

17/004.455

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université de 8 Mai 1945 – Guelma -  
Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière  
Département d'Informatique



Mémoire de Fin d'études Master

13/243

Filière : Informatique

Option : Informatique Académique

Thème :

---

**Une Station de Recharge Mobile pour les  
Systèmes Multi-Robot**

---

Encadré Par :

Melle.ZEDADRA Ouarda

Présenté par :

AZZEDINE Amina

MOSBAH Karima

Juin 2013



# Remerciement

Que tous nos enseignants trouvent dans ce travail l'expression de toute reconnaissance et notre gratitude.

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir données la force et le courage de parcourir ce long chemin.

Nous tenons à présenter nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés sans ménager leur temps et leurs moyens, pour nous permettre de présenter ce modeste travail.

Nous espérons que cette contribution permettra à certains d'entrevoir les possibilités qui s'offrent pour que l'informatique, soit perçue à sa juste valeur.

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer cette thèse.

Nous rendons un vibrant hommage à nos encadreurs en particulier à l'exemplaire Mlle O. Zeddra qui nous a aidé à dégager les axes de recherche et nous a fait comprendre combien les efforts individuels dans la recherche scientifique pour être suscitant pour être d'évocation.

Notre connaissance va également à tous nos enseignants de notre formation qui nous ont guidés avec patience et confiance. A nos chers parents qui nous ont prodigué leur amour, leur encouragement, pour poursuivre notre chemin

Plus amis qui n'ont pas hésité à nous apporter leur soutien, leur encouragement et surtout leur compréhension

Merci



*Résumé :*

L'objectif de ce travail est de concevoir un collectif d'agents autonomes, plongés dans un environnement connu à priori, les agents concernés par ce problème disposent d'une quantité d'énergie limitée et qui ont besoin d'une source d'énergie qui doit être régulièrement renouvelée. Ils cherchent et collectent les ressources dynamiques dans des positions connues, puis les transportent à une base fixe (dépôt). On a aussi un autre agent station de recharge (Dock robot) qui est un agent réactif qui porte une quantité illimitée d'énergie et son objectif c'est de chercher les agents fourrageurs pour leur distribuer l'énergie, pour cela il est obligé durant la durée de simulation d'optimiser sa position à la meilleure position dans l'environnement, qui au pire des cas est un point du chemin du travail.

Dans notre travail la meilleure position est la source, et la station de recharge fait à chaque fois un suivi des phéromones digitales volatiles pour se positionner dans le voisinage de la source.

Les agents du système développé sont programmés en JAVA et sous la plateforme JADE.

Les résultats expérimentaux montrent que notre modèle comportemental proposé donne des résultats efficaces en temps de recharge (recharge time) et le temps total de recharge (total step).

**Mots Clés :**

Agents réactifs, robots fourrageurs, Dock robot, phéromone digital.

Sommaire:

*Sommaire :*

Résumé	
Sommaire.....	1
Liste des figures et des tableaux.....	4
Introduction général.....	6
<b>Chapitre I : Etat de l'art</b>	
I.Systèmes multi-agents : définitions et principe.....	9
Intoduction .....	9
I.1. Intelligences Artificielle Distribuée.....	9
I.2.Agent :concepts fondamentaux.....	10
I.2.1.Définition.....	10
I.2.2.Classification .....	12
I.3.Architecture .....	13
I.4.Principes des SMA.....	14
I.4.1.Définitions.....	14
I.4.2.Les caractéristique d'un SMA .....	15
I.4.3.Interaction .....	16
I.4.4.Organisation.....	16
I.4.5.Les communication.....	17
I.4.6.Coopération.....	18
I.4.7.La coordination.....	19
I.5.Sumulation multi-agent.....	22
Conclusion 23	

II.Problème d'énergie dans les système multi-agent robots(partage d'une station de recharge).....	24
Intoduction .....	24
II.1.l'énergie d'un robot : oncepts fondamentaux .....	24
II.2.1.Définition de l'autonomie énergétique.....	24
a).Vitesse sz recharge.....	25
b).Autosuffisance maximum .....	26
c).Nombre et position des stations de recharge.....	26
II.2.Approche proposés pour le problème d'énergie.....	26
II.2.1.Station de recharge fixe.....	26
II.2.2.Station de recharge mobile.....	27
II.3.Approche par SMA réactifs .....	28
II.3.1.Intelligence collective (sewarm Intelligence).....	28
II.3.2.Phéromone digital.....	29
a).Le modèle EVAP basé sur l'évaporation des phéromones .....	29
b).CLInG :un modèle basé sur la prpagation d'information.....	30
c).MARKA :un modèle collective basé sur la construction de champ potentiel ...	31
d).TANKER:une approche auto-organisée collective pour l'optimisation de position Tanker.....	32
Conclusion .....	35
<b>Chapitre II : Conception et implémentation</b>	
I.Introduction.....	36
II.Conception.....	36
II.1.Objectifs de l'application.....	36
II.2.Modélisation du problème .....	37
II.2.1.Modélisation de l'environnement .....	37
II.2.2.Modélisation des agents.....	37

II.3.Comportement des agents.....	39
III.Réalisation.....	42
III.1.Environment de programmation.....	43
1)Aspect matériel.....	43
2)Environment de développement.....	43
III.2.Présentation de l'application.....	45
III.3.Performance du système.....	50
IV.Conclusion.....	52
Conclusion Générale.....	54
Bibliographie.....	56

*Liste des figures*

*et des tableaux :*

## Liste des figures

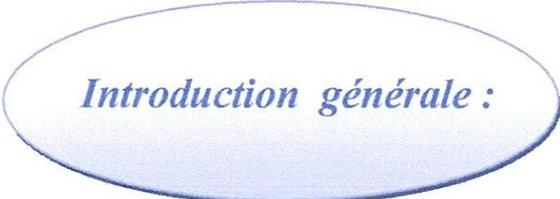
Numéro du figure	Titre de la figure	La page
I.1	Représentation classique d'un agent et de son environnement.	11
I.2	Agent cognitif et Agent réactif.	12
I.3	Architecture BDI pour un Agent cognitif.	13
I.4	Architecture de subsomption pour un Agent réactive.	14
I.5	Architecture d'un SMA.	15
I.6	communication par l'envoi de messages.	18
I.7	Les étapes du processus de simulation.	22
I.8	Une machine d'état finis représentant d'un robot fourrageur.	27
I.9	Oisiveté propagée.	32
I.10	La formation de gradient des champs numériques.	34
I.11	Attraction guide le Tanker au barycentre des demandes.	34
I.12	Répulsion garde la distance entre Tankers A,B.	32
I.13	Illustration de TANKER.	35
II.1	Machine d'état fini des robots fourrageurs.	39
II.2	Machine d'état fini d'état recharge.	40
II.3	Machine d'état fini de station de recharge (Dock robot).	40
II.4	Interface principale.	45
II.5	Création d'environnement.	46
II.6	Lancer la simulation.	46
II.7	L'environnement de la 1ère configuration.	47
II.8	Simulation de la 1ère configuration.	48
II.9	un histogramme représente Le temps de recharges de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.	50
II.10	un histogramme représente le temps total pour aller se recharger de 2 agents d'une simulation de 1812 itération	52

## Liste tableaux

Numéro de tableau	Titre de tableau	La page
<b>II.1</b>	le temps de recharge de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.	51
<b>II.2</b>	Le temps total pour aller se recharger de 2 agents d'une simulation de 1812 itération	51

---

*Introduction générale:*



## *Introduction générale :*

### **1. Problématique générale**

L'intelligence artificielle (IA) est inspirée de la métaphore du penseur solitaire : les chercheurs dans ce domaine ont cherché à produire des programmes isolés, en émulant les processus cognitifs humains pour résoudre des problèmes complexes. Les problèmes sont parfois naturellement posés de manière distribuée ; on suppose qu'il existe un certain nombre d'entités capables d'agir et d'interagir ; ces problèmes sont ainsi inscrits dans une branche de l'IA : intelligence artificielle distribuée (IAD). Elle a pour objectif de réaliser des organisations de systèmes. La métaphore du penseur solitaire a été remise en question et s'est accompagnée d'une nouvelle problématique : celle de l'interaction entre plusieurs entités.

Le thème des systèmes multi-agents (SMA), s'il n'est pas récent, est actuellement un champ de recherche très actif. Il offre aujourd'hui une alternative intéressante pour la conception, la mise en œuvre ou la simulation et la compréhension de systèmes coopératifs, distribués et ouverts. En effet, l'approche par agents recouvre plusieurs domaines bien différents mais complémentaires à savoir : la résolution des problèmes en intelligence artificielle distribuée où l'on s'intéresse à une vision sociale de la pensée, les systèmes adaptatifs où les problèmes relèvent des domaines sociaux avec leur complexité organisationnelle. Notons que d'autres domaines tels que la vie artificielle, la biologie, la sociologie, les sciences cognitives, etc., ont beaucoup apporté à cette discipline.

Notre travail de recherche se situe dans cet axe, où l'on s'est intéressé particulièrement aux systèmes multi-agents coopératifs. C'est une discipline qui s'intéresse aux comportements collectifs produits par les interactions de plusieurs entités autonomes et flexibles appelées agents, que ces interactions tournent autour de la coopération, de la concurrence ou de la coexistence entre ces agents. Les SMA ne sont plus des penseurs renfermés sur leurs propres raisonnements qui ignorent leur environnement, mais constituent une véritable société d'être qui doivent se mouvoir, planifier, communiquer, percevoir, agir, réagir et d'une manière générale vivre et travailler dans un milieu dans lequel ils entrent parfois en conflit avec d'autres agents.

La robotique est surtout les robots fourrageurs sont des applications possible des systèmes multi agents, elle est caractérisé par un ensemble d'agents (hétérogènes ou homogènes), qui doivent coopérer et coordonner leurs actions pour parvenir à réaliser leur objectif commun qui est la recherche et le collecte d'un échantillon de minerai précis dans un environnement inconnu, contraint ou non, à une base bien spécifique (dépôt). Ce problème est un problème benchmark dans le domaine des SMA, parce que il inclut dedans un ensemble de sous problèmes qui font par leurs complexité une branche à part a traité, d'un côté les agents doivent être dotés d'un mécanisme d'exploration (marche aléatoire, suivi de chemin, trouver la station, recharger.....), de mécanismes leurs permettant la localisation de la base et la détection de ressources, des mécanismes de coordination et de coopération pour augmenter la performance du groupe.

Les collectivités de robots auto-organisées représentent un développement naturel de la robotique mobile individuelle. Elles offrent une plus grande robustesse et permettent d'assurer une continuité de service. En effet, l'autosuffisance énergétique nécessairement limitée ou un incident oblige un individu à interrompre régulièrement son activité utile afin de s'occuper de ses propres besoins. Ces interruptions inévitables ont pour conséquences de modifier la dynamique de la collectivité.

## **2. Objective :**

Ce mémoire concerne l'étude de l'approche par Intelligence en Essaim pour le problème de fourrage et de l'exploration multi-agents. Plus précisément, ce travail est destiné à l'étude des algorithmes multi-agents réactifs dans lesquels l'importance est donnée à la limitation énergétique des robots (agents), le but donc est d'intégrer la limitation d'énergie au problème de fourrage multi-robots, et de proposer un système qui permet aux agents de coordonner les activités de fourrage et de recharge.

Notre objectif est de construire des systèmes composés d'un ensemble d'agents assurant un contrôle décentralisé pouvant améliorer le système à un tout cohérent, On cherche donc à concevoir un SMA réactif coopératif.

Nous considérons dans ce travail une tâche de robotique mobile autonome, où les robots collectent répétitivement des objets d'un endroit connu à l'avance et les déposent dans un dépôt qui se positionne généralement dans le centre de l'environnement. Pour travailler à des longues périodes de temps, ils doivent exécuter le comportement suivantes, ils doivent conduire à une station de recharge avant que leur énergie ne sera épuisée, rechargez et retournez au travail. Le temps d'aller-retour au travail est un temps énorme qui doit être

minimisé. La position physique de la station de recharge peut affecter significativement les performances d'un tel système. Placer la station de recharge loin du lieu de travail va augmenter le temps qui aurait pu être consacré au travail.

L'objectif principale de notre travail est de minimiser le temps d'aller-retour et de rechargement en définissons la station de recharge comme un robot (agent) mobile qui peut améliorer sa position à l'endroit où il y a plus de robots, ou à l'endroit où il y a des chemins de travail (chemins d'aller-retour à la base), tout en essayant de minimiser les interférences entre les différents agents.

### **3. Plan de mémoire :**

Ce mémoire se trouve composé de deux chapitres :

*Le premier chapitre :* constitue un état de l'art sur les SMA, il se compose de deux parties, une partie qui traite les concepts fondamentaux d'agent et des systèmes multi agents et tout ce qui tourne autour. La deuxième partie est consacrée au problème de l'énergie dans les SMA et le partage d'une station de recharge entre des robots ainsi nous présentons les différents travaux liés.

*Le deuxième chapitre :* composé de sa part de deux parties : conception et réalisation, il explique en détail l'architecture et le fonctionnement de l'application réalisée, ainsi que les schémas de comportement d'agent fourrageur et d'agent de l'agent station de recharge utilisé pour notre système de fourrage. Les résultats expérimentaux sont discutés dans ce chapitre, la suite des simulations réalisées montre que nos modèles donnent des résultats efficaces en temps de recharge.

Enfin nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

*Chapitre I:*  
*Etat de l'art.*

## Chapitre I : Etat de l'art

### I. Systèmes multi-agents : définitions et principes

#### **Introduction:**

Dans cette partie, nous allons introduire l'essentiel des concepts fondamentaux et les principes relatifs à l'étude des Systèmes Multi-Agents (SMA). Tout d'abord nous présenterons des définitions du concept Agent, les plus utilisées, puis nous citons la classification d'agents et les architectures. Ensuite, nous décrivons les principes des SMA et, nous présenterons par la suite un phénomène naturel qui est la simulation multi-agent.

La thématique des Systèmes Multi-Agents est actuellement un champ de recherche très actif pour de nombreux types d'applications. Sa particularité provient de sa connexion avec plusieurs domaines de recherche comme l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) et la Vie Artificielle (VA). C'est une discipline qui s'intéresse aux comportements collectifs produits par les interactions de plusieurs entités autonomes appelées agents.

#### **I.1 Intelligences Artificielle Distribuée**

La définition du domaine de recherche de l'Intelligence Artificielle Distribuée est celui de l'étude et de la conception d'organisations d'agents artificiels pour obtenir des systèmes intelligents [Ferber ,95] [Seels ,91]. La notion d'agent artificiel fait référence à tout artefact, logiciel aussi bien que matériel, capable d'exhiber une certaine autonomie, donc opérationnellement et informationnellement par rapport à l'environnement dans lequel il est plongé. L'environnement désigne ici aussi bien l'espace (topologique, temporel) que les autres agents (l'environnement social), avec lesquels l'agent forme un système multi-agents.

Le couplage entre l'agent et son environnement se réalise par des capacités d'action et de perception qui lui sont propres. L'ensemble des actions qui s'actualisent dans un environnement donné forme le comportement de l'agent. La notion de systèmes intelligents doit être comprise, et ceci sera important par la suite, comme la référence à des systèmes apparemment intelligents, c'est-à-dire des systèmes auxquels un observateur humain peut prêter une intelligence dans la réalisation d'une tâche, dans la résolution d'un problème, ou

dans son interaction avec lui-même, quels que soient, par ailleurs, les mécanismes sous-jacents conduisant à cette "intelligence". Elle n'est donc, dans cette perspective, pas très différente de celle habituellement employée en Intelligence Artificielle [Simon, 91].

## I.2 Agent : concepts fondamentaux

Le concept Agent a été l'objet d'études pour plusieurs décennies dans différentes disciplines. Il a été non seulement utilisé dans les systèmes à base de connaissances, la robotique, le langage naturel et d'autres domaines de l'intelligence artificielle, mais aussi dans des disciplines comme la philosophie et la psychologie.

