chapitre avec une conclusion.

## I. CONCEPTION

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

Le but principal de ce mémoire se résume à la résolution du problème d'exploration des environnements inconnus par plusieurs agents. Plusieurs objectifs doivent être réalisés afin d'atteindre dont le principal, parmi ces objectifs on a :

1. Proposer une modélisation d'un agent simple avec des capacités de perception et de calcul limités et capable d'assurer une locomotion multi-modale ;

2. Assurer une coordination réactive entre les agents via la communication indirecte (la stigmergie - par phéromone digitale) pour assurer une large dispersion des agents et donc une exploration rapide;
3. Assurer une robustesse à la défaillance des agents et l'extensibilité pour des essaims plus grand;
4. Résoudre le problème de minima locaux surtout avec les environnements de grande taille.

## I.2. Le problème d'exploration Multi-Agents : description formelle

L'exploration de l'environnement est l'une des tâches les plus étudiées dans la robotique en essaim. Elle se considère comme une étape primordiale pour plusieurs problèmes du monde réel comme la recherche des échantillons, la recherche et le sauvetage, le nettoyage, le foraging, etc. Elle implique la nécessité pour un essaim de robots de découvrir l'environnement. L'objectif des agents est de déplacer dans l'environnement inconnu pour localiser un ensemble de targets distribué de façon aléatoire. Pour améliorer le comportement des agents une coordination doit avoir lieu. Dans ce travail, nous proposons un algorithme d'exploration par l'utilisation d'un ensemble d'agents simples. Le temps final d'exploration est quand tous les targets sont localisés.

Nous présentons dans ce qui suit une description pseudo formelle des concepts qui seront utilisés le long de ce mémoire:

- *Environnement* : une grille bidimensionnelle limitée ( $E$ ) de taille de  $N \times M$ .  $E = E_{vide} \cup E_{occupé}$ , où  $E_{occupé}$  dénote la partie de  $E$  qui contient les cellules occupées par des obstacles, des targets ou des agents et  $E_{vide} = E_{exploré} \cup E_{Nexploré}$ , où  $E_{exploré}$  dénote la partie de  $E_{vide}$  qui contient les cellules explorées (ceux qui contiennent une phéromone) et  $E_{Nexploré}$  dénote la partie de  $E_{vide}$  qui contient les cellules non-encore explorées. Nous définissons aussi  $E_{meilleure}$  comme une partie de  $E_{exploré}$  qui contiennent des positions qu'on juge meilleure et qui sont mémorisées à chaque étape par les agents. Une cellule courante  $C_c$  avec les coordonnées  $(x, y)$  est considérée comme meilleure  $C_{meilleure}$ , si au moins l'un de ses quatre voisins avec les coordonnées  $(x-1, y)$ ,  $(x+1, y)$ ,  $(x, y-1)$ ,  $(x, y+1) \in E_{Nexploré}$ .



- *Target* : est un ensemble d'objets statiques  $T = t_1 \dots t_n$ , où  $n$  est le nombre total de targets et qui est  $\geq 1$ . Chaque  $t_i$  est placé aléatoirement dans  $E$ .
- *Agent* : c'est un agent simple qui se ressemble à une fourmi. Il est capable de :
  1. Percevoir les quatre cellules voisines (cellule dans les positions  $(x-1, y)$ ,  $(x+1, y)$ ,  $(x, y-1)$ ,  $(x, y+1)$ ), afin de détecter la présence de phéromone, de targets et d'obstacles;
  2. Déposer une phéromone dans la cellule courante (pour la marquer comme déjà visitée) ;
  3. Se positionner (il connaît ses coordonnées  $(x, y)$  à tout moment);
  4. Marcher et voler. La marche correspond à un déplacement de la cellule A à la cellule B avec une distance d'un pas vers une des quatre directions haut, bas, gauche et droite, tandis que la distance dans le vol est  $> 1$ ;
  5. Mémoriser les coordonnées des cellules considérées comme meilleurs.

### I.3. Flying Ant-like Searcher Algorithm(FASA): Algorithme d'exploration

L'algorithme FASA est un algorithme d'exploration Multi-Agents qui combine la marche aléatoire et la recherche systématique, il utilise la communication stigmergic via des phéromones pour coordonner les mouvements des agents. L'algorithme est inspiré du comportement des fourmis Camponotus japonicus [Nishikawa et al., 08]. Nos agents utilisent des phéromones comme les ouvrières le font pour communiquer entre eux et ils utilisent des comportements de voler pour déplacer à des régions connus ou inconnus à l'avance comme le font les reines et les mâles quand ils volent pour un accouplement et la construction de leurs propre colonies. La Figure III.1 présente le modèle comportemental des ouvrières, mâles et femelles de fourmis. La Figure III.2 présente le comportement de nos agents FASA.

Quelques particularités d'algorithme FASA sont :

1. Les agents explorent graduellement le sous-espace où ils été initialement déployés;
2. Robuste à la défaillance des agents et il peut fonctionner même avec un seul agent;
3. Les positions initiales des agents, la géométrie de l'espace de recherche, la complexité des obstacles n'ont pas d'influence sur la performance de l'algorithme.



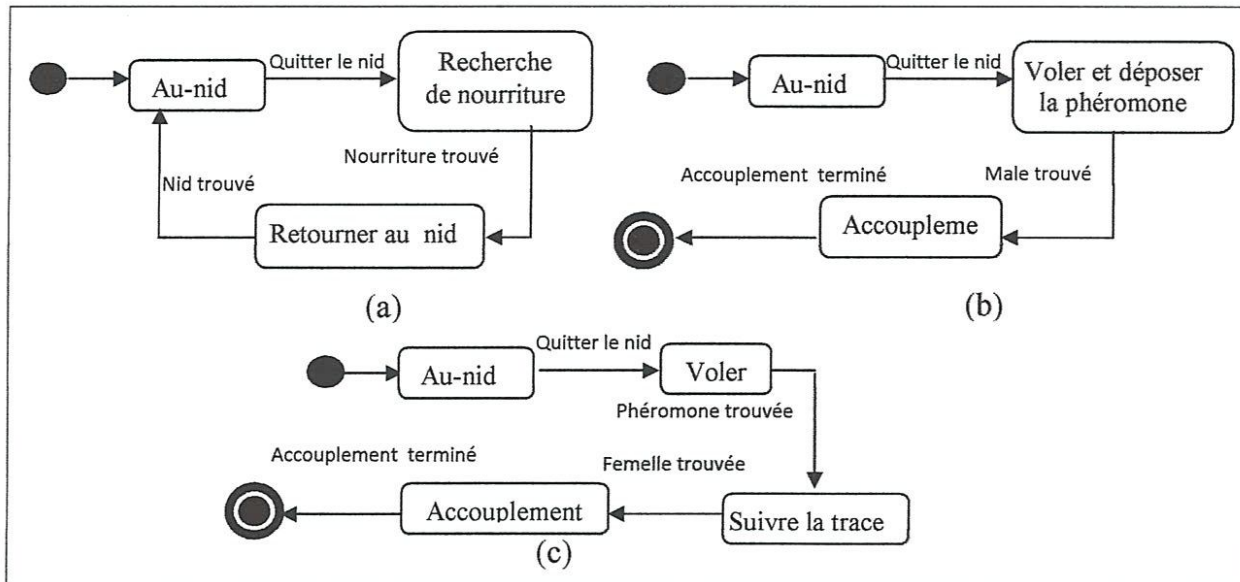


Figure III.1. Model de comportement de : (a) ouvrières, (b) mâle et (c) femelle de fourmi *Camponotus japonicus*

**Algorithme 1 : FASA**

```

1  Tant que ( $\exists$ targets) faire
2       $r \leftarrow$  valeur aléatoire (43)
3       $t = \text{temps} - r$ 
4      Si ( $t \geq 0$ ) faire
5          ReturnToBestPosition
6          Temps  $\leftarrow$  0
7      Si non
8          ChooseNextPatch
9          Evaporation de phéromone
10     ReturnToBestPosition
11     Si ( $E_{\text{milleur}} \neq \emptyset$ ) Alors
12         Voler vers le premier élément dans  $E_{\text{milleur}}$ 
13         Déposer P dans  $C_c$ 
14         Si ( $\nexists$  voisine de  $C_c \in E_{\text{Nexploré}}$ ) faire
15             Retirer de la tête  $E_{\text{milleur}}$ 
16     Si non
17         ChooseNextPatch
18     ChooseNextPatch
19     Si ( $\exists C_i$ , voisine de  $C_c \in E_{\text{Nexploré}}$ ) Alors
20         Si (nombre de ( $C_i$ , voisine de  $C_c \in E_{\text{Nexploré}}$ )  $> 1$ ) Alors
21             Ajouter  $C_c$  à la tête de  $E_{\text{milleur}}$ 
22             Déplacer aléatoirement vers  $C_j \in E_{\text{Nexploré}}$ 
23             Déposer P dans  $C_c$ 
24     Si non
25     Si ( $E_{\text{milleur}} \neq \emptyset$ ) Alors
26         ReturnToBestPosition
27     Si non
28         Voler aléatoirement vers une nouvelle cellule
    
```