### I.2.1. Définitions

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs définitions du concept Agent. Elles présentent certaines similitudes et dépendent du type d'application pour laquelle est conçu l'agent [Fikes, 71]. Les définitions respectives de Ferber et de Jennings. Sont généralement les plus communément utilisées au sein de la communauté Multi-Agents:

**Définition 1 : Agent [Ferber, 95].**

*« Un agent est une entité physique ou virtuelle.*

- qui est capable d'agir dans un environnement ;*
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;*
- qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;*
- qui possède des ressources propres ;*
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;*
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;*
- qui possède des compétences et offre des services ;*
- qui peut éventuellement se reproduire. »*

A titre d'exemple, on peut dire que l'homme et la fourmi sont des agents physiques. En ce qui concerne l'aspect logiciel, une définition synthétique peut être donnée (Définition2)

**Définition 2 :**

Jennings, Sycara et Wooldridge [Jennings et al., 98] ont proposé la définition suivante pour un agent:

«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 ».

Les notions “situé”, “autonomie” et “flexible” sont définies comme suit:

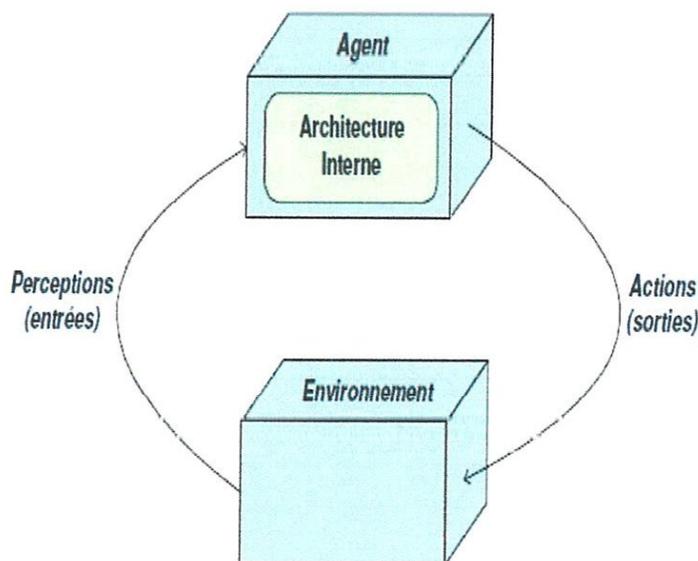
**L'autonomie** : l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne ;

**La situation**: l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement ; [Nguyen, 03]

**La flexibilité** : flexible signifie *réactif*, *proactif* et faisant preuve de *capacités sociales*.

- *Réactivité* : un agent réactif maintient un lien constant avec son environnement et répond aux changements qui y surviennent ;
- *Pro-activité* : un agent proactif génère et satisfait des buts. Son comportement n'est pas seulement dirigé par les événements ;
- *Capacités sociales* : un agent social est capable d'interagir avec les autres agents, voire de coopérer avec eux ;

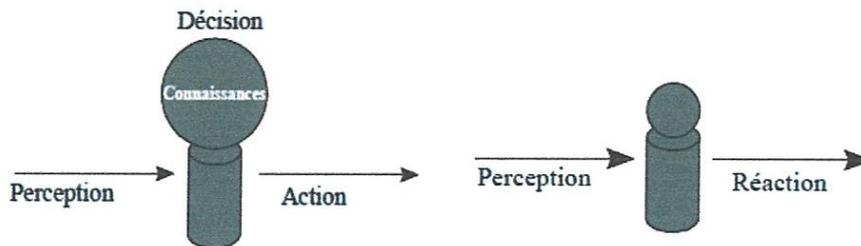
Comme le montre cette figure, un agent est défini par un ensemble de *perceptions* (entrées), un ensemble d'*actions* (sorties) et on parle de *l'architecture interne* de l'agent pour désigner les mécanismes qui définissent sa dynamique intrinsèque.



**Figure I.1** – Représentation classique d'un agent et de son environnement [Fabien, 04].

### I.2.2. Classification

A partir des définitions précédents, différents modèles d'agents peuvent être envisagés suivant deux axes: la vision fonctionnelle (un agent est *autonome*, *interagissant* ou *social*) et la vision décisionnelle (s'appuie sur le degré de couplage à l'*environnement*). Un agent est *réactif*, *hybride* ou *cognitif* (*délibératif*).



**Figure I.2 : Agent cognitif et Agent réactif [Moujahed, 07].**

#### *Agent cognitif*

Il est intelligent par lui-même c'est-à-dire qu'il effectue un certain raisonnement pour choisir ses actions possibles, Il possède une capacité de mémoire, de raisonnement ou de communication importante. Les agents cognitifs disposent d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations disponibles et un raisonnement nécessaire à la réalisation de leur tâche ainsi qu'à la gestion des interactions avec les autres agents et avec l'environnement [Guermoudi et Benamar, 11].

#### *Agent réactif*

Un agent réactif ne fait que réagir aux changements qui surviennent dans l'environnement. Les agents réactifs sont souvent qualifiés de ne pas être "intelligents" par eux-mêmes. Ils n'ont pas une représentation symbolique de l'environnement ou des connaissances et ils ne possèdent pas de croyances, pas des mécanismes d'envoi de messages ni des mécanismes de planification. Leurs capacités répondent uniquement au mode stimulus/action qui peut être considéré comme une forme de communication.

#### *Agent hybride*

Chaque agent hybride est caractérisé par la notion de couches et chaque couche représente soit les agents cognitifs, soit les agents réactifs. Il combine entre les deux capacités réactives et cognitives ce qui leur permet d'adapter leur comportement en temps réel à l'évolution de l'environnement [Guermoudi et Benamar, 11].

### I.3. Architecture :

Un agent se caractérise essentiellement par la façon dont il est conçu et par ses actions, en d'autres termes par son architecture et son comportement. L'architecture correspond à un point de vue de concepteur, qui peut se résumer ainsi : comment assembler les différentes parties d'un agent de manière qu'il accomplisse les actions que l'on attend de lui ? L'architecture d'un agent caractérise ainsi sa structure interne, c'est-à-dire le principe d'organisation qui sous-tend l'agencement de ses différents composants. L'architecture d'un agent est donc une organisation interne modulaire manipulant des flux de données (diffusion, traduction) et gérée par une structure de contrôle (par inhibition, hiérarchique...) [Champion, 03]. Quelle que soit son architecture, un agent perçoit et agit sur son environnement.

#### *L'architecture BDI pour les Agent cognitifs*

L'une des architectures cognitives les plus connues est *l'architecture BDI*: Belief (Croyance), Desire (Désir), Intention (Intention). Un agent BDI doit donc mettre à jour ses croyances avec les informations qui lui proviennent de son environnement, décider quelles options lui sont offertes, filtrer ces options afin de déterminer de nouvelles intentions et poser ses actions au vu de ses intentions [Richard, 11].

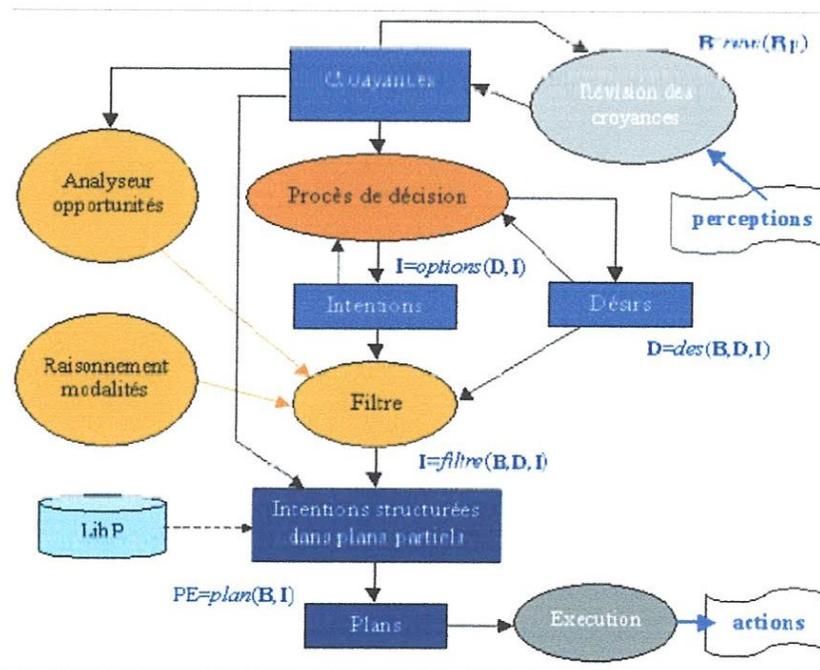


Figure I.3 : Architecture BDI pour un Agent cognitif [Fabien, 04].

### *L'architecture subsumption pour les Agents réactifs*

Proposée par Brooks [Brooks,1986]. Le principe de cette architecture est de concevoir le processus décisionnel en considérant un ordre de priorité entre des modules qui représentent les tâches pouvant être accomplies par l'agent. Les conditions d'activation de chaque module sont alors évaluées suivant cet ordre de manière à sélectionner la tâche à effectuer en priorité. Par exemple, il peut être vital pour un robot de se recharger en énergie si ses batteries faiblissent. Si tel est le cas, cette tâche devient donc prioritaire. Dans le cas contraire, le robot évalue les conditions d'activation de la tâche de priorité immédiatement inférieure et ainsi de suite [Moujahed, 07].

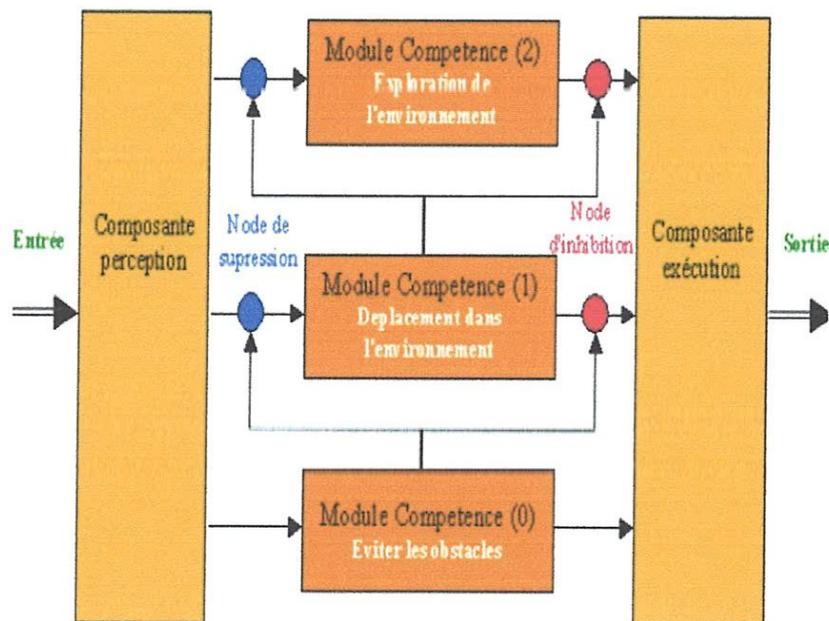


Figure I.4 : Architecture de subsumption pour un Agent réactive [Fabien, 04].

## I.4. Principes des SMA

Un SMA est un système composé d'entités informatiques, appelées des *agents*, qui évoluent et interagissent dans un *environnement* commun. L'interaction consiste en la coopération et la concurrence entre des agents qui peuvent être hétérogènes.

### I.4.1. Définitions :

Demazeau propose une décomposition d'un SMA en quatre dimensions qui correspondent aux quatre voyelles A, E, I et O, et qui est développée dans [Demazeau,01] (comme le montre la figure 1.5)

- *Agent* : définition des modèles ou des architectures des composants du système ;
- *Environnement* : milieu dans lequel sont plongés les agents, composé d'objets qui sont perçus et manipulés par les agents, et qui obéit à des lois physiques ;
- *Interactions* : ensemble des infrastructures, langages et protocoles d'interaction entre agents ;
- *Organisation* : structure des agents en groupes, hiérarchies, relations, etc.

#### I.4.2. Les caractéristiques d'un SMA

Un SMA est généralement caractérisé ainsi :

- Chaque agent dispose d'informations ou de capacités de résolution de problèmes limités (ainsi, chaque agent a un point de vue partiel)
- Il n'y a aucun contrôle global du système multi-agent.
- Les données sont décentralisées
- Le calcul est asynchrone. [Jarras et Chaib-Draa, 02].

Et nous pouvons dire qu'un SMA peut prendre une des propriétés suivantes [Guermoudi et Benamar, 11].

*Ouvert* : les agents y entrent et en sortent librement (ex: une application de commerce électronique, etc.) ;

*Fermé* : l'ensemble d'agents reste le même ;

*Homogène* : tous les agents sont construits sur le même modèle ;

*Hétérogène* : des agents de modèles différents, de granularités différentes.

*Mixte (ou non)* : les agents « humains » sont partie intégrante du système, comme le serait un.

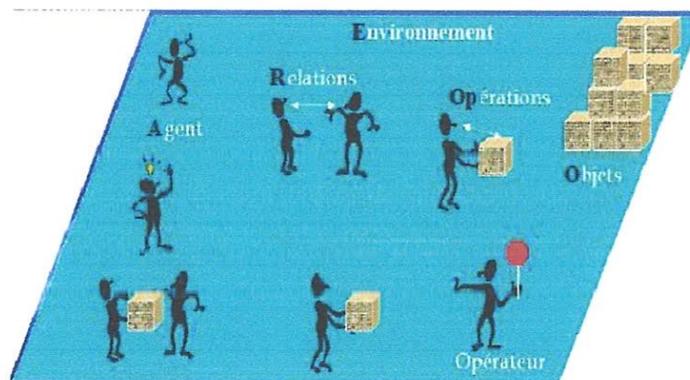


Figure I.5 : Architecture d'un SMA [Guermoudi et Benamar, 11].

### I.4.3. Interaction

La notion d'interaction constitue l'essence d'un système multi-agents puisque c'est grâce à elle que les agents vont pouvoir produire des comportements collectifs complexes.

Morin [Morin, 77] a donné la définition suivante de l'interaction :

*« Les interactions sont des actions réciproques modifiant le comportement ou la nature des éléments, corps, objets, phénomènes en présence ou en influence. ».*

JacquesFerber[Ferber, 95] définit l'interaction comme :

*« Une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques »*

Les interactions s'expriment ainsi à partir d'une série d'actions dont les conséquences exercent en retour une influence sur le comportement futur des agents. Un système multi-agents se distingue, donc, d'une collection d'agents indépendants par le fait que les agents interagissent en vue de réaliser conjointement une tâche ou d'atteindre conjointement un but particulier. La communication peut être vue comme une forme d'interaction.

*« Les agents peuvent interagir en communiquant directement entre eux ou indirectement par l'intermédiaire d'un autre agent ou même en agissant sur leur environnement »* [Jarras etChaib-Draa, 02].

Il existe différentes possibilités d'interactions selon les agents et les systèmes. Une interaction peut être sans communication, primitive par communication (par exemple en utilisant l'environnement comme support [Drogoul, 93]), par envois de messagesou sophistiquée en utilisant un langage. Lorsqu'il y a communication, celle-ci est faite avec l'objectif de satisfaire un but ou une intention : *«communiquer c'est agir »* [Austin ,62]; elle a une importance aux niveaux communautaire, social et institutionnel. Un agent doit donc être capable de transmettre des informations et, surtout, d'induire chez l'autre un comportement spécifique afin de favoriser la satisfaction d'un but [Champion, 03].

La coopération est la forme générale de l'interaction la plus étudiée dans les SMA (en section I 3,5)

### I.4.4. Organisation

Les interactions entre agents sont à l'origine des multiples problématiques liées aux systèmes multi-agents. Or, l'état de l'organisation d'une société est la conséquence des interactions entre les agents. Réciproquement, le comportement des agents est contraint par l'ensemble des structures organisatrices de la société.

Une organisation est un ensemble d'individus regroupés au sein d'une structure régulée, ayant un système de communication pour faciliter la circulation de l'information, dont le but est de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés. Herbert Simon [Simon,91] souligne que « *la forme d'une organisation dépend des caractéristiques individuelles de ses membres* ».

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

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

Les communications, dans les SMA comme chez les humains, sont à la base des interactions et de l'organisation.

#### **I.4.5. Les communications**

Russel [Russel,06] définit la communication comme « *La communication est l'échange intentionnel d'informations occasionné par la production et la perception de signes issus d'un système partagé de signes conventionnels* ».

Une communication peut être définie comme une forme d'action locale d'un agent vers d'autres agents, c'est un échange entre les agents eux-mêmes, au moyen d'un langage, on distingue deux modes de communication entre agents:

- **Communication par l'envoi de messages :** Ce type permet aux agents d'envoyer leurs messages directement aux destinataires par les mécanismes spécifiés. Pour que les agents puissent communiquer de manière efficace, ils doivent posséder un langage de communication commun, leur permettant de se comprendre ainsi que de s'échanger des messages [Haddad et Hamidi, 09].



**Figure I.6 :** communication par l'envoi de messages [Boussebough,11].

- **Communication par partage d'informations :** Les composants ne sont pas en liaison directe mais communiquent via une structure de données partagée, ou on trouve les connaissances relatives à la résolution (état courant du problème) qui évolue durant le processus d'exécution. Cette manière de communiquer est l'une des plus utilisées dans la conception des systèmes multi-experts. L'exemple parfait d'utilisation de ce mode de communication est l'architecture de blackboard. [Bellifa,11]

#### 1.4.6. Coopération

Les études dans le domaine de la sociologie ont montré que les humains doivent coopérer à cause de leurs capacités limitées, elle représente l'attitude sociale qui permet l'augmentation des performances de groupe [Doran et al, 97], [Glizes et al, 99], [Velagapudi et al, 07]. De plus la coopération se fonde à la fois sur la complémentarité d'intérêt et la confiance [Melaye et al, 05]. [Boussebough, 11]

Ferber remarque que les chercheurs ont développé différents points de vue sur la coopération. Ainsi, on peut considérer la coopération comme une attitude adoptée par les agents qui décident de travailler ensemble ou on peut adopter le point de vue d'un observateur extérieur au système multi-agent qui interprète a posteriori les comportements des agents pour les qualifier de coopératifs ou non suivant des critères préétablis tels que l'interdépendance des actions ou le nombre de communications effectuées [Chaib-draa et al.,01].

#### Définition:

On dira que plusieurs agents coopèrent, ou encore qu'ils sont dans une situation de coopération, si l'une des deux conditions est vérifiée:

1. L'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différenciellement les performances du groupe.
2. L'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels.

Ferber propose un certain nombre de méthodes permettant de mettre en œuvre cette attitude coopérative entre agents comme :

- la communication pour échanger des informations ;( voir section (I.3.4)).
- le regroupement physique des agents ;
- la spécialisation pour rendre certains agents plus adaptés à leur tâche ;
- la répartition des tâches, des informations et des ressources ;
- la coordination d'actions (voir section (I.3.4)).

De plus, 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.

La coopération organisée est caractérisée par la bonne coordination des actions des agents et par une répartition adéquate des agents autour des différentes tâches. La coopération non-organisée est caractérisée par l'absence de structures prédéfinies ; elle relève d'accords mutuels locaux. Dans ce cas Les tentatives de définition de la coopération sont souvent subordonnées aux concepts de coordination. La coordination des actions est donc l'une des principales méthodes pour assurer la coopération entre agents autonomes. [Boussebough, 11]

#### **I.4.7. La coordination**

Définie par Thomas Malone et KrevinCrowston[Malone et al. , 90] comme l'acte de gérer les interdépendances des différentes activités exécutées pendant la réalisation d'un but. Les interdépendances regroupent les prérequis (le résultat d'une activité est nécessaire à une autre activité), le partage de ressources et la simultanéité (il existe une synchronisation entre l'exécution des activités). Suivant cette définition, la coordination recouvre les indices de coopération se rapportant au partage des ressources, à la coordination des actions et à la parallélisations des actions.

##### **La coordination d'actions**

La coordination d'actions Gérer un ensemble d'agents suppose l'exécution d'un certain nombre de tâches supplémentaires qui ne sont pas directement productives mais qui servent simplement à faire en sorte que les actions productives puissent s'accomplir dans les meilleures conditions [Ferber, 95].Lorsqu'il s'agit de système monolithique, ces tâches supplémentaires font partie du système organisationnel, mais dans le cas d'un système multi-agent , c'est-à-dire d'un travail nécessairement distribué, on parle de tâches de coordination. Celles-ci sont indispensables dès lors que l'on se trouve en présence d'un ensemble d'agents

autonomes qui poursuivent leurs propres buts, la réalisation de tâches productives entraînant avec elles tout un cortège de tâches de coordination sans lesquelles les premières ne peuvent être accomplies. La phase de coordination d'actions est directement impliquée dans la définition de l'ordre des actions à effectuer. [Ferber, 95]

### **Définitions**

La coordination d'actions a ainsi été décrite par Thomas W. Malone [Malone et al., 88] comme :

« L'ensemble des activités supplémentaires qu'il est nécessaire d'accomplir dans un environnement multi-agents et qu'un seul agent poursuivant les mêmes buts n'accomplirait pas ».

Ferber [Ferber, 95] la définit comme « La coordination des actions, dans le cadre de la coopération, peut donc 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 ».

**Formes de coordination :** Les principales techniques de coordination dans les SMA sont : la coordination par synchronisation, la coordination par planification, la coordination par réglementations et la coordination réactive. Cette dernière forme le type de coordination qu'on a utilisé dans le cadre de notre travail, on expliquera dans ce qui suit quelques concepts qui se relient à cette coordination

### **Coordination réactive**

La coordination réactive s'intéresse essentiellement, comme son nom l'indique, à la coordination des agents réactifs.

Considère qu'il est souvent plus facile de mettre en œuvre des mécanismes de coordination fondés sur des agents réactifs que de planifier l'ensemble des actions et de leurs interactions avant d'agir. D'une manière générale ces techniques font surtout appel à la liaison perception-action d'un agent, c'est-à-dire qu'elles s'accomplissent in situ, et non a priori comme les précédentes. On peut différencier plusieurs méthodes de coordination réactive qui diffèrent par leur usage de champs ou de routines (réflexes), par leur usage ou non de représentations limitées des autres et par l'emploi ou non de contraintes et de dépendances.

Les méthodes de coordination réactives se résument toutes à l'utilisation des techniques suivantes :

1. Utilisation de champs de potentiels ou plus généralement de champs de vecteurs pour la détermination du déplacement des agents mobiles ;
  2. Utilisation de marques pour coordonner l'action de plusieurs agents, ces marques permettant d'utiliser l'environnement comme un système de communication souple, robuste et simple ;
  3. Utilisation de l'éco-résolution [Ferber, 95].
- **Les champs de forces symétriques :** Si le comportement de meute peut s'expliquer par une simple combinaison vectorielle en est-il de même lorsque plusieurs agents mobiles, et alors possible de modéliser le déplacement d'un agent à partir des forces attractives et répulsives résultant de la combinaison de potentiels correspondant à des buts ou à des obstacles. Peut-on généraliser cette méthode à des agents mobiles? Dans ce cas, les agents sont des obstacles qui modifient le paysage des potentiels des autres agents. Chacun d'eux construit sa propre vision du monde, son propre champ de potentiels, à partir des informations dont il dispose et donc de ce qu'il perçoit [Ferber, 95].
  - **Marquage de l'environnement :** Qu'est-ce qu'une marque? Une marque est un signe matériel ou une empreinte qui sert à indiquer artificiellement l'environnement afin de coordonner les actions des agents. Les marques peuvent être déposées, lues et retirées par les agents, mais leur effet peut aussi disparaître lentement, par "évaporation naturelle" dans l'environnement [Ferber, 95].
  - **Marques et synchronisation d'actions :** Connah et Wavish ont montré la difficulté qu'il pouvait y avoir de concevoir un ensemble d'agents réactifs coopérants et, en particulier, qu'il ne suffisait pas d'ajouter "bêtement" des agents réactifs pour qu'automatiquement les performances du système soient améliorées. Le comportement de chaque agent est défini sous la forme d'un ensemble de règles de production qui implémentent des actions situées. Dans ce cas, les marques jouent le rôle d'indices pour la coordination des actions entre les agents et empêchent les actions inefficaces éventuelles. Il est aussi possible d'utiliser les marques pour amplifier les performances des agents en servant à la fois d'indice de collaboration et de coordination d'actions [Ferber, 95].

Après cette introduction aux concepts des SMA la simulation, de ces systèmes est maintenant présentée

### I.5. Simulation multi-agent :

La simulation multi-agent permet une validation d'un modèle. La structure, la dynamique et l'évolution d'un système sont liées. Lorsqu'il s'agit d'imiter une réalité à l'aide de systèmes multi-agents, modèle et simulation sont liés.

En simulation multi-agent, la vision d'un phénomène est, si l'on considère que celui-ci est modélisé suivant les principes des systèmes multi-agents, distribué. Ainsi, le phénomène réel à simuler est décomposé en un ensemble d'éléments discrets autonomes dont les interactions reproduisent le phénomène. Chacun des éléments est ensuite modélisé par un agent pour lequel il faut pour définir les connaissances, les capacités fonctionnelles, les comportements et les modes d'interaction qu'il adoptera à l'encontre des autres agents [Drogoul, 93].

La simulation, à l'instar des observations effectuées dans la réalité, permet d'évaluer le modèle défini et de l'enrichir (Figure 1,7).

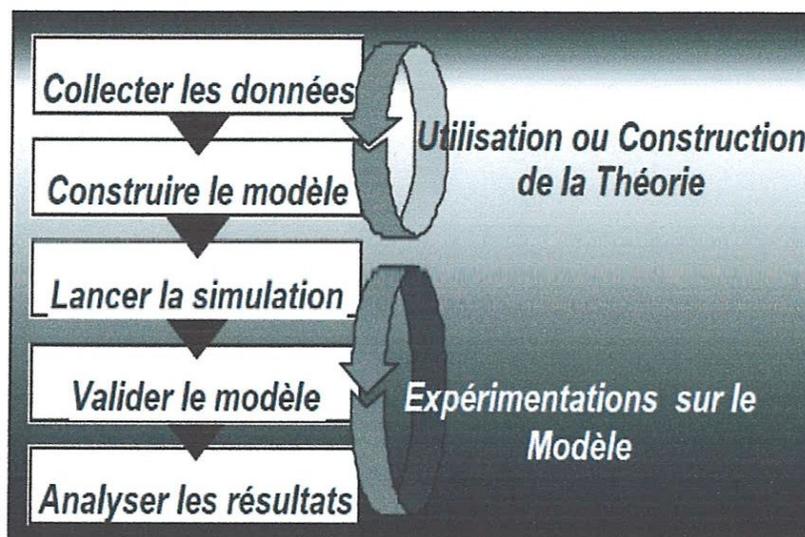


Figure I.7 : Les étapes du processus de simulation [Drogoul 93].

La simulation multi-agent est donc une technique qui permet de reproduire des phénomènes difficilement appréhendables de manière analytique. Il s'agit également d'un outil puissant et d'une méthode permettant de découvrir de nouvelles règles d'interaction sociale ou d'organisation.

La simulation multi-agent présente de nombreuses applications et est utilisée, surtout depuis le début des années 1990, dans des domaines extrêmement variés. Il est ainsi possible de citer

quelques exemples tels que l'éthologie et plus spécialement la simulation de fourmilières [Drogoul, 93], l'origine et l'évolution du langage humain [Kaplan, 98], la gestion des ressources naturelles [Bousquet, 99], les phénomènes urbains [Vanbergue, 99], ou encore les organisations humaines [Prietula ,98] [**Champion, 03**].

### **I.6. Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons présenté un état de l'art sur les notions théoriques en rapport direct avec les systèmes multi-agent. Cet état de l'art présente de manière plus ou moins détaillée des définitions et explications sur les concepts d'agents et de Système Multi-Agent, les principes de SMA jusqu'à l'exploration des relations entre les agents : l'interaction, organisation, communication et on a présenté la coopération et ses formes et la coordination et ses formes .Enfin nous avons présentée par la suite un phénomène naturel qui est la simulation multi-agent

## II. Problème d'énergie dans les systèmes multi robots (partage d'une station de recharge)

“A single, self-sufficient and self-controlling mobile robot must visit a series of waypoints. The number of waypoints, the energy cost of travelling between them and the robot's limited onboard energy storage capacity mean that the robot must recharge its onboard energy store, possibly many times. The series of waypoints could be given a priori, or could be dynamically generated based on previous data” [ Wawerla and Vaughan,07].

### Introduction

Le maintien d'énergie est une condition essentielle dans la création des robots autonomes de longue durée. Un robot autonome peut importer le degré de sophistication de son IA, aura une charge de travail et une durée de vie limitée par l'énergie disponible. Ce problème est en commun avec tous les organismes vivants. Donc il est nécessaire plus qu'on croit qu'il peut apporter des limites intéressantes pour la conception des systèmes intelligents autonomes.

L'approche habituelle pour résoudre ce problème consiste à équiper un robot avec des moyens pour qu'il recharge, habituellement en visitant un dispositif de charge à un endroit fixe. Cette approche exige des contraintes sur les détecteur et les capacités de calcul des robots, par exemple trouver un emplacement connu fixe nécessite la localisation, qui est certainement possible, mais peut être très coûteux à réaliser à l'intérieur d'un robot et peut exiger des capteurs à haute résolution tels que les scanners laser.

### II.1. L'énergie d'un robot : concepts fondamentaux

#### II.2.1. Définition de l'autonomie énergétique

Un robot comme n'importe quelle machine dépense de l'énergie. Un robot mobile a besoin d'embarquer une source d'énergie qui doit être renouvelée régulièrement grâce à la recharge. Cette dernière peut être automatique ou en partie manuelle. L'autonomie énergétique représente la capacité d'un robot à prendre des décisions en accord avec ses ressources énergétiques. Cela implique en particulier d'aller se recharger avant épuisement de l'énergie et de s'engager à des tâches dans la mesure où l'énergie restante lui permet de les remplir. C'est pourquoi il est indispensable de pouvoir estimer le temps d'activité restant avant que la batterie soit épuisée.

L'autonomie énergétique pour les robots mobiles est représentée par les deux capacités principales suivantes: l'autosuffisance et l'auto-alimentation. Plus précisément, un robot autonome doit être capable de se recharger et doit avoir la capacité de :

- trouver des stations de recharge
- se rendre compte de son besoin de recharge.

Les autres capacités comme l'interaction et la connexion à une station de recharge ou le partage de station avec d'autres robots bien que relevant plus de la robotique pure que de l'IA sont également à considérer. [Sempé,11]

- **Autonomie et autosuffisance**

Tous les robots sont aujourd'hui équipés d'accumulateurs électriques qui leur permettent d'assurer leur autosuffisance énergétique durant une certaine période. Malheureusement, la durée de l'autosuffisance est couramment appelée autonomie : "tel PC portable dispose d'une autonomie maximum de 3 heures". Or autonomie ne signifie pas indépendance ou autarcie, tandis que la capacité de se connecter de son propre chef à une station de recharge est un facteur d'autonomie. Par souci de clarté et de précision [Chu Hoang.N,07].

- **Pourquoi une recharge automatique**

Le choix de la recharge automatique, c'est-à-dire entièrement contrôlée par le robot, plutôt que manuelle, se situe dans la logique de l'autonomie, mais il a un coût. D'une part, un équipement spécifique tant du côté du robot que de celui du chargeur est nécessaire.

D'autre part, la recharge est une période d'inactivité ce qui, selon le type d'application, peut être gênant, voire intolérable. Au contraire, le remplacement manuel des batteries vides par des batteries chargées permet de réduire le temps d'indisponibilité au minimum [Hoang.N,07].

- **Le cycle Travail/ Recharge**

La vie d'un robot autonome se décompose en deux phases, l'une consacrée au travail – le robot est disponible pour réaliser des tâches – et l'autre à la recharge. Cette alternance produit un cycle qui rythme et contraint l'activité du robot. On trouvera dans [McFarland,97] une analyse de la productivité de ces cycles. Ces cycles sont caractérisés par la vitesse de recharge et l'autosuffisance maximum. Le premier facteur détermine le ratio temporel travail/recharge et le second la durée d'activité continue d'un robot [Sempé,11].