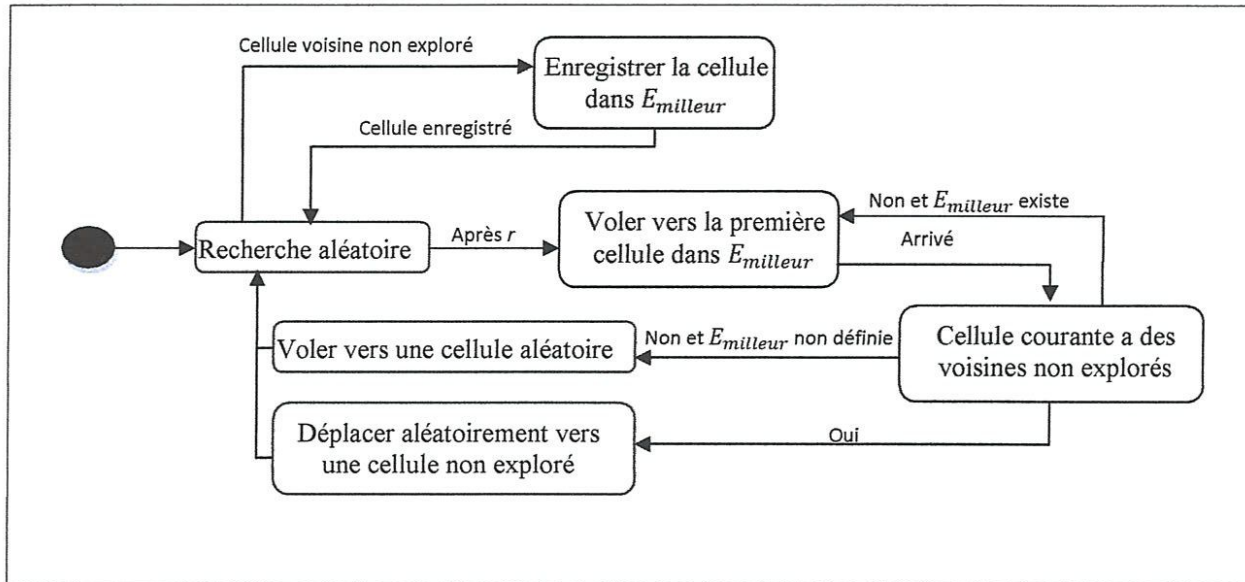


Figure III.2. Model de comportement des agents FASA

Comme des fourmis naturelles, nos agents utilisent l'environnement comme moyen de communication en laissant des traces de phéromones digitales. Ces phéromones sont déposées par les agents et sont aussi détectés par eux quand ils se trouvent dans la proximité de la phéromone.

Dans notre algorithme (*Algorithme 1*) l'exploration continuera tant qu'il existe des targets dans l'environnement. A chaque itération, chaque agent fixera une durée  $r$  aléatoire ( $\leq 43$ ). Tant que la durée  $r$  n'a pas expiré l'agent exécute la fonction **Choose-Next-Patch** où il stocke les coordonnées de la cellule courante dans  $E_{meilleur}$ , si elle possède au moins deux cellules voisine  $\in E_{Nexploré}$  puis il se déplace à l'une de ses cellules non explorés, dépose  $p$  dans la cellule courante. Si toute les cellules voisines sont visitées (contiennent des phéromone) et la liste  $E_{meilleur} = \emptyset$ , l'agent déclenche un comportement de voler vers une cellule aléatoire, sinon si  $E_{meilleur} \neq \emptyset$  il exécute la fonction **Return-To-bestPosition** où il vole vers la cellule enregistré dans la tête de la liste  $E_{meilleur}$  puis teste si elle possède encore au moins deux voisins  $\in E_{Nexploré}$ , sinon il la retire de sa liste et dépose  $p$  dans la cellule courante, si la liste  $E_{meilleur}$  est vide il retourne à la fonction **Choose-Next-Patch**. Quand la durée  $r$  expire l'agent exécute **Return-To-bestPosition**.

#### I.4. L'algorithme Stigmergic Random Walk (SRW)

C'est un algorithme d'exploration qui évite la marche aléatoire par l'utilisation des phéromones. Les agents choisissent les cellules voisines qui n'ont pas encore été visitées



(ceux qui ne contiennent pas de phéromones). C'est une marche pseudo aléatoire, du fait qu'à un certain moment où toutes les cellules voisines sont visitées, les agents choisissent aléatoirement. A ce moment, les agents peuvent se coincer dans les régions visitées pour de longues périodes [Simonin, 05]. La version algorithmique de SRW est donnée par l'*Algorithme 2*.

qu'on

---

**Algorithme 2** : *Algorithme de Stigmergic Random Walk SRW*

---

```

1 Tant que ( $\exists$ targets) faire
2   Si ( $\exists C_i$ , voisine de  $C_c \in E_{Nexploré}$ ) Alors
3     Déplacer aléatoirement vers  $C_i$ 
4   Si non
5     Déplacer aléatoirement vers une cellule voisine
6     Déposer P dans  $C_c$ 

```

ce n'est pas aléatoire dans ce cas

## II. Implémentation

### II.1. Environnement de développement

Les simulations réalisées ont été implémentées et exécutées avec la plate-forme de simulation **NETLOGO** version 5.3.1 [4]. NetLogo est un logiciel de modélisation d'environnement pour simuler des phénomènes naturels et sociaux. Il est particulièrement adapté pour modéliser des systèmes complexes de développement à long terme. Les utilisateurs de NetLogo peuvent appliquer des instructions à des centaines ou des milliers d'agents opérant en parallèle. Le logiciel permet ainsi d'étudier la connexion qui existe entre le comportement d'individus isolés et d'en déduire des modèles qui découlent de l'interaction entre de nombreux individus. Ces simulations s'appliquent aux sciences naturelles et sociales, à savoir la biologie, la médecine, la physique, la chimie, l'informatique, et l'économie.

### II.2. Présentation de l'application

La Figure III.3 montre l'interface principale de notre application. Cette fenêtre nous permet d'initialiser l'environnement de simulation, de lancer ou arrêter une simulation et de modifier les paramètres de simulation (nombre d'agents, taille de l'environnement, etc.).

Selon l'interface dans la Figure III.3, le bouton **setup** permet d'initialiser l'environnement de simulation après la fixation des valeurs des différents paramètres de simulation. Le bouton **go** permet de lancer ou d'arrêter une simulation. Le slider **boundary** pour déterminer la taille de l'environnement (la taille = boundary X 2), le slider **number-target** pour fixer le nombre de target, le slider **number** pour fixer le nombre d'agents, la densité d'obstacle est fixée par le



slider **%obstacleDensity**, et les deux sliders **nestX** et **nestY** sont pour fixer les coordonnées de la base qui se trouve par défaut au centre de l'environnement. Il y'a aussi les paramètres associés aux phéromones, **evaporation-rate** qui représente le coefficient d'évaporation (la densité de phéromone dans une cellule va diminuer avec le temps), **maxPheroPerSite** représente la quantité maximale déposée dans une cellule, **amtPheroLay** représente la quantité de phéromone déposée par l'agent quand il explore une cellule, les zones d'affichage **time** et **n** sont pour afficher le temps d'exploration et le nombre de target détectées respectivement.

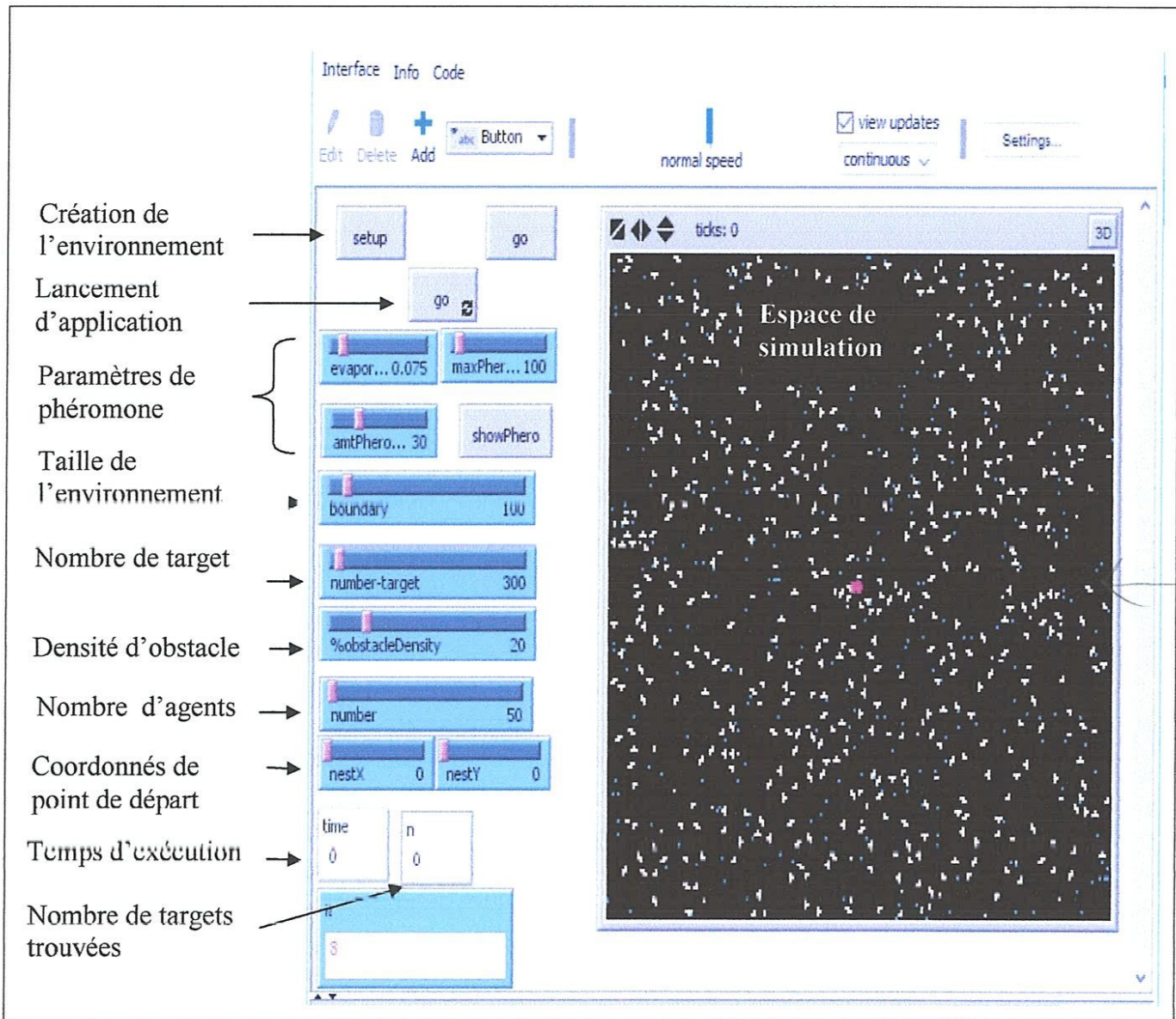


Figure III.3. Interface principale

La Figure III.4 montre l'interface principale de l'algorithme SWR. Cette fenêtre nous permet d'initialiser l'environnement de simulation, de lancer ou arrêter une simulation et de modifier les paramètres de simulation (nombre d'agents, taille de l'environnement, etc.).



Comme la fenêtre précédente, l'interface dans la Figure III.4 contient les mêmes boutons. Le bouton **setup** permet d'initialiser l'environnement de simulation après la fixation des valeurs des différents paramètres de simulation. Le bouton **go** permet de lancer ou d'arrêter une simulation. Le slider **boundary** pour déterminer la taille de l'environnement, le slider **number-target** pour fixer le nombre de target, le slider **number** pour fixer le nombre d'agents, la densité d'obstacle est fixée par le slider **%obstacleDensity**, Il y'a aussi les paramètres associés aux phéromones, **evaporation-rate** qui représente le coefficient d'évaporation (la densité de phéromone dans une cellule va diminuer avec le temps), **maxPheroPerSite** représente la quantité maximale déposée dans une cellule, **amtPheroLay** représente la quantité de phéromone déposée par l'agent quand il explore une cellule, les zones d'affichage **time** et **n** sont pour afficher le temps d'exploration et le nombre de target détectés respectivement.

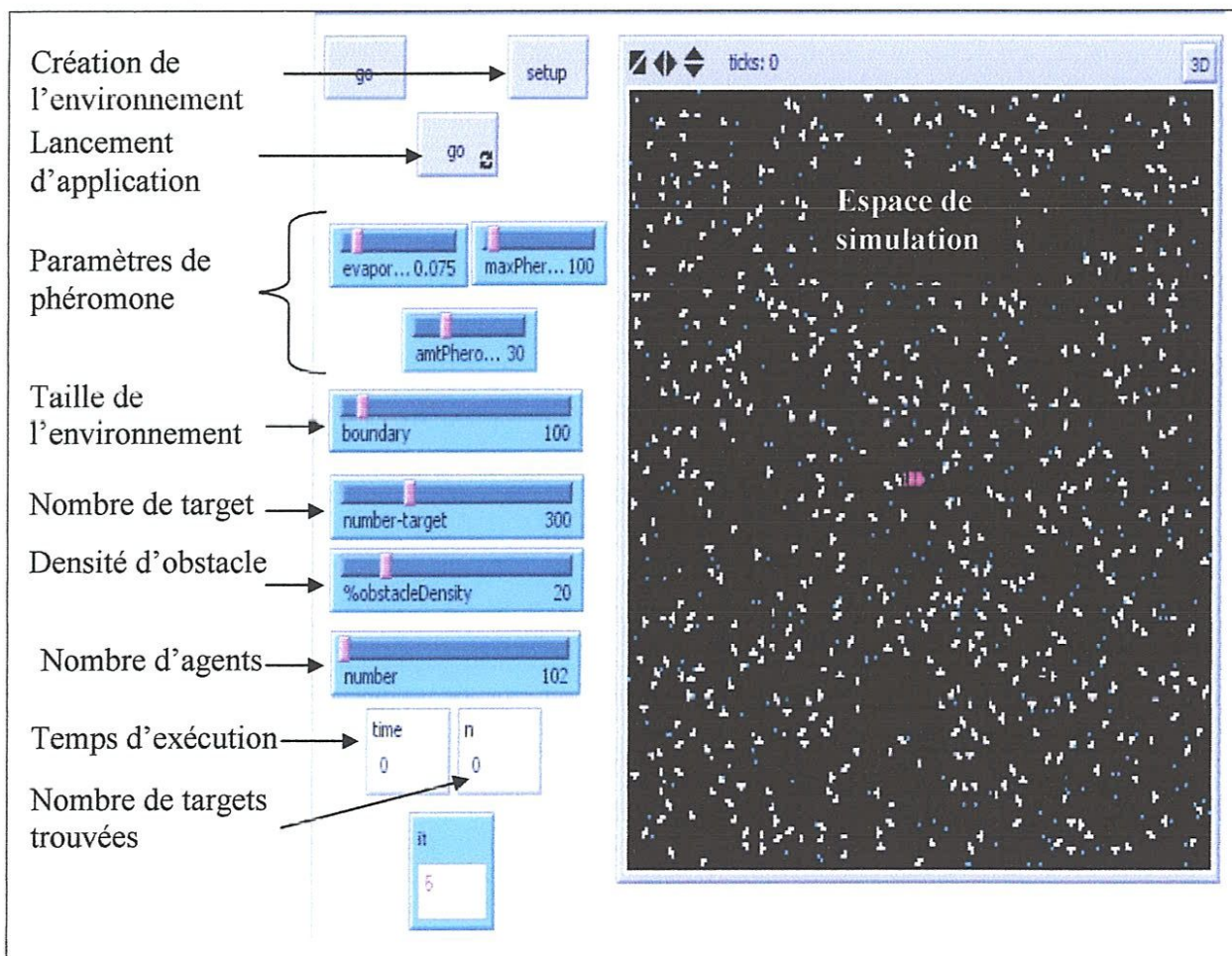


Figure III.4. L'interface principale de SRW

## II.3. Evaluation des performances

### II.3.1. Indice de performance

Nous avons considéré dans toutes les simulations des targets statiques qui ne changent pas de position avec le temps et des environnements avec des obstacles complexes. Les paramètres de simulation: Taille de l'Environnement (TE), Nombre des Agents (NA), Densité d'Obstacles (DO) (le nombre totale des obstacles est calculé par :  $\text{nombre d'obstacles} = DO \times \left(\frac{TE}{4}\right)$ ), la Position de Targets (PT) et le Nombre de Targets (NT), ont été variés de scénario à l'autre pour avoir des configurations environnementales différentes.

Nous avons utilisé deux indices pour évaluer les performances de notre algorithme et le comparé avec l'algorithme SRW [Simonin, 05]:

- Temps de Recherche ( $\text{Temps}_{\text{rech}}$ ) : c'est le temps en seconde nécessaire pour trouver toutes les targets dans l'environnement.
- L'Efficacité de Recherche: est définie par (1) :

$$\text{Eff}_{\text{recherche}} = \frac{\text{Targets}_{\text{trouvées pendant } t}}{\text{Targets}_{\text{Ntotale}}} \times 100 \quad (1)$$

Où :  $\text{Eff}_{\text{recherche}}$  dénoté le pourcentage des targets trouvées  $\text{Targets}_{\text{trouvées}}$  pendant un temps  $t$  fixé à l'avance sur le nombre totale des targets  $\text{Targets}_{\text{Ntotale}}$  placées dans l'environnement.

### II.3.2. Scénarios de simulation

Afin d'évaluer notre algorithme dans des conditions différentes, nous avons défini quatre scénarios. Dans lesquels les targets sont placées aléatoirement et les agents démarrent tous du centre de l'environnement, le temps  $t$  dépensé dans la marche aléatoire a été fixé, après des expériences Tableau III.1, à  $\text{random}(x)$  avec  $x = 43$  (la grande valeur de  $x$  signifie une longue durée de marche aléatoire, tant-dis que la petite valeur signifie une courte durée de marche aléatoire). Nous prenons la moyenne de 10 simulations pour tous les scénarios et nous donnons l'écart type pour les 10 simulations.

Nous avons utilisé deux scénarios de simulation pour fixer expérimentalement la valeur aléatoire  $x$ . Le premier scénario permet de déterminer la meilleure valeur de  $x$  à base de

51 - genre d'opposition  
Superiorité  
# pniche  
de



Temps<sub>rech</sub>. Nous fixons a TE à 200×200 cellules, le NA à 100 agents et le DO à 8%, et le nombre de target à 100, cependant nous varions la valeur de  $x$  de 0 à 100. Le deuxième scénario permet de déterminer la meilleure valeur de  $x$  à base de l' $Eff_{recherche}$  pour un temps fixé à l'avance (300s). Nous fixons la TE à 200×200 cellules, le NA à 100 agents et le DO à 8%, le nombre de target à 100 et nous varions la valeur de  $x$  de 0 à 100. Les résultats obtenus dans les deux scénarios sont représentés par le Tableau III.1

$x$	4	21	43	50	100
Temps <sub>rech</sub>	1096.20	596.70	278.06	561.033	568.88
$Eff_{recherche}\%$	30.15	69.4	94.88	76.8	76

**Tableau III.1.** Le Temps<sub>rech</sub> et  $Eff_{recherche}$  pour les différentes valeurs de  $x$

Les résultats illustrés dans le Tableau III.1, montrent que la meilleure valeur qu'on peut prendre pour  $x$  est 43 où nous avons eu le temps moyen Temps<sub>rech</sub> le plus petit et  $Eff_{recherche}$  la plus grande. C'est-à-dire que les agents avec une valeur de 43, explorent le plus rapidement possible l'environnement et rend le maximum de targets.

Pour tester les performances des deux algorithmes (FASA et SRW), nous avons utilisées quatre scénarios de simulation. Chacun des scénarios est destiné à tester l'influence de l'un des paramètres de simulation sur les performances des algorithmes implémentés :

- Scénario 1 :** Le but d'utiliser un tel scénario est de tester l'influence du nombre d'agents sur le Temps<sub>rech</sub> (extensibilité de l'algorithme). Pour cela nous fixons : la TE à 200×200 cellules, NT 100, DO 8% et nous varions le NA varié de 1 à 2500 agents ;
- Scénario 2 :** Ce scénario est utilisé pour tester l'influence de la taille de l'environnement sur les performances des algorithmes FASA et SRW. Nous varions alors la TE de 100 ×100 jusqu'à 1000×1000 cellules, et nous fixons le NA à 100 agents, le NT à 100 targets et le DO à 8% ;
- Scénario 3 :** Nous utilisons ce scénario pour tester l'influence du nombre de targets sur  $Eff_{recherche}$  où le nombre de targets localisées pendant un temps fixé à l'avance à (240s). Nous fixons donc la TE à 200×200 cellules, le NA à 100 agents et le DO à 8%. Cependant, nous varions le nombre de targets NT de 5 à 1000 targets ;

4. **Scénario 4** : Dans ce scénario, nous testons l'influence de la position des targets sur l' $Eff_{recherche}$ . Nous positionnons les targets une fois proche du centre de l'environnement et autre fois éloigné et fixé le temps à (240s). Avec un NT fixé à 100 targets, NA à 100 agents, DO à 8% et TE à 400×400 cellules.