- a) **Vitesse de recharge** : Si elle est par nature variable en réalité, la fixe en simulation à une valeur unique représentant approximativement la vitesse moyenne que permet

lesystème de recharge. Le fait que cette vitesse soit élevée allège les contraintes liées au partage des stations : une petite réserve d'énergie suffira pour qu'un robot attende la libération d'une station occupée. Quant à la durée des absences dues à la recharge, elle sera étudiée à travers les variations de l'autosuffisance maximum [Sempé,11].

- b) **Autosuffisance maximum** : la vitesse de recharge constante, ce paramètre définit la durée des perturbations de recharge et le temps d'activité continue. La capacité d'une batterie diminuant avec le temps, les robots doivent s'adapter à la variation de leur autosuffisance maximum. Plusieurs valeurs seront expérimentées en simulation [Sempé,11].
- c) **Nombre et position des stations de recharge** : De ces deux paramètres dépendent l'accessibilité des stations, leur disponibilité et la position des points de reprise d'activité. Bien que l'analyse de leur influence sur la patrouille présente beaucoup d'intérêt. Chaque environnement se verra attribuer un nombre de stations fixe et suffisant pour alimenter le maximum de robots qui le patrouilleront. Les stations seront également réparties dans l'espace, sauf pour l'environnement réel [Sempé,11].

## II.2. Approche proposés pour le problème d'énergie

Le problème de l'énergie a été étudié au cours des dernières années, mais toujours dans le cadre du niveau physique.

### II.2.1. Station de recharge fixe

*L'approche ordinaire*

A ce problème est de mettre un appareil de recharge à un endroit fixe que les agents visitent souvent [Silverman, 02]. Il existe divers travaux reposant sur cette approche qui ont été proposés et discutés. Ceux-ci traitent souvent du design physique, de l'installation du système de recharge et de l'interaction entre les robots et la station [Silverman,02],mais pas du problème de recherche des stations.

Le problème du partage de station a rarement été abordé dans la recherche. Muñoz-Mélendez *et al.* Dans [Muñoz-Meléndez, 02] ont conçu un groupe de robots mobiles autosuffisants pouvant efficacement partager une station de recharge en utilisant des mécanismes simples ne requérant pas de communication. De plus, Sempé a proposé dans [Sempé,04] un mécanisme basé sur la propagation d'information qui aide les robots à trouver et à partager les stations. Le problème de l'estimation de l'autosuffisance dans les robots réels est plus commun. Gérard a présenté dans [Gérard,99] une méthode d'estimation reposant sur un réseau de neurones.



applique l'approche comportemental pour réduire son énergie, si un robot cesse de recevoir signaux à l'état «charger», au lieu de revenir à l'état de "searching" encore une fois, il passe à l'état «waiting» en partant du principe que le chargeur est occupé par un autre robot. Un robot reste en l'état «waiting» jusqu'à ce qu'il commence à recevoir des signaux «recharging» encore une fois ou l'expiration de la minuterie en attente. Au cours de la veille, un robot s'arrête sa locomotion pour économiser son énergie tandis que le reste de l'électronique de bord restent actifs. Plus loin, dans la topologie «stop and wait», un robot désactive son trophallaxie capacité et s'emploie uniquement pour sa propre survie.

### II.3. Approche par SMA réactifs

#### II.3.1. Intelligence collective (Swarm Intelligence)

Selon Bonabeau dans [Bonabeau et Dorigo, 99], « Swarm Intelligence (SI) is the property of a system whereby the collective behaviors of (unsophisticated) agents interacting locally with their environment cause coherent functional global patterns to emerge ».

L'Intelligence Collective inspirée par des sociétés animales telles que les colonies de fourmis ou les bancs de poissons a mené à la création d'un nouveau paradigme de calcul et de comportement. Plus particulièrement, ce domaine tire son inspiration de l'étude des insectes sociaux tels que les fourmis ou les termites et se base sur *l'auto organisation* et *l'émergence* de comportements par contraste avec les systèmes biologiques individuels (comme les Algorithmes Génétiques).

On peut trouver dans les sociétés d'insectes certains phénomènes biologiques qui sont les fruits des travaux magnifiques des insectes sociaux, comme les fourmis formant des ponts avec leur corps permettant à la colonie des traverser de larges espaces, ou les abeilles qui construisent parallèlement les rayons de leurs ruches [Bonabeau et Dorigo, 99]. Or les problèmes quotidiens résolus par une colonie sont nombreux et de nature très variée : recherche de nourriture, allocation de tâches entre les individus, etc. Les études réalisées par les éthologues ont montré que certains comportements collectifs des insectes sociaux étaient auto-organisés. Des structures émergent à un niveau global à partir d'interactions simples entre insectes, comme une fourmi qui suit la trace de phéromone laissée par une autre. Ces interactions aident à résoudre collectivement des problèmes complexes, comme par exemple de trouver le chemin le plus court.

Aujourd'hui, la transposition de modèles de comportement collectif des insectes sociaux à des modèles informatiques a donné des solutions à des problèmes complexes, notamment à des problèmes d'optimisation de parcours, d'ordonnancement ou le problème du voyageur de commerce [Bonabeau et Dorigo, 99]. Cette approche peut résoudre les problèmes de manière:

- Flexible : l'adaptation à de brusques modifications de l'environnement.
- Robuste : Le système tolère l'ajout ou la suppression dynamique d'agents ainsi que d'éventuels échecs dans l'accomplissement de leur tâche. Le système est capable de se réorganiser de lui-même pour s'adapter à cette modification.
- Décentralisé : il n'y a pas un contrôleur central dans le système.
- Auto-organisé [Hoang, 07].

### II.3.2. *Phéromone digitale*

La stigmergie est une notion introduit en 1959 par le biologiste Pierre-Paul Grassé qui observait la construction des nids chez les termites. C'est une méthode de communication indirecte chez les insectes sociaux (termites, fourmis, ...) dans un environnement émergent auto-organisé, où les individus communiquent entre eux en modifiant leur environnement. Les phéromones digitales sont les stigmergies artificiels utilisées par les agents réactifs dans les systèmes multi-agents qui modélisent la société d'insectes. On peut trouver ainsi dans [Parunak et Purcell, 02] des modèles de coordination entre véhicules sans pilotes pour la surveillance et la poursuite basée sur des mécanismes reposant sur phéromones digitales. Ce type de communication indirecte est particulièrement adapté au traitement de tâches en environnement initialement inconnu (e.g. foraging [Machado et Almeida, 02], couverture-exploration ...) [Hoang, N, 07].

#### a) **Le modèle EVAP basé sur l'évaporation des phéromones**

Dans la nature, certaines espèces de fourmi marquent leur passage par le dépôt d'une substance chimique, les phéromones, que peuvent percevoir les autres fourmis pour en tirer de l'information.

Le principe est simple, chaque agent marque sa cellule/nœud d'une quantité fixe (maximum) de phéromone et descend le gradient de celle-ci. Seul le processus d'évaporation est à l'œuvre dans l'environnement, il diminue la phéromone des lieux non revisités et y attire localement les agents. L'établissement et l'étude de ce modèle étant motivés par l'évaluation d'une approche réactive bio-inspirée sur un tel problème (devenu un benchmark du multi-agent) et

par l'étude d'éventuelles propriétés émergentes ou auto-adaptatives pouvant apparaître avec une telle démarche [Glad, 11].

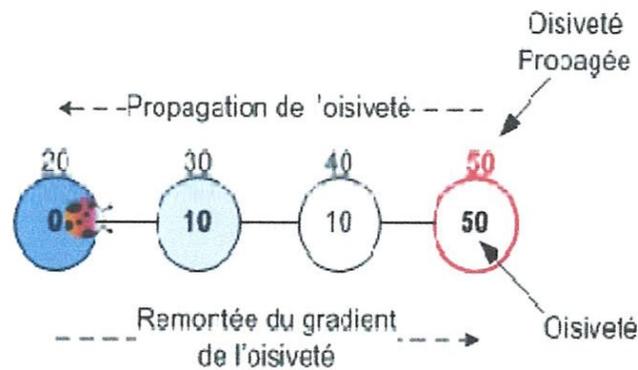
### b) CLInG : un modèle basé sur la propagation d'informations

Sempé [Sempé,04] a proposé un algorithme de patrouille multi-agent qui fait l'hypothèse que les agents sont réactifs (comme dans EVAP) et que l'environnement calcule deux informations :

- l'oisiveté de chaque cellule
- la propagation des oisivetés max

A chaque pas de temps, l'environnement calcule l'oisiveté de chaque cellule accessible en incrémentant sa valeur d'une unité. L'oisiveté d'une cellule est remise à zéro lorsqu'un agent la visite.

L'originalité de l'algorithme CLInG (Choix Local fondé sur une Information Globale) est d'introduire une seconde information dans l'environnement par la propagation des oisivetés maximales. Cette propagation entre cellules produit un second gradient qui guide les agents vers les cellules d'intérêts (les plus anciennement visitées).



**Figure I.9 :** Oisiveté propagée [Hoang.N,07].

Plus formellement, une cellule  $i$  portera une oisiveté propagée  $OP_i$  en plus de son oisiveté individuelle  $O_i$ . Le gradient formé par l'oisiveté propagée est commun à toute la collectivité (Figure I.9)

L'oisiveté propagée d'une cellule dépend de l'oisiveté propagée de ses voisines et de son oisiveté individuelle. Elle équivaut à une fonction d'utilité qui tient compte à la fois de l'oisiveté et de la présence d'agents sur le chemin.  $OP_i = \max [O_i \max (f(i, j))]$

Le comportement de chaque agent consiste alors à remonter le gradient d'oisiveté maximale. C'est une approche duale de la précédente (algorithme EVAP), mais cette fois l'information lue dans les cellules voisines peut provenir de cellules plus éloignées.

La propagation permet d'exploiter implicitement les propriétés de l'environnement et de transformer une donnée objective en une information subjective utilisable directement par les agents.

Dans les environnements de complexité moyenne, le dépôt d'une phéromone est suffisant pour garantir une oisiveté moyenne basse. Par contre, si l'on s'intéresse à l'oisiveté instantanée maximale (ou pire oisiveté), CLInG s'avère en général nettement plus performant grâce à l'attraction propagée par les cellules de plus forte oisiveté, CLInG est plus performant qu'EVAP sur des environnements complexes composés de pièces imbriquées, particulièrement si le nombre d'agents est faible [Hoang, N, 07].

### **c) MARKA : un modèle collectif basé sur la construction de champ numérique potentiel**

Inspirés de la physique, ces approches reposent sur l'utilisation de champs scalaires ou, plus généralement, de champs vectoriels. Ainsi, chaque point de l'espace est associé à un vecteur.

En observant leur voisinage, les agents peuvent déduire des informations de gradient utiles à la résolution du problème [Brooks, 86; Arkin, 87]. En pratique, ce type d'approche est principalement utilisé pour des tâches de navigation. D'après [Ferber, 95], les objets présents dans l'environnement (agents compris) émettent des signaux (dont l'intensité est fonction de la distance à l'émetteur) définissant des champs attractifs (pour les buts) ou répulsifs (pour les obstacles).

Le principal problème concernant les champs de potentiel provient de l'existence de maxima et minima locaux qui peuvent agir comme des pièges à agents, les empêchant de mener leur tâche à bien.

les champs de potentiels ont également été utilisés pour des tâches différentes de la navigation. Par exemple, [Simonin, 01] propose un modèle de foraging dans lequel un agent ayant trouvé une source de nourriture émet un signal attractif pour attirer les autres agents. [Moujahed, 07] propose quant à elle un modèle pour le positionnement d'usines et de dépôts pour d'optimiser le coût de transport des marchandises des usines vers les dépôts et des dépôts vers les clients.

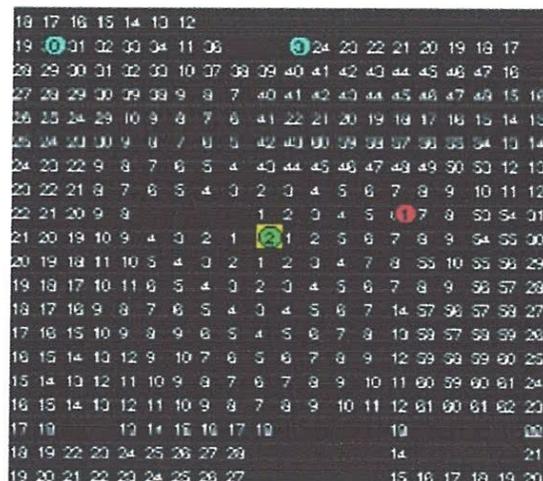
#### ***Le modèle MARKA***

Un modèle collectif qui fait l'hypothèse qu'il existe des stations de recharge dans l'environnement. Le problème de la recherche de station devient plus complexe, les agents ne sont pas dotés d'une pré connaissance de la position de ces stations. Cette approche utilise encore l'architecture d'agent réactif car le choix de la prochaine action en fonction de l'état des régions voisines offre l'avantage de la simplicité. Mais cet horizon trop court ne permet pas aux agents de voir les stations de recharge inconnues.

La solution consiste donc à construire des champs numériques pour marquer les chemins entre les stations de recharge et les cellules. Cette approche repose sur la construction des champs numériques appliquée au problème de la fouille, qui a été introduit par *Simonin, Charpillat et al* dans [Simonin et al 07].

### Comportement des agents

Les agents marquent chaque cellule visitée d'une valeur calculée, La valeur à la station de recharge est égale à 0. On peut voir que ces champs numériques représentent la distance la plus courte de la station de recharge aux cellules portant ces valeurs. Ils sont les informations qui guident les agents vers la station de recharge la plus proche.



### **Estimation de l'autosuffisance**

Un point remarquable de MARKA est la capacité pour un agent d'estimer l'énergie nécessaire pour aller à la station de recharge avant l'épuisement. En effet, grâce à la marque sur l'environnement, l'agent peut savoir la distance relative entre sa position et la station de recharge la plus proche. Il peut donc estimer si l'énergie restant lui permet de retrouver la station [Hoang,07].

#### ***d) TANKER : une approche auto-organisée collective pour l'optimisation de position de Tanker***

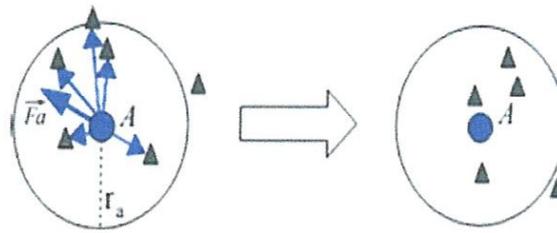
L'approche Tanker (un agent qui porte l'énergie) a été abordée dans [Zebrowski et Vaughan,03]. L'idée de cette approche est qu'un agent portant l'énergie cherche les agents travailleurs pour distribuer l'énergie.

Ils proposent un autre mécanisme de Tanker qui lui permet d'optimiser sa position et attire les autres agents vers lui. Cet algorithme est à l'origine du Problème de l'Emplacement d'Installation qui a été traité par Moujahed, Simonin [Simonin, 01][Moujahed, 07] en utilisant l'approche des Systèmes Multi-agents Auto-organisés. Ce problème exige l'implantation d'installations pour optimiser quelques critères de performance. Ce problème s'applique à beaucoup de cadres pratiques, comme l'emplacement d'usines, d'arrêts de bus, des casernes de pompiers, etc. ils transposent ce problème au problème de l'optimisation de position du Tanker.

L'approche proposée fournit un modèle d'interaction entre les agents et le Tanker qui joue un rôle central. Les interactions des agents sont effectuées par les forces attractives et répulsives. L'objectif du Tanker consiste à optimiser sa position par rapport aux positions des autres agents perçus.

#### **Les forces attractives et répulsives**

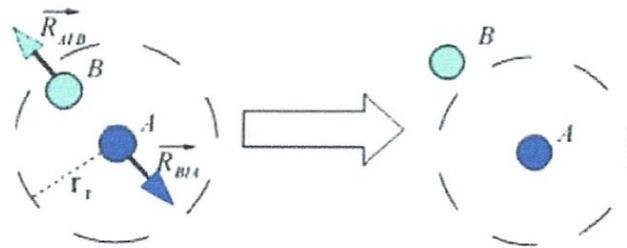
La force attractive est définie comme une force qui tire le Tanker vers lui. Elle est représentée par un vecteur dont l'intensité est proportionnelle au poids de demande d'agent et à la distance entre l'agent et le Tanker. L'influence de l'attraction baisse quand le Tanker se déplace vers l'agent.