Le Tableau III.2 présente les quatre scénarios de simulation avec les valeurs des différents paramètres.

Paramètre	Valeur
<i>L'influence de nombre d'agents sur le Temps<sub>rech</sub></i>	
<b>Scénario 1</b>	
Taille de l'environnement	200 x 200 cellules
Nombre des agents	1 - 2500
Nombre de target	100
Densité d'obstacle	8%
<i>L'influence de la Taille de l'environnement sur le Temps<sub>rech</sub></i>	
<b>Scénario 2</b>	
Taille de l'environnement	100 X 100-1000 X1000cellules
Nombre des agents	100
Nombre de target	100
Densité d'obstacle	8%
<i>L'influence de nombre des targets sur l'<math>Eff_{recherche}</math></i>	
<b>Scénario 3</b>	
Taille de l'environnement	200 X 200cellules
Nombre des agents	100
Nombre de targets	5 – 1000
Densité d'obstacle	8%
<i>L'influence la position des targets sur l'<math>Eff_{recherche}</math></i>	
<b>Scénario 4</b>	
Taille de l'environnement	200 X 200cellules
Nombre des agents	100
Nombre de targets	5 – 1000
Position de targets	proche ouéloignée
Densité d'obstacle	8%

*Tableau III.2. Les quatre scénarios et leur paramètres*

### II.3.3. Résultats de simulations et comparaisons

#### 1. Résultats du scénario 1

		1	100	200	500	1000	1500	2000	2500
FASA	Temps <sub>rech</sub>	15628.9	134	70,8	34,5	19,7	16,1	15,1	14,9
	Ecart_T	6985.2	24,4	10,9	4,9	2,3	1,5	1,9	1,9
SRW	Temps <sub>rech</sub>	29386.8	137,1	157,8	165	127,8	230,7	278,4	292,7
	Ecart_T	36897	46,8	37,4	41,5	25,7	49,3	50,2	94

Tableau III.3. Temps<sub>rech</sub> de FASA et SRW en augmentant NA

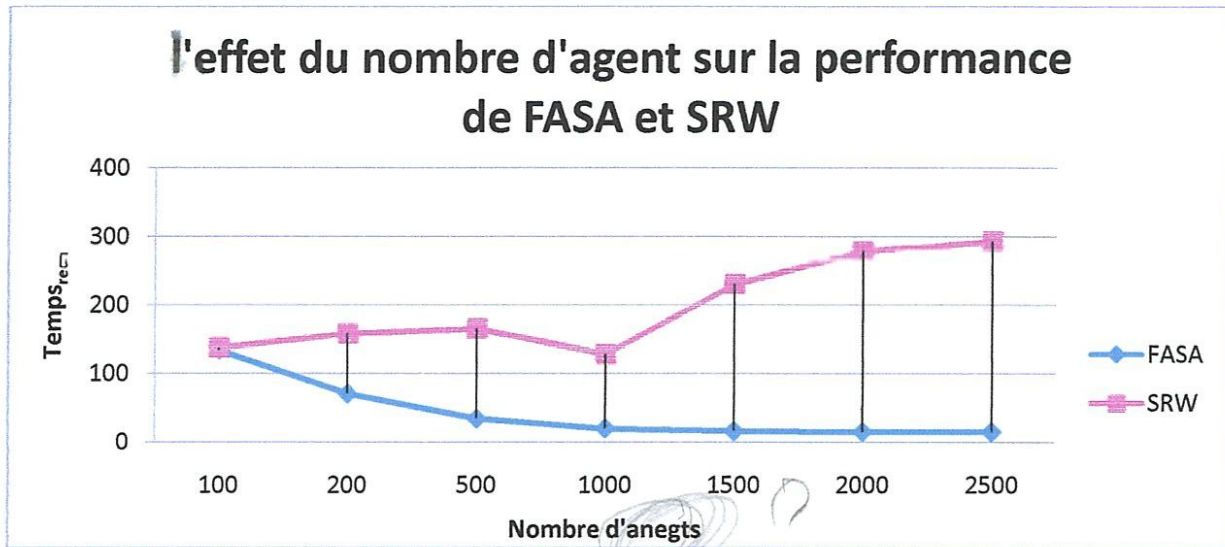


Figure III.5. Performance de FASA et SRW avec un nombre d'agents variant entre 100 et 2500 dans un environnement de (200X200 cellule, 8%obstacle et 100 targets).

#### Discussions des résultats et comparaisons

Le Tableau III.3 et la Figure III.5 montrent les résultats obtenues par les deux algorithmes FASA et SRW. Le Temps<sub>rech</sub> dans FASA diminue avec l'augmentation du nombre d'agents. Il est d'environ 134 secondes avec 100 agents et 19 secondes avec 1000 agents. Il devient presque stable après 1000 agents (15 secondes avec 2000 et 14 secondes avec 2500).

SRW donne le même Temps<sub>rech</sub> que FASA (137 s) avec 100 agents. Le Temps<sub>rech</sub> dans SRW augmente avec l'augmentation du nombre d'agents jusqu'à 292 secondes avec 2500 agents. Avec l'utilisation de grand nombre d'agents dans SRW, les agents se coincent dans des zones déjà visitées et le temps devient plus grand. Dans FASA le comportement de vol aide les agents à sortir des régions explorées et augmente la chance d'explorer plus de régions et trouver plus des targets. En remarquons aussi que contrairement de FASA l'écart type associé



à SRW est élevé à cause de marche aléatoire des agents. L'algorithme FASA donne des résultats meilleurs que SRW.

## 2. Résultats du scénario 2

		100*100	200*200	400*400	800*800	1000*1000
<b>FASA</b>	Temps <sub>rech</sub>	7,6	134,3	2873,5	56987,2	77960,1
	Ecart T	1	25,8	512,9	4258,3	9164,07
<b>SRW</b>	Temps <sub>rech</sub>	53	139,3	3719,4	219784,7	292746
	Ecart T	33	49,1	718,8	207436,9	281716

Tableau III.4. Temps de recherche de FASA et SRW en augmentant TE

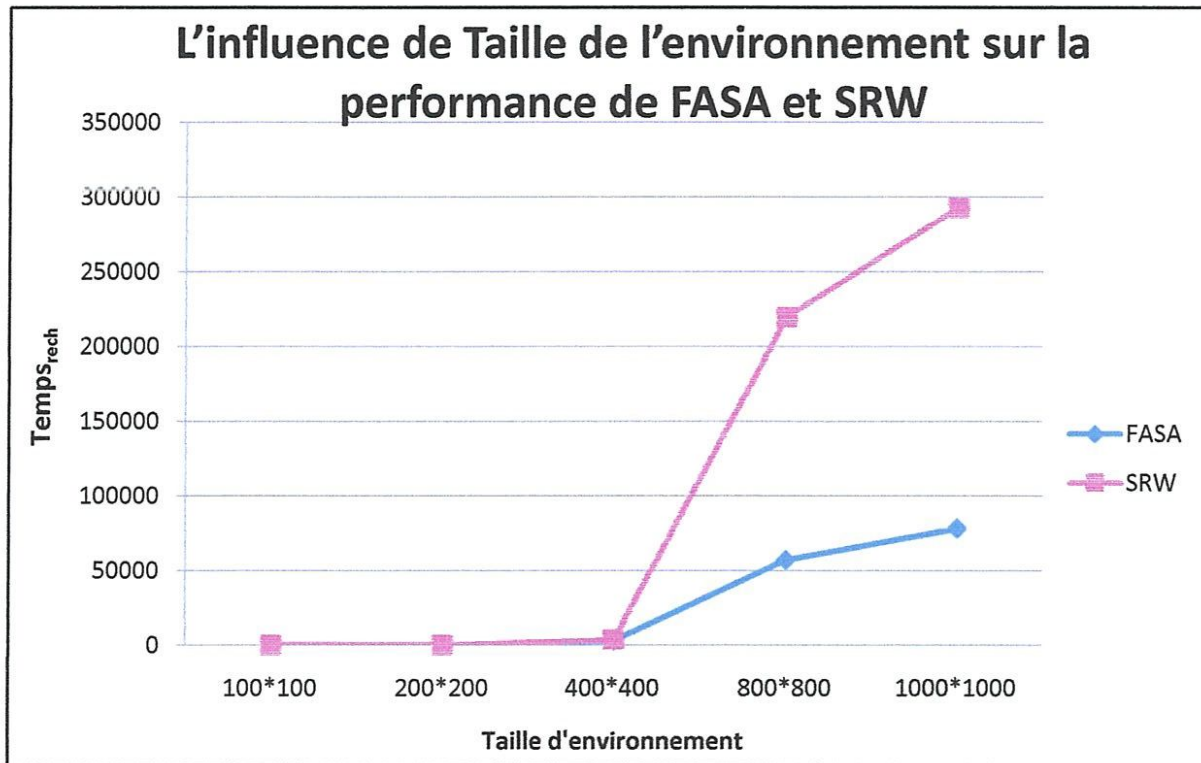


Figure III.6. Performance de FASA et SRW avec une taille d'environnement variée entre 100X100 et 1000X1000 avec 100 agent, 8% obstacle et 100 targets.

### Discussions des résultats et comparaisons

A partir du Tableau III.4 et la Figure III.6 on n'observe que le Temps<sub>rech</sub> augmente avec l'augmentation de la taille de l'environnement dans les deux algorithmes. L'algorithme FASA donne des meilleurs résultats par rapport à SRW. FASA explore l'environnement de façon progressive en retournant sur les cellules meilleures et leurs voisines, et on augmentant le

nombre de cellules (la taille de l'environnement) le Temps<sub>rech</sub> augmente progressivement. SRW devient inefficace au-delà d'une taille d'environnement de 400X400 cellules.

### 3. Résultats du scénario 3

	1	5	50	500	1000
FASA	100%	92%	100%	96.06%	100%
SRW	50%	80%	93.80%	90.40%	94.20%

Tableau III.5.  $Eff_{recherche}$  % de FASA et SRW en augmentant le NT

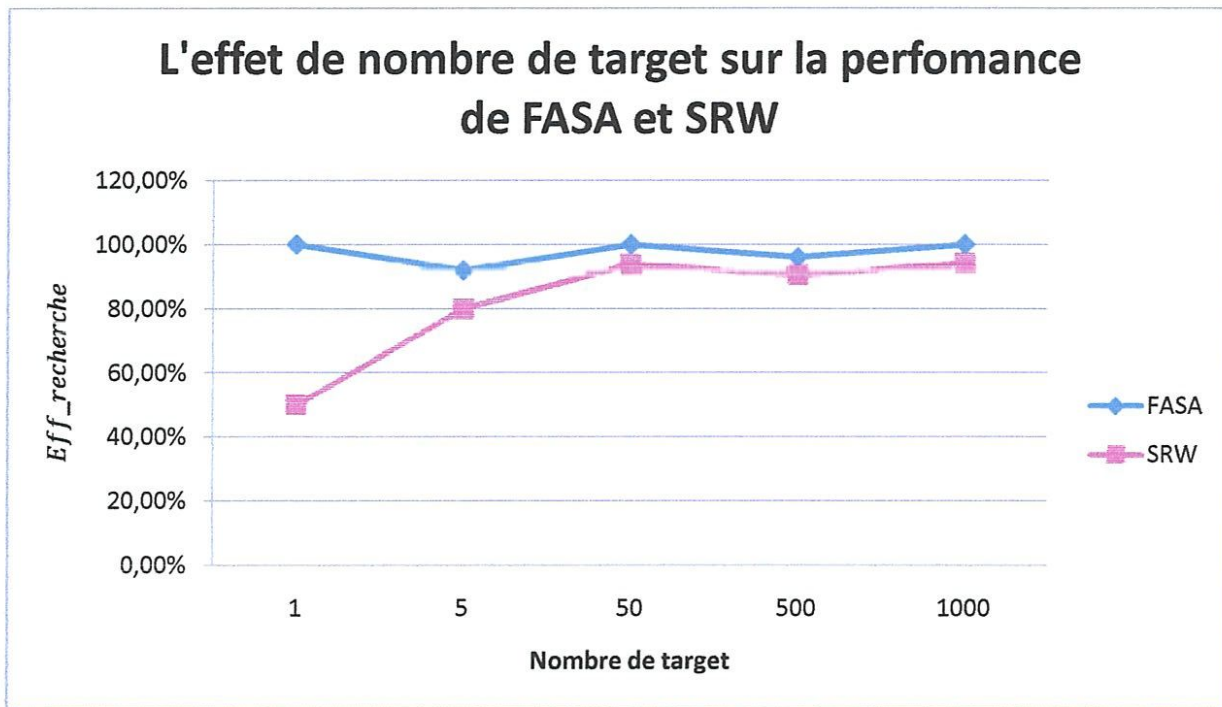


Figure III.7. Performance de FASA et SRW avec un nombre de target variant entre 1 et 1000 avec 100 agents dans un environnement de (200X 200 cellule , 8%obstacle).

#### Discussions des résultats et comparaisons

D'après Le Tableau III.5 et la Figure III.7 on peut conclure que notre algorithme ne s'influence pas par le nombre de targets. Quel que soit le nombre de targets (grand ou petit) l' $Eff_{recherche}$  reste toujours élevée, et cela est assuré par la recherche progressive et complète des différentes zones de d l'environnement. Les agents ne s'éloignent pas avant d'explorer toute les zones. L' $Eff_{recherche}$  dans SRW augmente en parallèle avec l'augmentation de nombre de targets à cause de la recherche aléatoire qui réduit la chance d'une exploration complète de certaines zones et tant que le nombre de targets augmente la probabilité de trouver une ou plusieurs targets dans les zones non explorés après une longue durée augmente.



4. Résultats du scénario 4

FASA		SRW	
proche	éloigné	proche	éloigné
100%	91%	92%	76%

Tableau III.6.  $Eff_{recherche}$  % de FASA et SRW en variant le PT

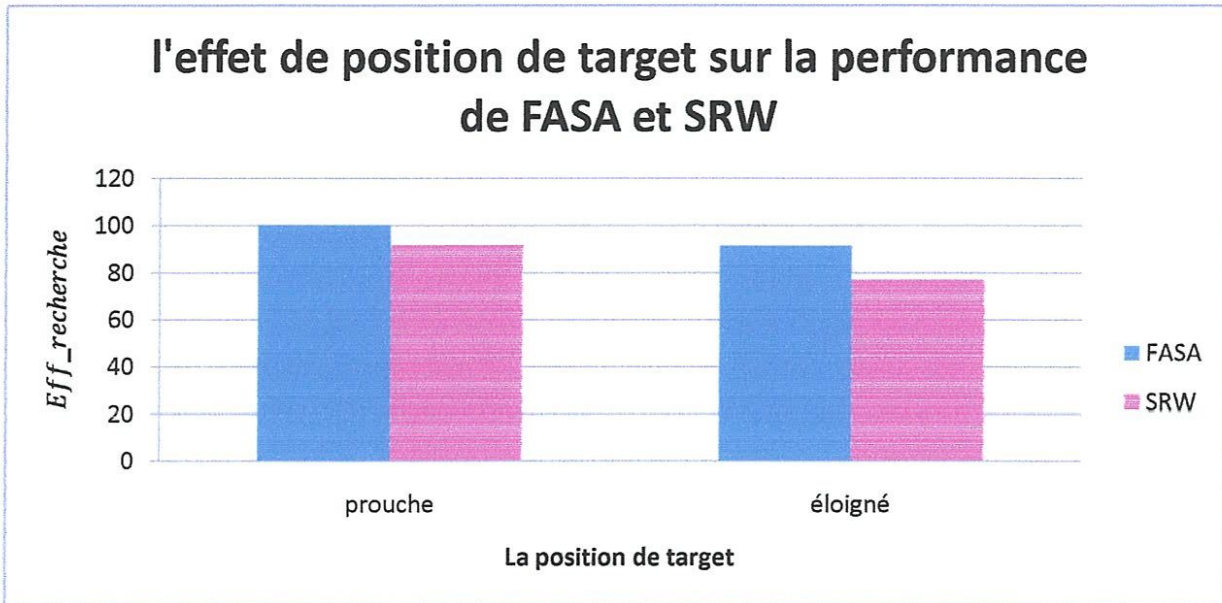


Figure III.8. Performance de FASA et SRW avec une position de target variante avec 100 agents dans un environnement de (200X 200 cellule ,8%obstacle et 100 targets).

Discussions des résultats et comparaisons

D’après Le Tableau III.5 et la Figure III.8 on peut dire que la performance de notre algorithme en  $Eff_{recherche}$  reste toujours élevée (100% et 91%), avec une petite diminution quand les targets sont éloignées parce que les agents dans FASA explorent graduellement le sous-espace où ils été initialement déployés, les résultats de FASA sont meilleurs que celles de SRW dans les deux cas. Grace à la marche pseudo-aléatoire et progressive de FASA, les agents reviennent toujours sur les zones non encore visitées avant d’aller plus loin, tandis que avec la marche pseudo-aléatoire qui devient aléatoire après un certain temps pour certains agents dans SRW, les agents peuvent s’éloigner jusqu’à les frontières de l’environnement alors que les targets sont positionnées proche de la base, comme ils peuvent être coincés dans des zones déjà explorées durant un long temps avant de partir plus loin où les targets sont situés.



## CONCLUSION

Notre objectif été de résoudre le problème d'exploration multi-agents avec plusieurs agents dotés de capacités de calcul et de perception limités. Nous avons proposé un algorithme d'exploration qui combine la marche aléatoire avec la marche stratégique et nous utilisons une communication indirecte via des phéromones pour coordonner les mouvements des agents.

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux parties : conception et implémentation. Dans la partie conception, nous avons présenté la modélisation des agents et l'algorithme proposé (FASA). Dans la partie implémentation, nous avons présenté l'environnement de simulation, les scénarios de simulation et les résultats de simulation. Des simulations et comparaisons avec un algorithme d'exploration avec marche aléatoire guidée (SRW) ont montré que notre approche est plus efficace en  $\text{Temps}_{\text{rech}}$  et en  $\text{Eff}_{\text{recherche}}$  que l'algorithme SRW.

*Conclusion générale et  
perspectives*

## CONCLUSION GENERAL ET PERSPECTIVES

Le problème d'explorer un environnement fait partie des problèmes fondamentaux de la robotique mobile. Il existe plusieurs applications telles que l'exploration planétaire, la reconnaissance, le sauvetage, le fourragement, le nettoyage et la recherche des échantillons. L'exploration consiste à naviguer dans l'environnement selon une stratégie de déploiement dans le but de le cartographier complètement. Les stratégies d'exploration peuvent être classées selon la nature des règles de déplacement en deux grandes catégories : systématique et aléatoires. Les deux stratégies sont utilisées pour localiser des targets dont les positions sont inconnues initialement. Pour diminuer le temps d'exploration et réduire la consommation d'énergie, les stratégies aléatoires adoptent une recherche aléatoire en vue d'augmenter la chance de localiser la cible par l'augmentation des chances de couvrir certaines régions. Dans notre travail, nous combinant la marche aléatoire et la marche systématique.

L'objectif principal de ce travail était de trouver une nouvelle stratégie d'exploration multi-robots des environnements complexes et inconnus, qui se concentre sur la dispersion des robots, afin qu'ils explorent conjointement diverses parties de l'environnement. Pour atteindre cet objectif nous avons proposé et implémenté un algorithme nommé Flying Ant-like Searcher Algorithm (FASA). C'est un algorithme qui combine la marche aléatoire et la marche systématique. Pour plus de flexibilité pour exécuter des comportements divers (vol, marche), nous avons utilisé des agents avec une locomotion multimodale. Les agents communiquent et coordonnent leurs actions à travers une communication stigmergic via phéromones. Le comportement de nos agents est inspiré du celui des insectes sociaux, en particulier des fourmis volantes *Camponotus japonicus*, où les jeunes fourmis et les mâles possèdent des ailes et qu'ils les utilisent afin de voler loin de leurs nid pour l'accouplement et construire leurs propre colonies. Les agents sont dotés de capacités de perception limités aux quatre cellules voisines : cellule en bas, en haut, à gauche et à droite, dans le but de repérer : les targets et aussi les obstacles, les cellules visitées du celles non visitées. Nous avons assuré une coordination réactive entre les agents qui utilisent la stigmergie comme moyen de communication entre eux, en utilisant des phéromones (déposer la phéromone dans la cellule courante pour la marquer comme visitée). Deux modes de locomotion sont utilisées par les agents: la marche et le volé. La marche correspond à un déplacement de l'agent d'une cellule



A jusqu' à la cellule B avec une distance d'un seul pas vers une des quatre directions haut, bas, gauche et droite, tandis que la distance dans le volé est  $\geq 1$ .