**Figure I.11** – Attraction guide le Tanker au barycentre des demandes[Hoang,07].

Dans le cas où plusieurs Tankers appliquent un tel comportement, certains d'entre eux peuvent se déplacer à la même position. Pour éviter ce problème, ils ont utilisé une force répulsive.

L'intensité de la force répulsive est inversement proportionnelle à la distance entre les Tankers. Cette Figure I.12 illustre le processus de répulsion entre deux Tankers.



**Figure I.12** – Répulsion garde la distance entre Tankers A et B [Hoang,07].

**Comportement des Tankers :**Le comportement des Tankers consiste en 2 tâches : le calcul des forces pour optimiser leur position et le dépôt des phéromones pour attirer les agents. [Zebrowski et Vaughan,03]

**Comportement de l'Environnement :** L'environnement réalise le processus de diffusion des phéromones déposées par les Tankers. La diffusion est le phénomène qui propage de proche en proche une fraction de la quantité de phéromone initialement déposée dans une cellule.

**Comportement des Agents :** Le comportement d'un agent se divise en deux phases principales : une « Phase de Patrouille » et une « Phase de Recherche d'énergie ». Dans les expérimentations, ils utilisent l'algorithme EVAP pour la phase de patrouille. Une fois que l'énergie restante de l'agent descend sous un seuil déclenchant la recherche d'énergie, il passe à la Phase de Recherche d'énergie : une montée du gradient de phéromones diffusées par l'environnement.

En effet, partant de la position initiale, le tanker se dirige au barycentre des agents qui est la position d'équilibre des forces attractives des agents (Figure 13.b). Lors du déplacement d'une région à l'autre, ce sont les forces attractives exercées par les agents qui attirent le tanker (Figure 13.c). Le tanker suit donc les agents et se place à nouveau au barycentre des positions (Figure 13.d). En outre, on observe qu'il n'y a pas de redondance des positions des tankers. Ils se répartissent dans les groupes grâce à la force répulsive qu'ils exercent entre eux [Hoang ,07].

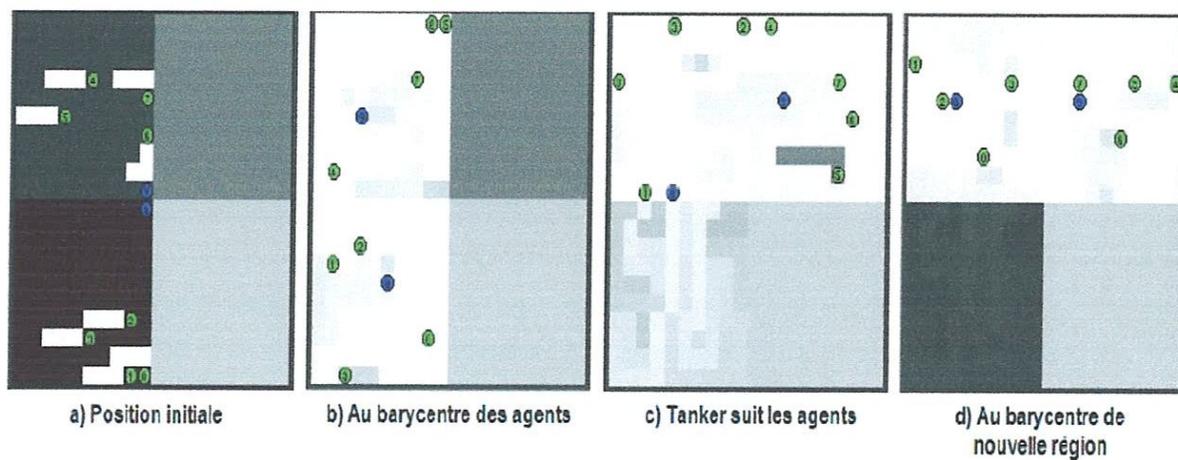


Figure I.13-Illustration de TANKER [Hoang,07].

## Conclusion

Cette partie concerne l'étude de l'approche par l'intelligence collective du problème d'énergie dans les systèmes multi robots. Nous avons présenté un état de l'art détaillé sur les concepts de l'autonomie énergétique et autosuffisance d'un robot puis on a établis les différentes approches proposées pour ce problème, Puis nous avons également présenté des modèles, EVAP, CLInG, MARKA et TANKER pour traiter le problème de limitation d'énergie robotique. Les bonnes performances exhibées par TANKER montrent que c'est un modèle efficace pour la version dynamique et multi-groupes du problème de l'approvisionnement en énergie. Ces deux derniers modèles font une référence exhibée du travail par ce mémoire.

*Chapitre II:*

*conception et implémentation.*

## Chapitre II : Conception et implémentation

### I. Introduction :

La résolution collective de problème doit beaucoup à l'analyse des techniques de fourragement chez les insectes sociaux, tâche qui consiste à rechercher des ressources et à construire des chemins vers le nid pour les ramener.

L'objectif de notre travail était d'intégrer la limitation d'énergie au problème du fourragement de proposer un système qui permet aux agents de coordonner leurs activités de fourragement et de recharge.

Le système proposé est un ensemble hétérogène d'agents réactifs exécutant un comportement purment réactif complété d'actions de coopérations (Agent fourrageur et agent station de recharge), plusieurs simulations ont été faite ,pour tester les performances du système proposé dont les mesure de performances sont le temps de recharge et le temps total de recharge

Ce chapitre se trouve composé de deux parties : La conception du problème contenant le nouveau comportement des agents réactifs, les simulations nous terminerons ce chapitre par des discussions sur les résultats de système propose.

### II. Conception

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

La question centrale dans ce mémoire c'est la résolution du problème d'énergie dans les systèmes multi-robots, qui représente un benchmark du domaine. Plusieurs objectifs doivent être réalisés afin de répondre à cette question, parmi ces objectifs on citera :

1. Utiliser type d'agents aussi simple que possible (agents réactifs coopératifs) ;
2. Utiliser un agent qui porte énergie (une station de recharge) ;
3. Optimiser la position d'agent station par rapport aux positions des agents fourrageur (suivre le chemin de phéromones et choisi sa position au voisinage de la ressource) ;

4. Faciliter l'adaptation de la position de la station de recharge;
5. Assurer le renouvellement d'énergie grâce à la station de recharge pour augmenter le travail des agents ;
6. Assurer des interactions indirectes pour faire coordonner et donc coopérer les différents agents (dépôt des phéromones digitales-stigmergie-);
7. Faire émerger des chemins entre la source et la base, (en utilisant des champs de potentiels artificiels (APF));

## II.2. Modélisation du problème

### II.2.1. Modélisation de l'environnement

Nous considérons des environnements qui contiennent des ressources dans des localisations connues par les agents et leur position dynamique dans l'environnement. Chaque localisation contient une quantité limitée de ressources. Cet environnement est modélisé par une grille qui se compose d'un ensemble de cellules, chaque cellule est peut-être :

- Un obstacle (couleur noir) ;
- Contient une ressource (couleur verte) dont la quantité est limitée (1000 unité) ;
- Est la base (couleur rouge), à partir de laquelle tous les agents commencent le fourrage, elle se positionne au centre de l'environnement ;
- Contient un agent fourrageur identifié par un numéro (1) .
- Contient un agent station de recharge identifié par l'image suivante (  ) ;
- Contient des phéromones (qui s'évapore avec le temps);
- Contient une marque déposée par l'agent de station de recharge (marque rouge) ;

### II.2.2. Modélisation des agents

On a deux types d'agents hétérogènes :

#### Agents fourrageur

Sont des agents réactifs et coopératifs de charge limitée, ils occupent une cellule et sont capable de percevoir les quatre cellules voisines, et les agents ne se trouvent pas en même

temps dans la même cellule et dépose des phéromones. Chaque agent est défini par les capacités suivantes :

- Percevoir les quatre cellules voisines ;
- Déplacer à une cellule voisine si elle n'est pas un obstacle ;
- Détecter la présence des ressources ou d'obstacles dans les quatre cellules voisines ;
- Prendre une quantité  $q_{\max}$  de ressources et la transportée à la base ;
- Marque sa cellule en utilisant des champs de potentiels artificiels (APF) pour la construction du chemin entre la source et la base ;
- Découvrir la station de recharge ;
- Occuper une station de recharge pour récupérer son énergie ;

#### **Agent stations de recharge (dock robot)**

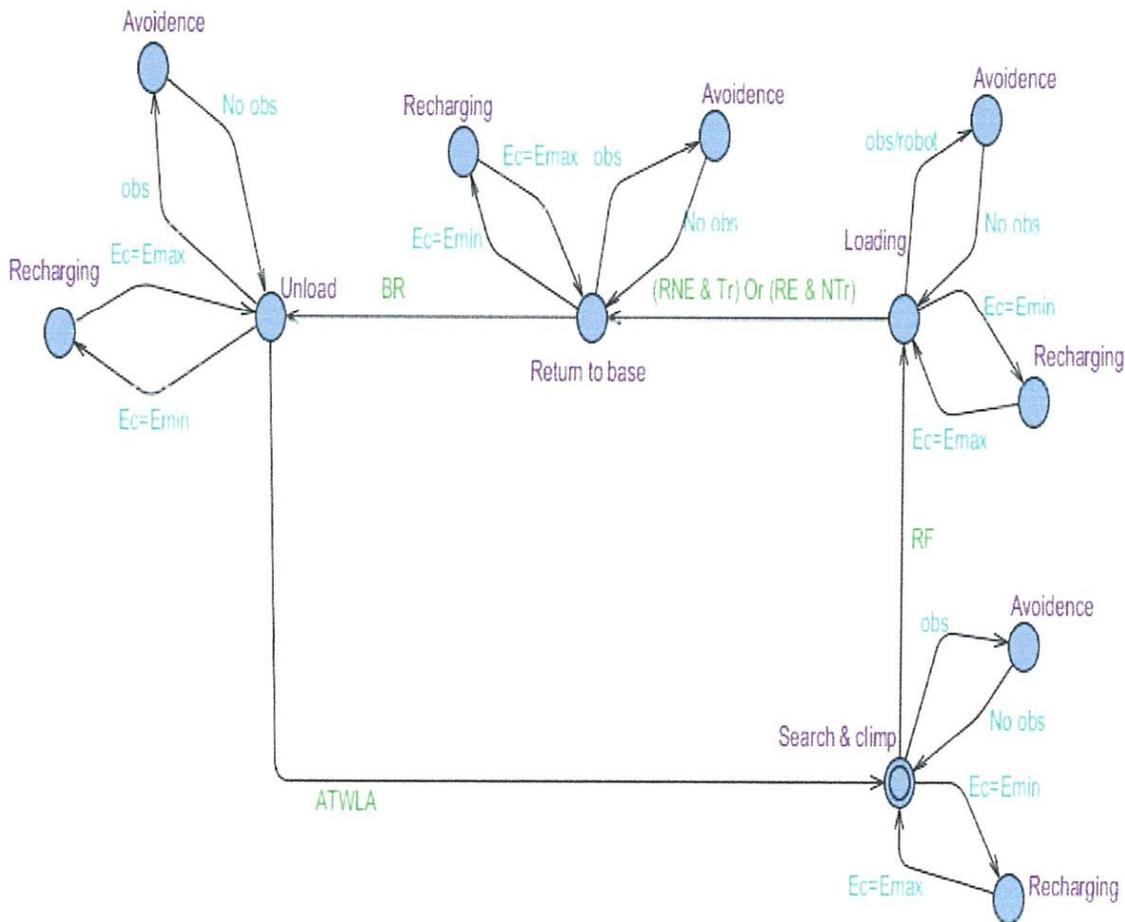
un agent réactifs qui porte une quantité illimité d'énergie, sa tâche c'est d'aller chercher les agents fourrageur pour leurs distribuer l'énergie, donc il est obligé de changer sa position en fonction de la position des agents fourrageurs, la meilleure position étant une cellule sur le long du chemin du travail des agents (entre la source et la base). Dans notre travail la position initiale de la station est aléatoire, la station ensuite exécutera le comportement de la figure II .3 pour suivre les agents et pour se positionner à point optimal (au voisinage de la source).

EVAP repose sur une organisation collective des agents à travers des communications indirectes. Celles-ci se font par l'intermédiaire de phéromones digitales déposées dans l'environnement, nous avons utilisé le modèle EVAP qui basé sur l'évaporation de la phéromone déposée par les agents fourrageur lors de la visite d'une cellule d'environnement. La quantité évaporée représente alors directement le temps écoulé depuis la dernière visite de la cellule. l'activité d'évaporation réalisée par l'environnement. Ainsi, l'environnement exectue à la même fréquence une mise à jour de la valeur des cellules n'ayant pas été visitées depuis longtemps. Dans notre travail l'agent station de recharge fait à chaque fois un suivi de la phéromone digitale volatil pour optimiser sa position dans une meilleure position.

### II.3. Comportement des agents

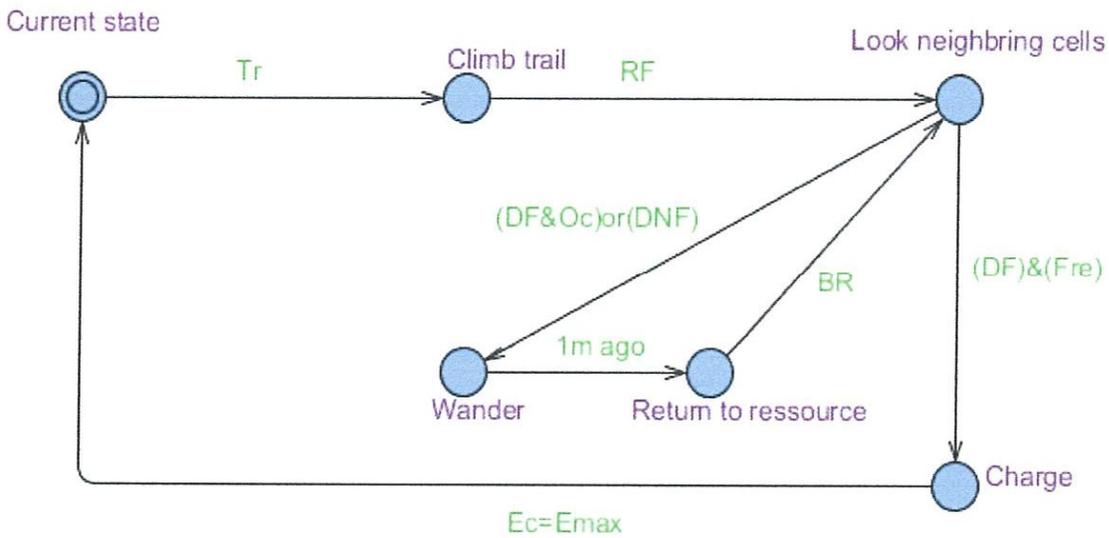
Le modèle comportemental des agents est limité par certaines conditions relatives à l'environnement dans lequel ils évoluent. Ces comportements sont issus de leur stimulus local.

Nous en avons déduit le comportement générique de chaque agent (agent fourrageur et agent station), exprimé par des machines d'états finis suivantes:



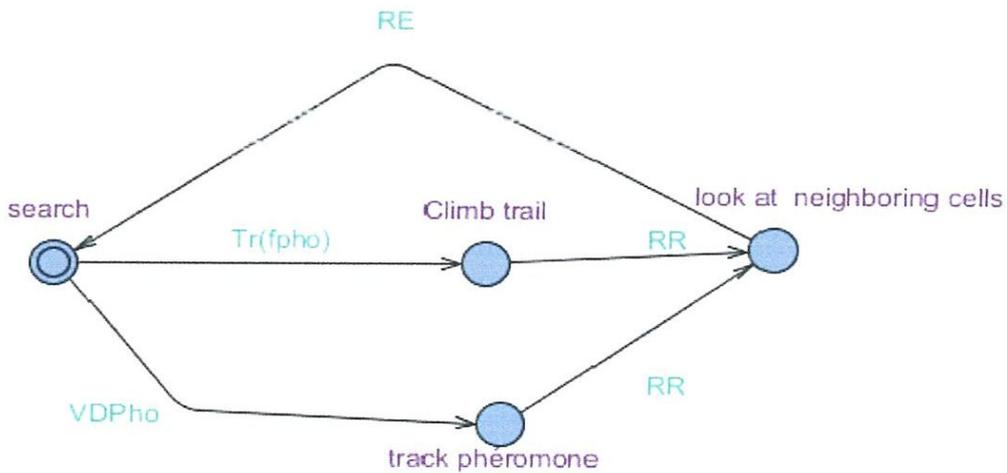
**Figure II .1:** Machine d'état fini des robots fourrageurs.