L'efficacité de notre algorithme a été mise à l'épreuve dans une série d'expériences durant lesquelles plusieurs paramètres étaient modifiés, pour cela nous avons effectué quatre scénarios. Des comparaisons avec l'algorithme SWR ont été effectuées et notre approche proposée (FASA) donne des meilleurs résultats que celles du SWR.

En perspective à ce travail, nous souhaitons:

- Améliorer l'algorithme pour se dérouler dans des environnements plus complexes ;
- Améliorer l'algorithme pour réduire la répétition d'exploration des zones déjà visités;
- Adapter cet algorithme pour le rendre applicable dans la résolution des problèmes plus compliqués tel que le fourragement;
- Afin de tester l'application réelle de l'algorithme proposé, nous avons l'intention de l'implémenter dans une plateforme de robotique mobile.

# ***Bibliographie***

**Bibliographie**

[Abidi et Lejouad, 93] Labidi, S., et Lejouad, W. (1993). De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents. *Rapports de recherche- INRIA*.

[Altes, 90] Altes, R. A. (1990, November). Wavelets, tomography, and line-segment image representations. In *San Diego'90, 8-13 July* (pp. 268-278). International Society for Optics and Photonics.

[Apostolopoulos et al., 01] Apostolopoulos, D. S., Pedersen, L., Shamah, B. N., Shillcutt, K., Wagner, M. D., et Whittaker, W. L. (2001). Robotic antarctic meteorite search: Outcomes. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 4174-4179). IEEE.

[Arkin et Balch, 98] Arkin, R. C., et Balch, T. (1998). Cooperative multiagent robotic systems. *Artificial Intelligence and Mobile Robots. MIT/AAAI Press, Cambridge, MA*.

[Armour et al., 07] Armour, R., Paskins, K., Bowyer, A., Vincent, J., et Megill, W. (2007). Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain. *Bioinspiration et biomimetics*, 2(3), S65.

[Badeig, 05] Badcig, F. (2005). « *Etat de l'art de la communication entre agents et plus particulièrement de l'écoute flottante* » (Mémoire de D.E.A., Université Paris IX Dauphine)

[Balch et Arkin, 94] Balch, T., et Arkin, R. C. (1994). Communication in reactive multiagent robotic systems. *Autonomous Robots*, 1(1), 27-52.

[Bayindir et Şahin, 07] Bayindir, L., et Şahin, E. (2007). A review of studies in swarm robotics. *Turkish Journal of Electrical Engineering et Computer Sciences*, 15(2), 115-147.

[Beckers et al., 94] Beckers, R., Holland, O. E., et Deneubourg, J. L. (1994, July). From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics. In *Artificial life IV* (Vol. 181, p. 189).

[Beni, 05] Beni, G. (2005). Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. In Beni, G. et Payton, D., éditeurs : *Swarm Robotics, volume 3342 de Lecture Notes in Computer Science, pages 1-9. Springer Berlin Heidelberg*.

[Bennewitz et al., 01] Bennewitz, M., Burgard, W., et Thrun, S. (2001). Optimizing schedules for prioritized path planning of multi-robot systems. In *Robotics and Automation*,



2001. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 271-276). IEEE.

[Blum et Merkle, 08] Blum, C. et Merkle, D. (2008). *Swarm Intelligence. Natural Computing Series. Springer-Verlag.*

[Boeringer et Wemer, 03] Boeringer, D. W., et Werner, D. H. (2003, June). A comparison of particle swarm optimization and genetic algorithms for a phased array synthesis problem. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE* (Vol. 1, pp. 181-184). IEEE.

[Boissier, 04] Boissier, O., Gitton, S., et Glize, P. (2004). Caractéristiques des systèmes et des applications. *Systèmes multi-agents/Observatoire français des techniques avancées, ARAGO 29, pp-25.*

[Bonabeau et al., 97] Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J. L., Aron, S., et Camazine, S. (1997). Self-organization in social insects. *Trends in Ecology et Evolution, 12(5)*, 188-193.

[Bonabeau et al., 98] Bonabeau, E., Theraulaz, G., et Deneubourg, J. L. (1998). Fixed response thresholds and the regulation of division of labor in insect societies. *Bulletin of Mathematical Biology, 60(4)*, 753-807.

[Bonabeau et al., 99] Bonabeau, E., Dorigo, M., et Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems: From natural to artificial systems. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.*

[Bond et Gasser, 88] Bond, A. H., et Gasser, L. (Eds.). (1988). *Readings in distributed artificial intelligence. Morgan Kaufmann.*

[Boria et al., 05] Boria, F. J., Bachmann, R. J., Ifju, P. G., Quinn, R. D., Vaidyanathan, R., Perry, C., et Wagener, J. (2005, August). A sensor platform capable of aerial and terrestrial locomotion. In *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 3959-3964). IEEE.

[Boussebough, 11] Boussebough, I. (2011). «*Les systèmes multi-agents dynamiquement adaptables* » (Doctoral dissertation, Ph. D dissertation, University Mentouri, Constantine, Algeria).

[Brooks, 86] Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 2(1), 14-23.

[**Brooks, 91**] Brooks, R. A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, 47(1), 139-159.

[**Bruce et Veloso, 02**] Bruce, J., et Veloso, M. (2002). Real-time randomized path planning for robot navigation. In *Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 3, pp. 2383-2388). IEEE.

[**Burgard et al., 05**] Burgard, W., Moors, M., Stachniss, C., et Schneider, F. E. (2005). Coordinated multi-robot exploration. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(3), 376-386.

[**Calvo et al., 11**] Calvo, R., de Oliveira, J. R., Figueiredo, M., et Romero, R. A. F. (2011, September). Bio-inspired coordination of multiple robots systems and stigmergy mechanisms to cooperative exploration and surveillance tasks. In *Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), 2011 IEEE 5th International Conference on* (pp. 223-228). IEEE.

[**Camazine et al., 01**] Camazine, S., Dencubourg, J.-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G., et Bonabcau, E. (2001). *Self-organization in biological systems*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.

[**Canny, 85**] Canny, J. (1985, March). A Voronoi method for the piano-movers problem. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 530-535). IEEE.

[**Canny, 87**] Canny, J. (1987, October). A new algebraic method for robot motion planning and real geometry. In *Foundations of Computer Science, 1987., 28th Annual Symposium on* (pp. 39-48). IEEE.

[**Cao et al., 97**] Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., et Kahng, A. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous robots*, 4(1), 7-27.

[**Carriker et al., 90**] Carriker, W. F., Khosla, P. K., et Krogh, B. H. (1990, May). The use of simulated annealing to solve the mobile manipulator path planning problem. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on* (pp. 204-209). IEEE.

[**Cazangi et al., 06**] Cazangi, R. R., Von Zuben, F. J., et Figueiredo, M. F. (2006, July). Evolutionary stigmergy in multipurpose navigation systems. In *Evolutionary Computation, 2006. CEC 2006. IEEE Congress on* (pp. 370-377). IEEE.



- [**Chaib-Draa et al., 01**] Chaib-Draa, B., Jarras, I., et Moulin, B. (2001). Systèmes multi-agents: principes généraux et applications. Edition Hermès, 1030-1044.
- [**Charrier, 09**] Charrier, R. (2009). *L'intelligence en essaim sous l'angle des systèmes complexes: étude d'un système multi-agent réactif à base d'itérations logistiques couplées* (Doctoral dissertation, Université Nancy II).
- [**Chen et Lian, 10**] Chen, D. H., et Liang, Y. M. (2010, October). Behavior-based fuzzy control of obstacle avoidance for indoor mobile robot. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 34, pp. 482-486).
- [**Crespi et al., 05**] Crespi, A., Badertscher, A., Guignard, A., et Ijspeert, A. J. (2005). Amphibot I: an amphibious snake-like robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4), 163-175
- [**Crespi et Ijspeert, 8**] Crespi, A., et Ijspeert, A. J. (2008). Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot. *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(1), 75-87.
- [**Daler et al., 15**] Daler, L., Mintchev, S., Stefanini, C., et Floreano, D. (2015). A bioinspired multi-modal flying and walking robot. *Bioinspiration et biomimetics*, 10(1), 016005.
- [**De Hoog, 11**] De Hoog, J. (2011). *Role-based multi-robot exploration* (Doctoral dissertation, University of Oxford).
- [**Deneubourg et al., 91**] Deneubourg, J. L., Goss, S., Franks, N., Sendova-Franks, A., Detrain, C., et Chrétien, L. (1991, February). The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots. In Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats (pp. 356-363).
- [**Deneubourg et al., 92**] Deneubourg, J. L., Theraulaz, G., Beckers, R., Bourguin, P., et Varela, E. (1992). Swarm made architectures. In 1st European Conference on Artificial Life (pp. 123-133). MIT Press.
- [**Deneubourg et al., 94**] Deneubourg, J. L., Clip, P. L., et Camazine, S. S. (1994, September). Ants, buses and robots-self-organization of transportation systems. In *From Perception to Action Conference, 1994., Proceedings* (pp. 12-23). IEEE.
- [**Desbiens et al., 13**] Desbiens, A. L., Pope, M., Berg, F., Teoh, Z. E., Lee, J., et Cutkosky, M. (2013, May). Efficient jumpgliding: theory and design considerations. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 4451-4458). IEEE.



- [**Detrain et al., 06**] Detrain, C., et Deneubourg, J. L. (2006). Self-organized structures in a superorganism: do ants “behave” like molecules?. *Physics of Life Reviews*, 3(3), 162-187.
- [**Dias et Stentz, 00**] Dias, M. B., et Stentz, A. (2000, July). A free market architecture for distributed control of a multirobot system. In *6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6)* (pp. 115-122).
- [**Ding et al., 10**] Ding R, Yu J, Yang Q, Tan M et Zhang J 2010 Robust gait control in biomimetic amphibious robot using central pattern generator *IEEE/RSJ'10: Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* pp 3067–72
- [**D'Inverno et al., 97**] D'Inverno, M., Kinny, D., Luck, M., et Wooldridge, M. (1997). A formal specification of dMARS. In *Intelligent Agents IV Agent Theories, Architectures, and Languages* (pp. 155-176). Springer Berlin Heidelberg.
- [**Dorigo et al., 96**] Dorigo, M., Maniezzo, V., et Colomi, A. (1996) Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 26(1), 29-41.
- [**Drogoul, 93**] Drogoul, A. (1993). De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes (Doctoral dissertation, Université Paris VI).
- [**Durfee et al., 87**] Durfee, E. H., Lesser, V. R., et Corkill, D. D. (1987). Coherent cooperation among communicating problem solvers. *Computers, IEEE Transactions on*, 100(11), 1275-1291.
- [**Durfee et Lesser, 89**] Durfee, E. H., et Lesser, V. R. (1989). Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning. *Distributed artificial intelligence*, 2(1), 229-244.
- [**Endres et al., 98**] Endres.H, Feiten.W, et Lawitzky.G, (1998) “Field test of a navigation system: Autonomous cleaning in supermarkets,” in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics et Automation (ICRA)*, pp. 1779–1781.
- [**Engedy et Horváth, 09**] Engedy, I., et Horváth, G. (2009, August). Artificial neural network based mobile robot navigation. In *Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on* (pp. 241-246). IEEE.
- [**Fayech, 01**] Fayech, B., Hammadi, S., Maouche, S., et Borne, P. (2001). Urban bus traffic regulation by evolutionary algorithms. In *Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1316-1322). IEEE.

[Fayech, 03] Fayech, B. (2003). Régulation des réseaux de transport multimodal: Systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes (Doctoral dissertation, Lille 1).

[Ferber, 90] Ferber, J., et Jacopin, E. (1990). The framework of eco-problem solving. *Decentralized AI*, 2, 181-193.

[Ferber, 95] Ferber, J. (1995). Les Systèmes Multi-agents, Vers une intelligence collective. *InterEditions, Paris*.

[Garnier, 08] Garnier, S. (2008). *Décisions collectives dans des systèmes d'intelligence en essaim* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[Georgides et al., 04] Georgides, C., German, A., Hogue, A., Liu, H., Prahacs, C., Ripsman, A., et Dudek, G. (2004, September). AQUA: an aquatic walking robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 4, pp. 3525-3531), IEEE,

[Ghosh et Klein, 10] Ghosh, S. K., et Klein, R. (2010). Online algorithms for searching and exploration in the plane. *Computer Science Review*, 4(4), 189-201.

[Glad, 11] Glad, A. (2011). *Etude de l'auto-organisation dans les algorithmes de patrouille multi-agent fondés sur les phéromones digitales* (Doctoral dissertation, Université Nancy II).

[Grassé, 59] Grassé, P. P. (1959). La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes sociaux*, 6(1), 41-80.

[Green, 97] Green, S., Hurst, L., Nangle, B., et Cunningham, P. (1997). *Software agents: A review*. Trinity College Dublin, Department of Computer Science.

[Guo et Parker, 02] Guo, Y., et Parker, L. E. (2002). A distributed and optimal motion planning approach for multiple mobile robots. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 2612-2619). IEEE.

[Haumann et al., 10] Haumann, A. D., Listmann, K. D., et Willert, V. (2010, May). Discoverage: A new paradigm for multi-robot exploration. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 929-934). IEEE.



[Hazon et al., 06] Hazon, N., Mieli, F., et Kaminka, G. A. (2006, May). Towards robust on-line multi-robot coverage. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on* (pp. 1710-1715). IEEE.

[Heylighen, 15] Heylighen, F. (2015). Stigmergy as a Universal Coordination Mechanism: components, varieties and applications. *Human Stigmergy: Theoretical Developments and New Applications*. Springer. Retrieved from <http://pespmc1.vub.ac.be/papers/stigmergy-varieties.pdf>.

[Hmida, 13] Hmida, F. B. (2013). *ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS* (Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ BORDEAUX I; UNIVERSITÉ DE LA MANOUBA, TUNISIE).

[Hougen et al., 00] Hougen, D. F., Benjaafar, S., Bonney, J. C., Budenske, J. R., Dvorak, M., Gini, M. et Nelson, B. (2000). A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 501-507). IEEE.

[Huang et al., 87] Huang, Y. Y., Cao, Z. L., Oh, S. J., Kattan, E. U., et Hall, E. L. (1987, February). Automatic operation for a robot lawn mower. In *Cambridge Symposium Intelligent Robotics Systems* (pp. 344-354). International Society for Optics and Photonics.

[Jäger et Nebel, 02] Jäger, M., et Nebel, B. (2002). Dynamic decentralized area partitioning for cooperating cleaning robots. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 3577-3582). IEEE.

[Jennings et al., 98] Jennings, N. R., Sycara, K., et Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous agents and multi-agent systems*, 1(1), 7-38.

[Julià et al., 08] Julià, M., Gil, A., Payá, L., et Reinoso, O. (2008). Potential Field based Integrated Exploration for Multi-robot Teams. In *ICINCO-RA (2)* (pp. 308-314).

[Kaelbling, 91] Kaelbling, L. P. (1991). A situated-automata approach to the design of embedded agents. *ACM SIGART Bulletin*, 2(4), 85-88.

[Kamoun, 07] Kamoun, M. A. (2007). Conception d'un système d'information pour l'aide au déplacement multimodal: Une approche multi-agents pour la recherche et la composition des itinéraires en ligne (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).



- [**Kavraki et al., 98**] Kavraki, L. E., Kolountzakis, M. N., et Latombe, J. C. (1998). Analysis of probabilistic roadmaps for path planning. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 14(1), 166-171.
- [**Kennedy, 06**] Kennedy, J. (2006). Swarm intelligence. In *Handbook of nature-inspired and innovative computing* (pp. 187-219). Springer US.
- [**Kennedy, 11**] Kennedy, J. (2011). Particle swarm optimization. In *Encyclopedia of machine learning* (pp. 760-766). Springer US.
- [**Khatib, 86**] Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1), 90-98.
- [**Kovač et al., 11**] Kovač, M., Hraiz, W., Fauria, O., Zufferey, J. C., et Floreano, D. (2011, December). The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1503-1508). IEEE.
- [**Kuyucu et al., 12**] Kuyucu, T., Tanev, I., et Shimohara, K. (2012). Evolutionary optimization of pheromone-based stigmergic communication. In *Applications of Evolutionary Computation* (pp. 63-72). Springer Berlin Heidelberg.
- [**La Valle, 98**] LaValle, S. M. (1998). Rapidly-Exploring Random Trees A New Tool for Path Planning.
- [**Latombe, 12**] Latombe, J. C. (2012). Robot motion planning (Vol. 124). *Springer Science et Business Media*.
- [**Le petit robert, 92**] Le Petit Robert. Vol. 1-Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. (1992). Paris: Dictionnaires Le Robert.
- [**Liang et al., 13**] Liang, J., Yang, X., Wang, T., Yao, G., et Zhao, W. (2013). Design and experiment of a bionic gannet for plunge-diving. *Journal of Bionic Engineering*, 10(3), 282-291.
- [**Liu et al., 10**] Liu, D., Zhou, X., Liang, A., et Guan, H. (2010, October). A swarm intelligence based algorithm for distribute search and collective cleanup. In *Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS), 2010 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 161-165). IEEE.

[Lock, 11] Lock, R. J. (2011). *A biologically-inspired multi-modal wing for aerial-aquatic robotic vehicles* (Doctoral dissertation, University of Bristol).

[Lock et al., 13] Lock, R. J., Burgess, S. C., et Vaidyanathan, R. (2013). Multi-modal locomotion: from animal to application. *Bioinspiration et biomimetics*,

[Low et al., 07] Low, K. H., Zhou, C., Ong, T. W., et Yu, J. (2007, December). Modular design and initial gait study of an amphibian robotic turtle. In *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on* (pp. 535-540). IEEE.

[Low et al., 15] Low, K. H., Hu, T., Mohammed, S., Tangorra, J., et Kovac, M. (2015). Perspectives on biologically inspired hybrid and multi-modal locomotion. *Bioinspiration et biomimetics*, 10(2), 020301.

[Maes, 91] Maes, P. (1991). The agent network architecture (ANA). *Acm sigart bulletin*, 2(4), 115-120.

[Maes, 94] Maes, P. (1994). Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM*, 37(7), 30-40.

[Mandiau et al., 02] Mandiau, R., Grislin-Le Strugeon, E., et Péninou, A. (2002). Organisation et applications des SMA.

[Mandiau et Grislin-Le Strugeon, 02] MANDIAU, R., et GRISLIN-LE STRUGEON, E. (2002). Systèmes multiagents. *Techniques de l'ingénieur. Informatique industrielle*, 1(S7216), S7216-1.

[Masehian et Naseri, 08] Masehian, E., et Amin-Naseri, M. R. (2008). Sensor-based robot motion planning-A Tabu search approach. *Robotics et Automation Magazine, IEEE*, 15(2), 48-57.

[Mataric, 94] Mataric, M. J. (1994, April). Learning to behave socially. In *Third international conference on simulation of adaptive behavior* (Vol. 617, pp. 453-462).

[Miao et Tian, 08] Miao, H., et Tian, Y. C. (2008, December). Robot path planning in dynamic environments using a simulated annealing based approach. In *Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on* (pp. 1253-1258). IEEE.

[Millonas, 92] Millonas, M. M. (1992). *Swarms, phase transitions, and collective intelligence* (No. LA-UR-92-3980; CONF-9206329--1). Los Alamos National Lab, NM (United States).