No obs :no obstacles or robot ;Obs: obstacle;RF:resource found;BR: base reached;RE: resource exhausted; NTr: no trail;Ec : energy ;RNE:resource not exhausted; Tr: trail;ATWLA: Automatique Transition when Unloading is Achieving;



**Figure II.2:** Machine d'état recharge.

Tr: trail;RF:resource found;BR: base reached;(DF) &(Fre): dock found and free;(DF&Oc): dock found and Occupied;DNF: dock not found ;



**Figure II.3** Machine d'état fin de station de recharge (Dock robot).

RE: resource exhausted;RR:resource reached;VDPHo: Volatile Digital Pheromone;

Tr(pho): trail and pheromone;

Ces comportements se composent de plusieurs états, la section suivante présente la description de ces différents états:

1. *Search end climb (Recherche et suivi des chemins)* : dans cette étape l'agent se déplace dans l'environnement, il trace un chemin qui relie ( la base et la source avec un dépôt des marques et des phéromones d'une quantité fixe (maximum) et descend le gradient de celle-ci. Il évite les obstacles et les autres agents au même temps; lorsque la charge d'un robot est égale à une charge  $E_{c_{max}}$  en trouvant une ressource l'agent prend une quantité. si sa charge est égale  $E_{c_{min}}$  le robot changera d'état à recharger ;
2. *Avoidance (Évitement)* : un robot occupe une cellule et capable aussi de percevoir les quatre cellules voisines, mais deux robots ne se trouvent pas dans la même cellule en même temps, Un obstacle peut être un robot ou une station de recharge ou un mur, dans la zone de détection d'un robot, ce qui l'oblige à passer à l'état «Avoidance» pour une période de temps si l'obstacle reste dans sa zone de détection.
3. *Loading (Prendre Ressource)* : plusieurs actions sont exécutées dans ce module, l'agent commence par prendre une quantité de source, il va consulter sa charge si elle est supérieure à une charge  $E_{c_{max}}$  et lorsque la source est non épuisée donc il va suivre les marques APF et retourner à la base; Si la source est épuisée l'agent doit effacer le chemin qui a été construit au départ (marque APF). mais lorsque la charge est égale à une charge  $E_{c_{min}}$  le robot va recharger.
4. *Return to base (Retour à la base)* : l'agent doit se déplacer avec la quantité de ressources collectée vers la base pour faire le dépôt, ce déplacement peut être d'une cellule colorée vers une autre colorée avec une valeur min dans le cas d'existence d'un chemin coloré, sinon c'est un déplacement d'une cellule vers une autre qui a la valeur min; dans ce déplacement l'agent passe à l'état «Avoidance» s'il y a un obstacle. En même temps consulte sa charge.
5. *Unload (Déposer)* : si la base est libre, l'agent se situe il dépose la quantité collectée dans cette base ; il va consulter la charge si égale à une charge  $E_{c_{min}}$  aller à recharge, sinon il évite les obstacles et continue la Recherche et suivi des chemins ;

6. *Recharging (recharge)* : un robot doit être capable de se recharger, si la charge est égale  $E_{c_{min}}$  il suivra le chemin vers la ressource et recherche dans les voisinages de cette ressource, si trouvant un robot de recharge libre (dock robot) l'agent devient dans l'état de (charge), il occupe la station de recharge pendant une minute de temps et change l'état de station à occuper, lorsque la charge devient  $E_{c_{max}}$  l'agent libère la station et continue son travail. Dans le cas où la station est occupée ou n'est pas accessible l'agent se promène à une minute de temps dans l'environnement (état wander) puis retourne à la ressource. et si sa charge est diminuée au-dessus du seuil minimal, sans atteindre la station de recharge, il meurt.
7. *Dock robot* : l'agent station se déplace aléatoirement dans l'environnement (search), lorsqu'il trouve un chemin il le suit (climb trail) jusqu'à trouver la source, ou suivre les phéromones digitales vers la source, puis se positionne dans les cellules voisines de la source pour attirer les agents fourrageurs, dans le cas où la source est épuisée ou elle n'est pas atteinte l'agent de station de charge retourne à l'état de recherche;

### III. Réalisation

Dans cette partie, nous présenterons les différentes étapes de réalisation de notre projet qui a pour objectif d'implémenter l'idée de l'agent de la station de recharge qui permet d'optimiser sa position par rapport aux positions des autres agents perçus. Le travail proposé fournit un modèle d'interaction entre les agents fourrageurs et l'agent station qui joue un rôle central dans le problème d'énergie. En utilisant seulement des agents réactifs simples, qui ont la possibilité de marquer et de colorer leur environnement pour assurer plus de coopération.

Nous présenterons d'abord l'environnement de programmation (Java), ensuite nous exposons les différentes étapes de simulation, nous présenterons par la suite les résultats obtenus.

Avant d'aller plus loin dans les simulations, plusieurs paramètres doivent être discutés :

#### Choix des paramètres

Pour assurer l'efficacité et la robustesse de notre proposition, plusieurs paramètres doivent être traités, ces paramètres influencent de façon directe les résultats obtenus, pour que le résultat soit optimal la suite de ces paramètres est donnée comme suit :

- **La taille de l'environnement** : Nous avons utilisés des environnements carrés avec une taille variable ;
- **La densité des obstacles (pourcentage)** : est aléatoire, et sont disséminés de façon aléatoire dans l'environnement, un choix au préalable du pourcentage des obstacles doit être fixé avant la simulation.
- **Le nombre d'unités dans les sources** : ce paramètre est en relation directe sur la quantité max qu'un agent peut transporté à la fois, c'est fixé selon le choix de l'utilisateur.
- **Le nombre des sources elles même** : c'est de quantité aléatoire qui sera fixé par l'utilisateur, elles sont disséminés de façon aléatoire dans l'environnement et peuvent contenir un ensemble de ressources.
- **Le nombre des agents** : Dans toute la simulation il y a un seul agent de station de recharge, et le nombre des agents fixé en fonction de la possibilité d'évitement d'interférences (2Agents).

### III.1. Environnement de programmation

Parler de l'implémentation revient à détailler l'aspect matériel, l'environnement de développement et les différents outils qui ont été utilisé pour réaliser l'application.

#### 1) Aspect matériel

La développement et la simulation ont été réaliser sur deux Pc :

- ✚ Type : PC portable HP 6730s, PC portable HP 620.
- ✚ Processeur : Intel Pentium Core 2 Duo (1.8 GHZ), Intel Pentium Core 2 Duo.
- ✚ RAM : 2 Go.
- ✚ Disque dure : 160 Go, 320Go.

#### 2) Environnement de développement

L'application a été implémentée avec le langage **JAVA** sous l'environnement **Eclipsejuno**(version 2011)avec **jdk 1.7**, et la plateforme multi-agent **Jade**.

## Présentation de JAVA

Java est un langage de programmation développé par Sun Microsystems, il n'a que quelques années de vie (les premières versions datent de 1995). Le système Java comporte plusieurs parties : un environnement, le langage, les interfaces de programmation d'application, et diverses bibliothèques de classes.

Malgré la nouveauté de Java, il a réussi à intéresser et intriguer beaucoup de développeurs à travers le monde et il a été développé dans le but d'augmenter la productivité des programmeurs [Mirecourt, 99]. Sa réputation est due aux principaux avantages suivants :

- C'est un langage orienté objet dérivé du C, mais plus simple que C.
- Il est multiplateforme : tous vos programmes tournent sans modification sur toutes les plateformes où existe Java.
- Il est doté en standard d'une riche bibliothèque de classes, comprenant la gestion des interfaces graphiques (fenêtres, boîtes de dialogue, contrôles, menus, graphisme...), la programmation multithreads (multitâches), la gestion des exceptions, les accès aux fichiers et au réseau (notamment Internet)... etc.

### Pour quoi Java ?

Contrairement à d'autre langage, la simplicité de java est en fait directement liée à la simplicité du problème à résoudre. Ainsi, un problème de définition de l'interface utilisateur peut être un véritable casse-tête avec certains langages, avec java, créer des fenêtres, des boutons et des menus est toujours d'une simplicité extrême, ce qui laisse au programmeur la possibilité de se concentrer sur son problème à résoudre.

- Java est un environnement complet qui offre des flexibilités et des possibilités importantes ;
- Java est un langage relativement simple à apprendre et lire ;
- Java offre une probabilité grâce à la machine virtuelle (JVM) ;
- très adéquat pour le développement des agents comme des objets autonome et mobile.

### Pour quoi Jade ?

JADE est une plate-forme qui permet le développement des systèmes multi-agents conformément à la norme FIPA. Elle est entièrement implémentée en java et fournit beaucoup d'outils permettant la construction et l'analyse des systèmes multi-agents.

Les propriétés qui nous ont particulièrement intéressées dans Jade sont :

- La plate-forme d'agents peut être distribuée sur plusieurs machines, sur chacune d'elles s'exécute une machine virtuelle Java ;
- Chaque machine virtuelle est un **conteneur d'agents** (Container) qui fournit un environnement d'exécution complet pour les agents et permet d'avoir plusieurs agents qui s'exécutent simultanément sur un même hôte ;
- Il n'existe aucune contrainte sur l'architecture interne des agents ;
- Le mode de communication direct est supporté par la plateforme
- L'intégration et suppression d'agents en cours d'exécution est assez souple ;
- Les agents sont implémentés comme des threads d'exécution Java, chacun d'eux peut exécuter des tâches parallèles et JADE planifie ces tâches d'une manière efficace.

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

L'interface graphique principale de cette application englobe un ensemble de composants à partir desquels on peut exploiter notre système, la figure ci-dessous montre cette interface et ses différentes parties (Figure II.4):

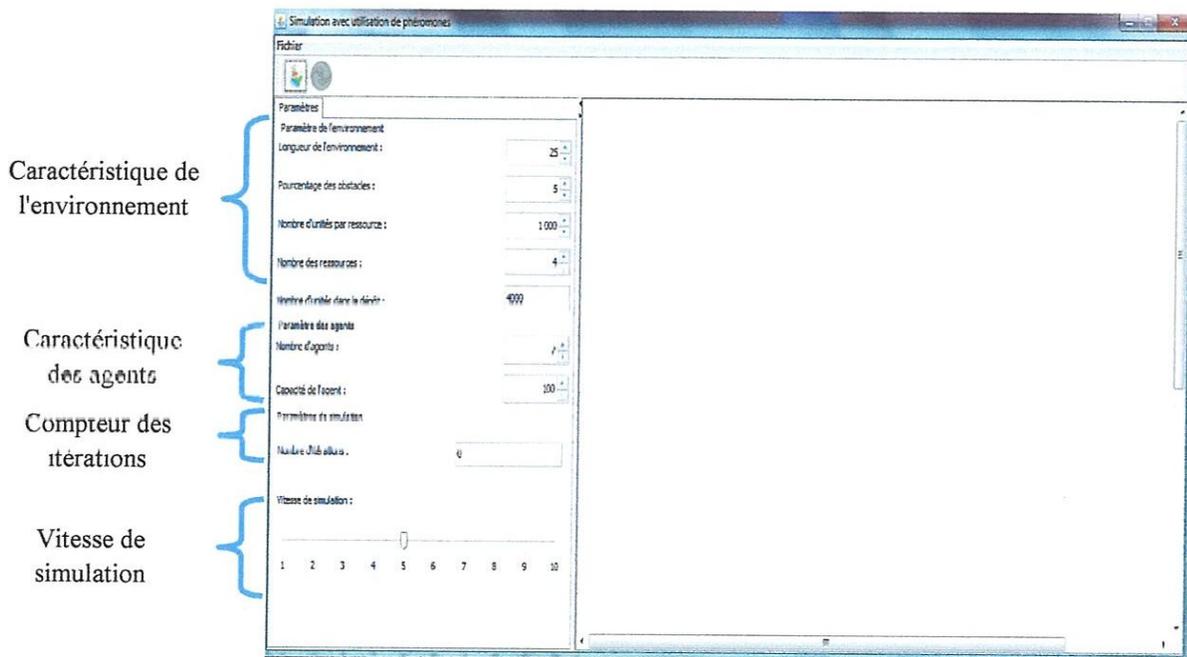


Figure II.4 : Interface principale.

L'exploitation de notre application est très simple, la fenêtre se compose d'un menu fichier permettant la création de l'environnement et d'initialisation de l'environnement et de quitter l'application (Figure II.5);

La création de l'environnement et la fixation des paramètres montré dans la droite de la fenêtre l'énergie des agents choisi (Figure II.6), Pour lancer la simulation (avec les paramètres déjà choisis) on a utilisé la bouton présenté dans (Figure II.6).

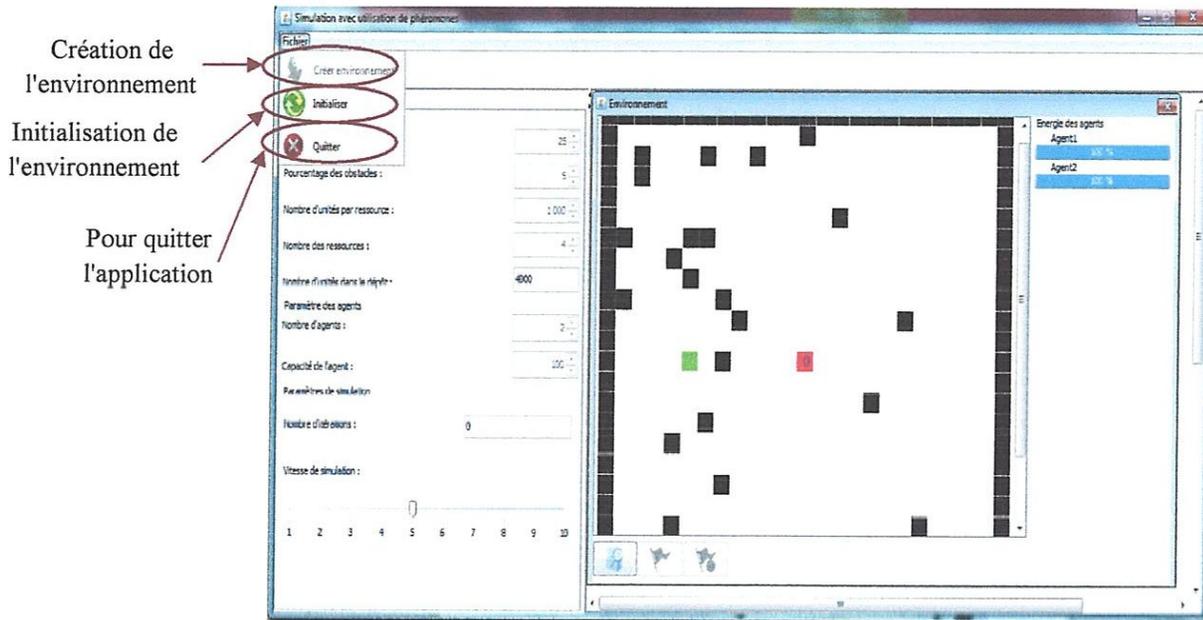


Figure II.5 : Création d'environnement.