[Minsky, 86] Minsky, M. L. (1986). The society theory on mind. Audiovisual Center of the University of Geneva.

[Muller et al., 95] Muller, F. M., Franca, P. M., et Guidini, C. M. (1995). A diversification strategy for a tabu search heuristic to solve the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times. In *Proceedings of the Meeting on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future* (pp. 217-222).

[Murphy, 04] Murphy, R. R. (2004). Human-robot interaction in rescue robotics. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 34(2), 138-153.

[Nishikawa et al., 08] Nishikawa, M., Nishino, H., Misaka, Y., Kubota, M., Tsuji, E., Satoji, Y., et Yokohari, F. (2008). Sexual dimorphism in the antennal lobe of the ant *Camponotus japonicus*. *Zoological science*, 25(2), 195-204.

[O'Hare et Jennings, 96] O'Hare, G. M., et Jennings, N. (1996). Foundations of distributed artificial intelligence (Vol.9). John Wiley et Sons.

[Oliveira et al., 14] Oliveira, J. R., Calvo, R., et Romero, R. A. (2014, August). Integration of virtual pheromones for mapping/exploration of environments by using multiple robots. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS et EMBS International Conference on* (pp. 835-840). IEEE.

[Orians et Pearson, 79] Orians, G. H., et Pearson, N. E. (1979). On the theory of central place foraging. *Analysis of ecological systems*. Ohio State University Press, Columbus, 155-177.

[Panait et Luke, 04] Panait, L., et Luke, S. (2004, July). A pheromone-based utility model for collaborative foraging. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1* (pp. 36-43). IEEE Computer Society.

[Parker et al., 89] Parker, J. K., Khoogar, A. R., et Goldberg, D. E. (1989, May). Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms. In *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on* (pp. 271-276). IEEE.

[Parker, 98] Parker, L. E. (1998). ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 14(2), 220-240.



- [Pei et al., 10] Pei, Y., Mutka, M. W., et Xi, N. (2010, May). Coordinated multi-robot real-time exploration with connectivity and bandwidth awareness. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 5460-5465). IEEE.
- [Peterson et al., 11] Peterson, K., Birkmeyer, P., Dudley, R., et Fearing, R. S. (2011). A wing assisted running robot and implications for avian flight evolution. *Bioinspiration et biomimetics*, 6(4), 046008.
- [Peyvandi et al., 11] Peyvandi, M., Zafarani, M., et Nasr, E. (2011). Comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm in the improvement of power system stability by an sssc-based controller. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 6(2), 182-191.
- [Pinciroli et al., 13] Pincirolo, C., O'grady, R., Christensen, A. L., Birattari, M., et Dorigo, M. (2013). Parallel formation of differently sized groups in a robotic swarm. *計測と制御*, 52(3).
- [Rcklcitis et al., 97] Rcklcitis, I. M., Dudek, G., et Milios, E. E. (August 1997) Multi Robot Exploration of an Unknown Environment, Efficiently Reducing the Odometry Error. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 1340-1345, Nagoya, Japan. Morgan Kaufmann.
- [Reynolds, 87] Reynolds, C. W. (1987, August). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* (Vol. 21, No. 4, pp. 25-34). ACM.
- [Russell et Norvig, 95] Russell, S., Norvig, P., et Intelligence, A. (1995). A modern approach. *Artificial Intelligence*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 25, 27.
- [Russell, 97] Russell, S. J. (1997). Rationality and intelligence. *Artificial intelligence*, 94(1), 57-77.
- [Saha et Isto, 06] Saha, M., et Isto, P. (2006, October). Multi-robot motion planning by incremental coordination. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 5960-5963). IEEE.
- [Şahin et Winfield, 08] Şahin, E., et Winfield, A. (2008). Special issue on swarm robotics. *Swarm Intelligence*, 2(2), 69-72. *Springer Scienc.*
- [Şahin, 04] Şahin, E. (2004). Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. In *Swarm robotics* (pp. 10-20). *Springer Berlin Heidelberg*.

[**Sanchez et Latombe, 02**] Sanchez, G., et Latombe, J. C. (2002). Using a PRM planner to compare centralized and decoupled planning for multi-robot systems. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 2112-2119). IEEE.

[**Sauter et al., 2002**] Sauter, J. A., Matthews, R., Van Dyke Parunak, H., et Brueckner, S. (2002, July). Evolving adaptive pheromone path planning mechanisms. In *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1* (pp. 434-440). ACM.

[**Sauter et al., 05**] Sauter, J. A., Matthews, R., Van Dyke Parunak, H., et Brueckner, S. A. (2005, July). Performance of digital pheromones for swarming vehicle control. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems* (pp. 903-910). ACM.

[**Shoham, 93**] Shoham, Y. (1993). Agent-oriented programming. *Artificial Intelligence*, 60(1), 51-92.

[**Siddall et Kovač, 14**] Siddall, R., et Kovač, M. (2014). Launching the AquaMAV: bioinspired design for aerial-aquatic robotic platforms. *Bioinspiration et biomimetics*, 9(3), 031001.

[**Simoncelli et al., 00**] Simoncelli, M., Zunino, G., Christensen, H. I., et Lange, K. (2000). Autonomous pool cleaning: Self localization and autonomous navigation for cleaning. *Autonomous Robots*, 9(3), 261-270.

[**Simonin, 05**] Simonin, O. (2005, July). Construction of numerical potential fields with reactive agents. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems* (pp. 1351-1352). ACM.

[**Simonin, 10**] Simonin, O. (2010). Contribution a la résolution collective de problème: modèles d'auto-organisation par interactions directes et indirectes dans les SMA réactifs et robotiques (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

[**Steels, 94a**] Steels, L. (1994a). The artificial life roots of artificial intelligence. *Artificial Life Journal*, Vol 1, 1.

[**Steels, 94b**] Steels, L. (1994b). A case study in the behavior-oriented design of autonomous agents.



- [Stentz, 94] Stentz, A. (1994, May). Optimal and efficient path planning for partially known environments. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on* (pp. 3310-3317). IEEE.
- [Sumpter et Beekman, 03] Sumpter, D. J., et Beekman, M. (2003). From nonlinearity to optimality: pheromone trail foraging by ants. *Animal behaviour*, 66(2), 273-280.
- [Takano et Suzuki, 11] Takano, S., et Suzuki, E. (2011, December). New object detection for on-board robot vision by lifting complex wavelet transforms. In *Data Mining Workshops (ICDMW), 2011 IEEE 11th International Conference on* (pp. 911-916). IEEE.
- [Tanner et Kumar, 05] Tanner, H. G., et Kumar, A. (2005, April). Towards decentralization of multi robot navigation functions. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 4132-4137). IEEE.
- [Thomas, 05] Thomas, V. (2005). *Proposition d'un formalisme pour la construction automatique d'interactions dans les systèmes multi-agents réactifs* (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy I).
- [Turing, 50] Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433-460.
- [Thrun et al., 03] Thrun, S., Hahnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., ... et Whittaker, W. (2003, September). A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 4270-4275). IEEE.
- [Vachtsevanos et Hexmoor, 86] Vachtsevanos, G., et Hexmoor, H. (1986, December). A fuzzy logic approach to robotic path planning with obstacle avoidance. In *Decision and Control, 1986 25th IEEE Conference on* (pp. 1262-1264). IEEE.
- [Weiss, 99] Weiss, G. (1999). *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT press.
- [Woodward et Sitti, 14] Woodward, M. A., et Sitti, M. (2014). MultiMo-Bat: A biologically inspired integrated jumping–gliding robot. *The International Journal of Robotics Research*, 33(12), 1511-1529.
- [Wooldridge et Jennings, 94] Wooldridge, M., et Jennings, N. R. (1994). Agent theories, architectures, and languages: a survey. In *Intelligent agents* (pp. 1-39). Springer Berlin Heidelberg.



- [Wurm et al., 08] Wurm, K. M., Stachniss, C., et Burgard, W. (2008, September). Coordinated multi-robot exploration using a segmentation of the environment. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 1160-1165). IEEE.
- [Xue et al., 94] Xue, Q., Chien, Y. P., Feng, Y., et Palakal, M. J. (1994). A task planner for intelligent mobile robots using subgoal priority information. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 3(01), 1-21.
- [Yan, 12] Yan, Z. (2012). *Contributions à la coordination de tâches et de mouvements pour un système multi-robots* (Doctoral dissertation, Université Paris 8).
- [Yu et Li, 11] Yu, N., et Li, B. (2011, September). Study on mobile robot mapping based on binocular vision and voronoi diagram. In *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on* (pp. 860-863). IEEE.
- [Zacksenhouse et al., 88] Zacksenhouse, M., DeFigueiredo, R. J., et Johnson, D. H. (1988, December). A neural network architecture for cue-based motion planning. In *Decision and Control, 1988., Proceedings of the 27th IEEE Conference on* (pp. 324-327). IEEE.
- [Zedadra et al., 14] Zedadra, O., Seridi, H., Jouandeau, N., et Fortino, G. (2014, September). S MASA: A stigmergy based algorithm for multi-target search. In *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2014 Federated Conference on* (pp. 1477-1485). IEEE.
- [Zhao et Fu, 12] Zhao, J., et Fu, X. (2012). Improved ant colony optimization algorithm and its application on path planning of mobile robot. *Journal of Computers*, 7(8), 2055-2062.
- [Zlot et al., 02] Zlot, R., Stentz, A., Dias, M. B., et Thayer, S. (2002). Multi-robot exploration controlled by a market economy. (*ICRA*), 3, pages 3016 - 3023.
- [1] A. Florea “[http://turing.cs.pub.ro/cours\\_lipn/](http://turing.cs.pub.ro/cours_lipn/)” Université Paris 13, mars 2003.dv: le 17/06/2016
- [2] Warrior (Aero-Marine) Ltd“<http://www.warrioraero.com/GULL/>”, 2005.dv: le 25/05/2016
- [3] Michigan News“<http://ns.umich.edu/new/releases/6217>”, University of Michigan, 2006,dv:le 25/05/2016

- [4] U. Wilensky, "Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>," in *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999* dv:le 01/06/2016.