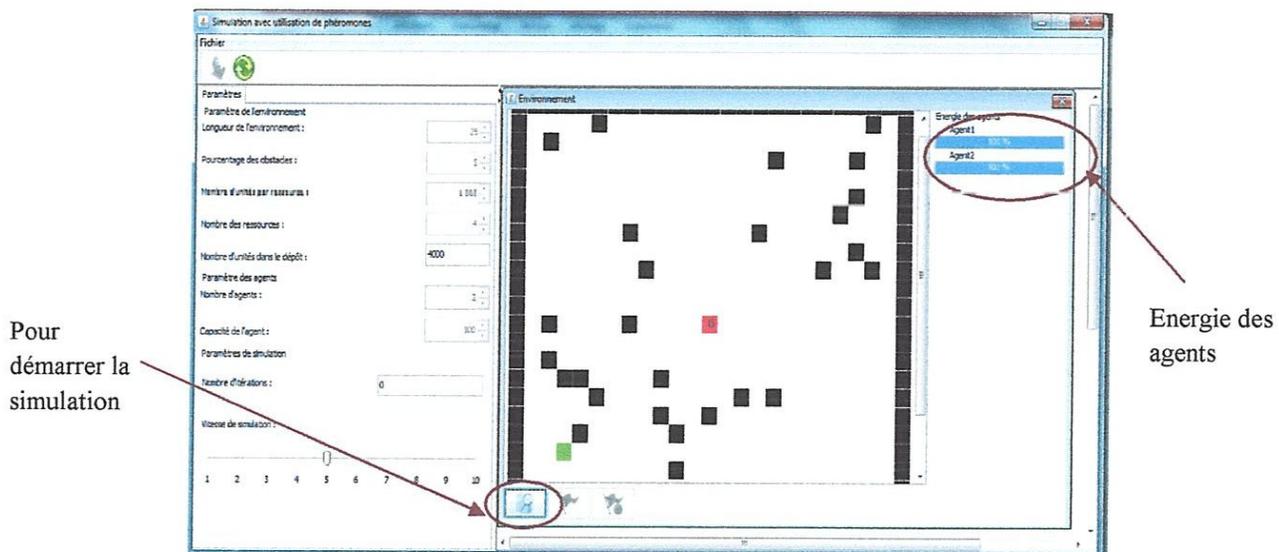


Figure II.6: Lancer la simulation.

La création de l'environnement c'est-à-dire la fixation des différents paramètres dans la figure II.6 Doit être faite avant de lancer la simulation.

La section suivante montre la suite des expérimentations et des résultats obtenus en faisant varier différents paramètres.

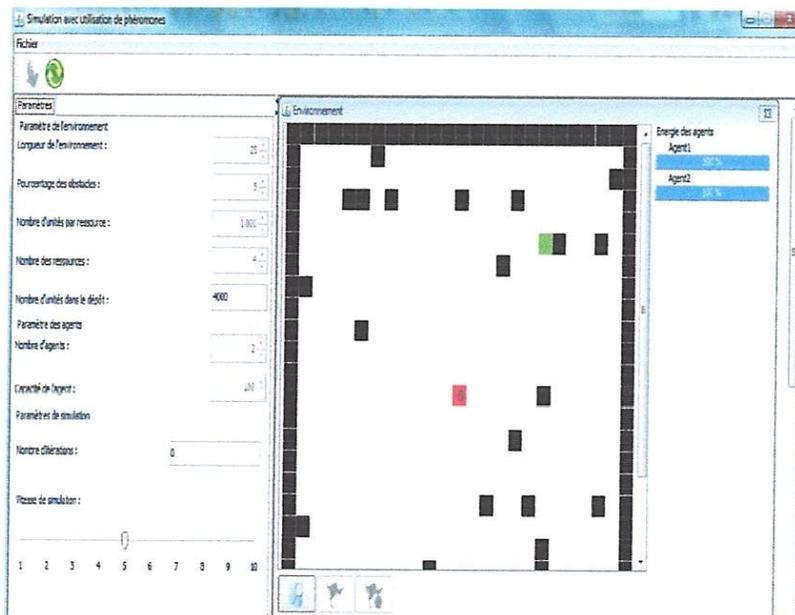
### III.2. Résultats expérimentaux

Plusieurs simulations ont été fait pour tester les performances du système proposé nous utilisons deuxmesure pourévaluer la performance sont : lenombre de fois où l'agent est allé se recharger et le temps total pour aller se recharger.

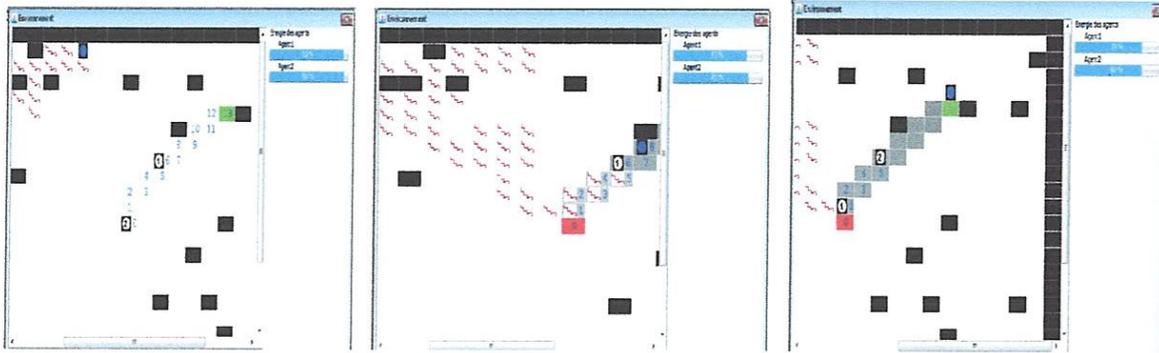
#### Configuration 1:

- Environnement de 25 x 25 cellules, 5% des cellules sont des obstacles et ils sont distribués de façon aléatoire. 4sources, qui sont également répartis de façon aléatoire. Chaque emplacement de la source contient 1000 unités de ressources.
- Le nombre d'agents est fixé à 2 où chaque agent peut charger un maximum de 100 unités ;

Les figures qui se suivent montrent l'environnement de la configuration 1 et les différentes étapes de la simulation :



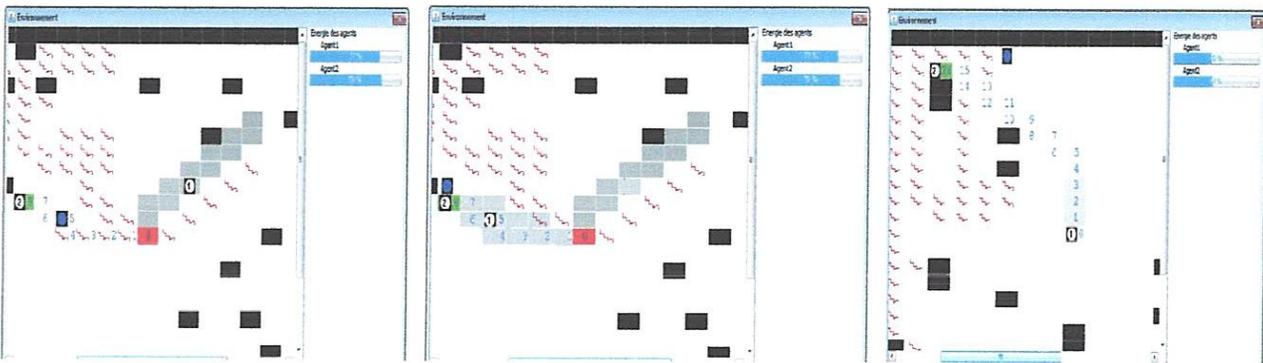
*Figure II .7: l'environnement de la 1<sup>er</sup> configuration.*



(a) Etape 62

(b) Etape 257

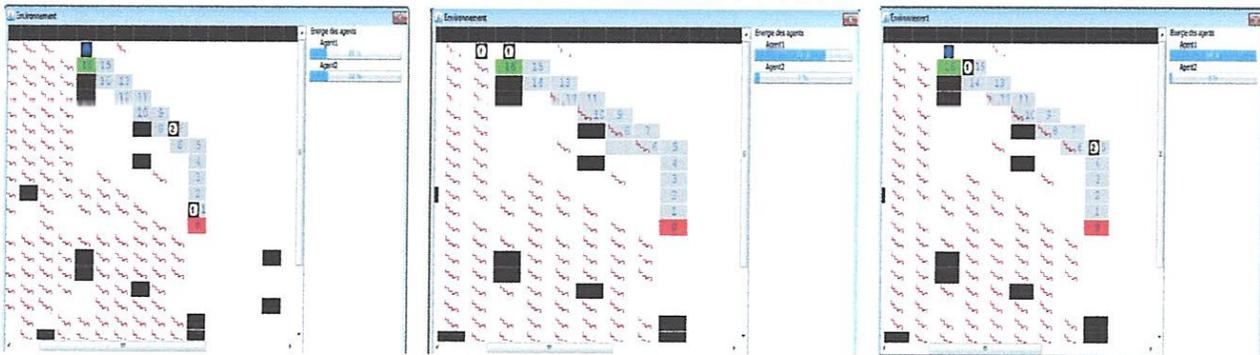
(c) Etape 329



(d) Etape 365

(e) Etape 385

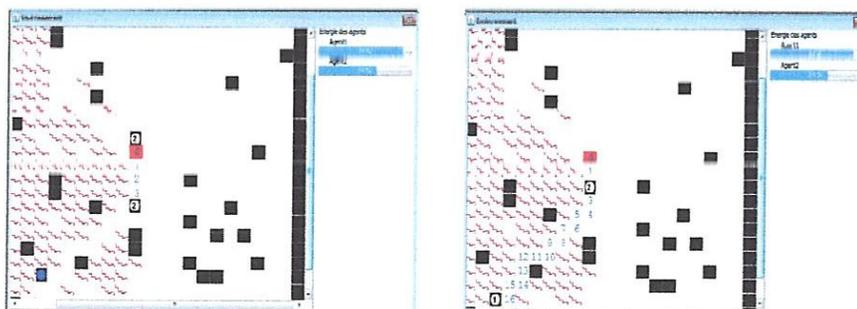
(f) Etape 900



(g) Etape 1336

(h) Etape 1528

(i) Etape 1672



(j) Etape 1735

(k) Etape 2028

*Figure II.8: simulation de 1<sup>er</sup> configuration.*

Nous observons dans la Figure II.8 que la construction du champ numérique potentiel commence de la base (étape 69). Nous pouvons également observer que 2 agents découvrent la source (les agents connus déjà la position de la ressource et leurs charge initial est 100%) et commencent à créer un chemin avec le dépôt des quantités fixe de phéromone, Nous observons aussi que l'agent station recherche aléatoirement dans l'environnement et pas encore trouvé des phéromones,

Figure 1.b montre que, à l'étape 257 l'agent de recharge ont découvert des phéromones et suivre le chemin des phéromones vers la source, Dans l'étape 329 l'agent de recharge et choisi une cellule à côté de la source pour adapté sa position ou voisin d'elle la Figure 1.c présente ça, tandis que les deux agents effectuent plusieurs voyages à partir de la base à l'emplacement de la ressource qu'ils ont découvert avec la diminution de l'énergie (79% pour l'agent 1 et 80% pour l'agent 2).

Figure 1.d montre que à l'étape 365 la 1<sup>er</sup> source et épuisé donc les agents trouvent une autre, l'environnement diminue les phéromones des cellules non revisités. Mais l'agent station va quitter sa 1<sup>er</sup> position et continuer la recherche par le suivre des phéromones vers la nouvelle source.

Plus tard, à l'étape 385, figure 1.e l'agent de recharge choisi sa position à coté de nouvelle source, les agents transportent simultanément sur le même chemin, la charge de l'agent 1 est 77% et l'agent 2 est 79%.

Dans Figure 1.g à l'étape 1336, l'énergie restante de l'agent 1 descend sous un seuil déclenchant la recherche d'énergie (30%), il passe à la recherche d'énergie, suivre le chemin vers la source ou se trouve la charge ou voisinage d'elle, Puis dans l'état 1528 (Figure 1.h) l'agent 1 occupe la station de recharge d'une minute de temps (la charge dans la figure devienne 74%) et change l'état de station à occuper. D'autre part, l'autre agent aussi est déchargé (7%), il trouve la station occupé donc il se promener à une minute de temps dans l'environnement et retourne à consulter la charge une autre fois.

Nous observons dans la Figure 1.i étape 1672 que l'agent 1 est libéré la station ( $E_c=99\%$ ) et retourne à son travail mais l'agent 2 ira à recharger, lorsque son rechargement est terminé, il se dirige vers la source.

Dans l'étape 2020 (figure 1.k) l'agent explore le dernier emplacement de la ressource et après cette étape, toutes les ressources sont épuisés, et en plus, les agents retournent à la base et meurent. Tandis que l'agent station arrête la recherche.

### III.3. Performances du système :

Les agents disposent d'une quantité d'énergie qui décroît lors de chaque action.

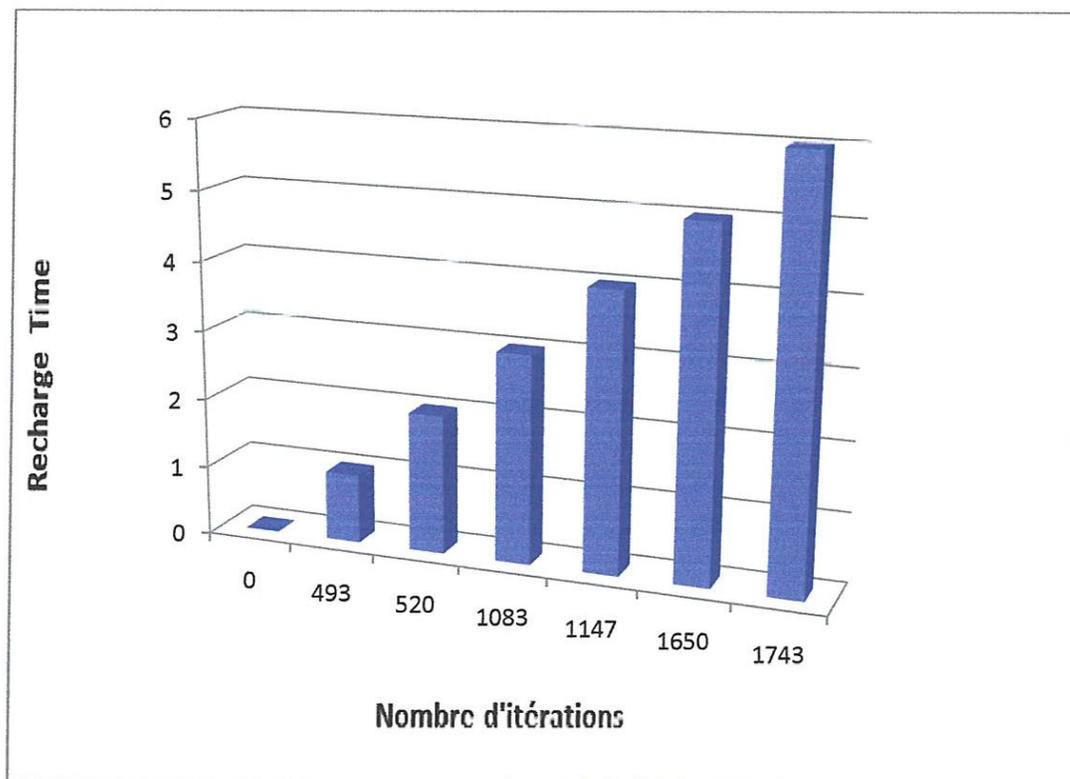
Nous utilisons les critères suivants pour évaluer la performance :

- Recharge Time : nombre de fois où l'agent est allé se recharger.
- Total Step : temps total pour aller se recharger.

Nous étudions ce modèle dans un environnement de taille  $25 \times 25$  cellules, la densité d'obstacle de 5% et 4 ressources renouvelable (A position dynamique des sources) chacune avec 1000 unités de ressources.

Le nombre d'agents est fixé à 2, Chaque agent peut transporter un maximum de 1000 unités de ressources à la fois.

#### Temps de recharge (Recharge Time)



*Figure II.9 : un histogramme représente Le temps de recharges de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.*

Nombre d'itération	0	493	520	1038	1147	1650	1729
Agent 1	0	1	1	2	2	3	3
Agent 2	0	0	1	1	2	2	3
Recharge Time	0	1	2	3	4	5	6

*Tableau II.1 : le temps de recharge de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.*

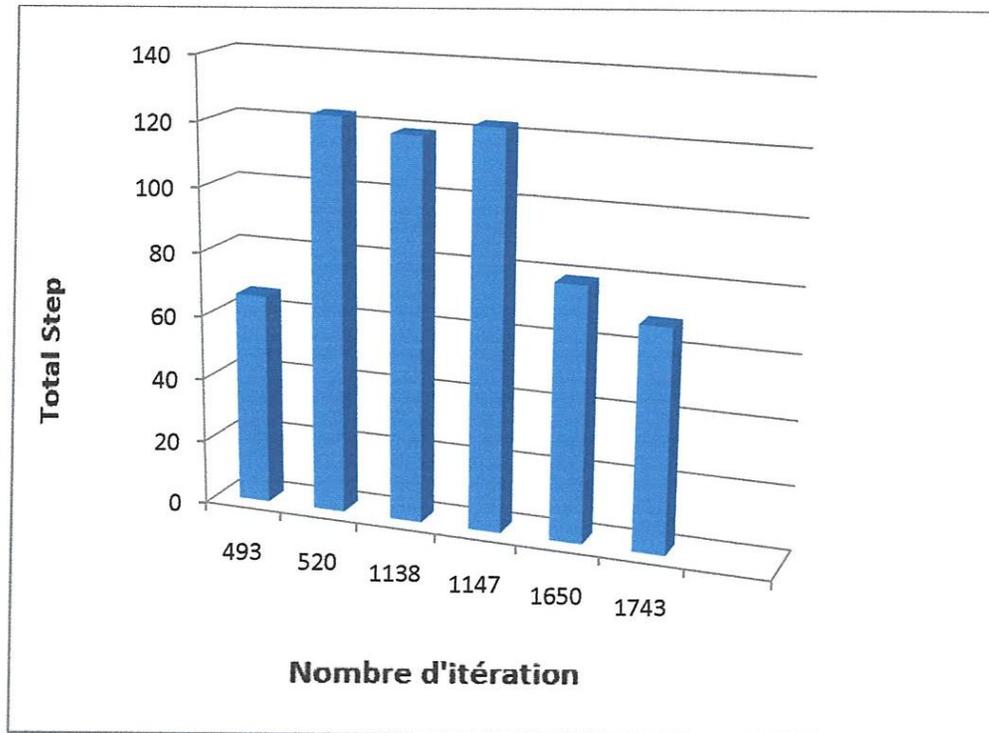
### Discussion des résultats

D'après la figure II.9 et le tableau II.1, on observe que le temps de recharge augmente en parallèle avec l'augmentation de le nombre d'itération c'est-à-dire qu'il y a une consultation continue de la station de recharge, en plus le nombre des agents morts (dead agents) est réduit ce qui prouve que la station de recharge est toujours dans la meilleur position, Ainsi durant la simulation l'agent de station de recharge optimiser sa position dans les voisinage de la source, les agents visitent la charge alternativement ce qui assure le partage de la station de recharge sans interférences entre les deux agents il y a des cases dans les simulations qui montre l'exécution du module *wander* par l'un des agents lorsque la station de recharge est occupé par l'autre, et ça s'est montré par le temps de recharge différents entre les deux agents. En plus le temps total de fourragement est réduit (1812 itérations), ce qui montre que le temps de rechargement est réduit grâce à la station de recharge mobile. En d'autres termes, De ces résultats on peut dire que notre système donne des résultats efficaces en temps de recharge et ces résultats montrent que la station de recharge adapte sa position de façon efficace.

### Le temps total de recharge (Total Step)

Nombre d'itération	493	520	1038	1147	1650	1743
Signal recharge	493	520	1038	1147	1650	1743
Fin de recharge	559	606	1157	1270	1729	1812
Total Step	66	123	119	123	79	69

*Tableau II.2 : Le temps total de recharge de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.*



*Figure II.10 :Un histogramme représente le temps total pour aller se recharger de 2 agents d'une simulation de 1812 itération.*

### Discussion des résultats

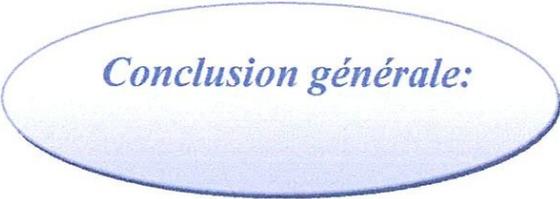
A partir du tableau II.2 et la figure II.10 on observe que le nombre d'itération total est influencé par le nombre consommé en charge, c'est-à-dire le nombre des itérations totale augmente avec l'augmentation du nombre d'itérations consommés pour aller se rechargé est le contraire, ce dernier c'est la différence entre temps ou l'agent détecte une diminution de sa charge à la charge minimale jusqu'à trouver la station et terminé la recharge, On constate clairement un léger avantage pour notre système. C'est parce que les agents peuvent estimer si l'énergie restante est suffisante pour retourner à la station de recharge. Ceci s'explique par la capacité de suivre la station de recharge.

### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail notre application à savoir le modèle comportementale de nos agents réactifs, les agents sont capable de construire des chemins optimaux entre la source et la base (construction de l'APF et dépôt des phéromones), et sont capable à rechargé dans une station mobile (agent dock) cela leurs permet de récupérer leur charge et revenir rapidement au travail, d'un autre coté les agents peuvent coloré les chemins entre la base et la source pour permettre un retour aux sources déjà découverte et

d'attirer l'agent station qui se trouve dans le voisinage de la phéromone, cette diffusion s'évapore par fait de l'environnement lorsque les cellules ne se revisitent pas. La suite des simulations faite montre que notre modèle proposé fournit des résultats nettement efficaces. D'autres problèmes ont été découverts lors de l'implémentation et qui font l'objet de nos perspectives.

*conclusion générale:*



*Conclusion générale:*

La majorité des recherches en robotique se focalisent sur un aspect particulier de l'activité des robots. Que ce soit la cartographie d'un environnement inconnu, le transport d'objets ou le fourragement, ces tâches ont un début et une fin qui clostrent l'expérimentation. La "vie" d'un robot est réduite à une activité unique et à un moment singulier. Sans doute est-ce une des raisons pour laquelle la question de la recharge a été jusqu'ici très négligée : l'autonomie énergétique n'offre en effet aucun intérêt sur le court terme.

Au cours de ce mémoire, nous avons cherché à mettre en situation une collectivité de robots en la confrontant à une activité continue dans des conditions réalistes. La découverte du rôle fondamental des perturbations de recharge et de localisation en est la conséquence directe. Nous avons approché ce que peut être au juste la "vie" d'une collectivité de robots et la complexité des interactions qui en découlent, malgré des expériences très limitées dans le temps et l'utilisation d'un faible nombre de robots. Le développement de ce type d'approche est nécessaire et devrait mettre en évidence de nouvelles problématiques, comme par exemple celle du dépannage. Lorsqu'un seul robot est en jeu, résoudre un problème tient déjà – littéralement – de l'enquête policière.

Notre objectif est de construire un ensemble d'agents autonome, réactifs et coopératifs, qui partagent un but commun. Le problème des robots fourrageurs est un problème benchmark dans les systèmes multi agents.

Ce mémoire concerne l'étude de l'approche par intelligence collective du problème multi-agent dans un environnement connu. De plus, un autre objectif de ce mémoire était d'intégrer la limitation d'énergie au problème de fourragement, proposer un algorithme qui permette aux agents de coordonner les activités de fourragement et de recharge., dans lequel un ensemble d'agents autonomes doivent chercher, collecter, recharger, et transporter des échantillons de minerai vers une base fixe dans l'environnement, les agents doivent assurer en plus des tâches productives (recherche, recharge, collecte et transport) des tâches qui ne sont pas directement productives mais qui améliorent le fonctionnement des tâches productives, ces tâches sont

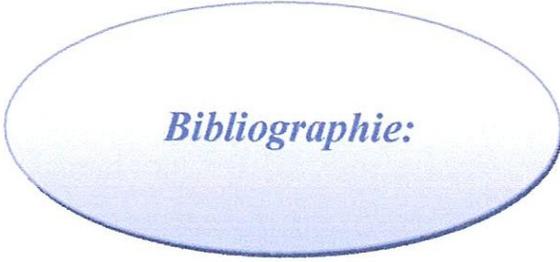
celles de coordination et de coopération. Assurer de telle sorte de tâches de coordination et de coopération est un défi qui fait l'objet de plusieurs travaux de recherches.

La prise en compte des besoins énergétiques des robots et ses conséquences sur les performances de la collectivité représentent un résultat important de ce travail.

Contrairement à un agent logiciel, un robot est contraint d'interrompre son activité à intervalles réguliers. Cette seule différence fait de la robotique collective un domaine spécifique des systèmes multi-agents. De plus, la sensibilité du système aux effets de la recharge est telle que la question ne peut être tout simplement ignorée comme cela est souvent le cas.

Par ailleurs, les perturbations de localisation apparaissent préférentiellement en certains lieux de l'environnement. Ce dernier n'a rien d'un espace géométrique. Les interactions entre les robots et l'environnement produisent des effets complexes qui peuvent altérer la dynamique de la collectivité. Si la dynamique collective peut être effectivement altérée par l'ajout d'un meuble ou par la modification du comportement de navigation, le système robotique devra alors apprendre à s'y adapter.

# *Bibliographie:*



*Bibliographie:*

[Arkin, 87] R.C. Arkin. « MotorSchema based mobile robot navigation ». IEEE international conference on robotics and automation, Avril 1987.

[Boussebough, 11] I. Boussebough, « les systèmes multi-agents dynamiquement adaptables ». Thèse doctorat, Constantine, 2011.

[Brooks, 86] R. Brooks. « A robust layered control system for a mobile robot ». IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986.

[Bonabeauet Dorigo, 99] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. « Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems », Oxford University Press, 1999

[Bellifa, 11] I. Bellifa « Approche Multi-Agent pour la reconnaissance de Diabète », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Tlemcen 2011.

[Demazeau, 01] J-P. Briot, Y. Demazeau. « Principes et architecture des systèmes multi-agents, Paris, Hermès Science Publications ». ISBN :2-7462-0336-7, 2001.

[Chaib-draa, 96] B. Chaib-draa. « Interaction between Agents in Routine, Familiar and Unfamiliar Situations ». International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems, Vol. 5, n°1, 1996.

[Chaib-draa et al., 01] B. Chaib-draa, I. Jarras et B. Moulin. « Systèmes multi-agents : Principes généraux et applications ». Hermès, 2001.

[Champion, 03] A. Champion. « Mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux: application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour ». Thèse de doctorat, l'université de valenciennes et du hainaut-cambrésis, 2003.

[Drogoul, 93] A. Drogoul. « De la simulation multi agent à la résolution de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi agents ». 1993.

[Fabien, 04] M. Fabien. « Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents ». Thèse de doctorat, université Montpellier II, 2004.

[Ferber, 95] J. Ferber. « Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective », inter éditions, 1995.

- [François, 09] K. François. « Contrôle d'un système multi-agents réactif par modélisation et apprentissage de sa dynamique globale ». Thèse doctorat, 2009.
- [Fikes et Strips, 71] R. Fikes, N. Strips. « A new approach to the application of theorem proving to problem solving. Artificial Intelligence ». 2(3/4):189-208, 1971.
- [Guermoudi et Benamar, 11] M. Guermoudi et A. Benamar. « Conception et Implémentation d'un Système multi-agent Pour le test de primalité de nombre premier ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Licence en Informatique, Tlemcen, 2011.
- [Gérard, 99] O. Gérard, J-N Patillon, F. d'Alché-Buc. « Discharge Prediction of Rechargeable Batteries with Neural Networks », in Integrated Computer- Aided Engineering, Volume 6, pp. 41 – 52, 1999.
- [Glad, 11] A. Glad. « Etude de l'auto-organisation dans les algorithmes de patrouille multi-agent fondés sur les phéromones digitales », Thèse doctorat de l'Université Nancy 2, Ecole doctorale IAEM Lorraine, 2011.
- [Haddad et Hamidi, 09] A. Haddad et M. Hamidi. « Modélisation du contexte avec prise en compte d'incertitudes pour les applications sensibles au contexte (cas : les environnements intelligents) ». Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en génie : informatique, Alger, 2009.
- [Humza et Scholz, 11]
- [Hoang, 07] C. Hoang Nam. « Approches collectives pour le problème de la patrouille multi-agent », Stage effectué au LORIA, Projet INRIA MaIA, 2007.
- [Jarras et Chaib-draa, 02] I. Jarras et B. Chaib-draa. « Aperçu sur les systèmes multi-agents ». Montréal, 2002.
- [Jennings et al, 98] N. R. Jennings, M. Wooldridge et K. Sycara. « A roadmap of agent research and development. Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems », 1(1):7- 38, 1998.
- [Malone et al., 88] T. Malone, A. Bond et L. Gasser. « Modeling cooperation in organizations and markets in reading in distributed artificial intelligence ». (EDS) Morgan Kaufmann publishers, Inc, 1988.
- [Muñoz-Meléndez, 02] A. Muñoz-Meléndez, F. Sempé, A. Drogoul. « Sharing a charging station without explicit communication in collective robotics », Proceedings of the

7<sup>th</sup>International Conference on Simulation of Adaptive Behavior on From Animals to Animals, pp. 383 – 384, 2002.

[Malone et al., 90] T. Malone et K. Crowston. « What is coordination theory and how it can help design cooperative work systems». Proceedings of conference on computer supported cooperative work, ToraBikon and Frank Halasz Editors, PP.357-370, 1990.

[Moujahed, 07] S. Moujahed. «Approche multi-agent auto-organisée pour la résolution de contraintes spatiales dans les problèmes de positionnement mono et multi-niveaux». Thèse de l'université de Technologie deBelfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, 2007.

[Machado et Almeida,02] A. Machado, A. Almeida, G. Ramaldo, J.-D. Zucker, A. Drogoul.«Multi- Agent Movement Coordination in Patrolling», In 3rd International Conference on Computers and Games, 2002.

[Nguyen, 03] T. Nguyen. « Modélisation et implémentation d'un système distribué de pages blanches au sein d'une plateforme multi agent ». Rapport de stage, Montréal, décembre 2003.

[Ostergaard et al., 01] E. H. Ostergaard, G. S. Sukhatme, et M. J. Mataric. «Emergent bucket brigading: A simple mechanism for improving performance in multi-robot constrained-space foraging tasks». Proc. Int. Conf. on Autonomous Agents, Montreal, Canada, Mai 2001.

[Parunak et Purcell,02] H.V. Parunak, M. Purcell, R. O'Connell.« Digital Pheromones for Autonomous coordination of swarming UAV's», Proceedings of AIAA First Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, and Operations, 2002.

[Richard, 11] M. Richard. « Segmentation multi-agents en imagerie biologique et médicale : application aux IRM 3D ». Thèse doctorat,Bordeaux, 2011.

[Russel,06]S.Russell, P.Norvig.«Intelligence artificielle».Pearson Education 2<sup>e</sup> édition,2006.

[Simonin, 01] O. Simonin.«Le modèle satisfaction altruisme: coopération et résolution de conflits entre agents situés réactifs, application à la robotique». Thèse de doctorat l'université Montpellier.2001.

[Simonin et al 07] O. Simonin, F. Charpillet, E. Thierry.«Collective construction of numerical potential fields for the foraging problem», INRIA Rapport de Recherche,2007.

[Sempé,04] F. Sempé,Auto-organisation d'une collectivité de robots: application à l'activité de patrouille en présence de perturbations», PhDThesis. Université Paris VI., 2004.

[Silverman, 02] M. Silverman, D. M. Nies, B. Jung, and G. S. Sukhatme.«Staying alive A docking station for autonomous robot recharging», Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington D.C., pp, 1050 – 1055, 2002

[**Sempé,11**] F.Sempé.«Auto-organisation d'une collectivité de robots : Application à l'activité de patrouille en présence de perturbations»,Thèse doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 2011.

[**Steels, 89**] L. Steels. « Cooperation between Distributed Agents through Self Organisation».Decentralized A.I., Elsevier, North-Holland, Amsterdam, 1989.

[**Zebrowski et Vaughan,03**] P. Zebrowski, R. T. Vaughan.«Recharging Robot Teams: A Tanker Approach», Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics, pp. 803 – 810, 2003.

[**Wawerla and Vaughan,07**].J.Wawerla and R.T.Vaughan.«Optimal Robot Recharging Strategies For Time Discounted Labour» ,Autonomy Lab, Simon Fraser University Burnaby, BC V5A 1S6, Canada,2008.