



De la fourmi réelle à la fourmi artificielle

D. BELFADEL ET M. DIAF

*Faculté du Génie Electrique et de l'informatique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.*



1. Introduction

Nous assistons, ces vingt dernières années, à une évolution croissante du nombre d'études menées sur les animaux vivant en groupe ou en société et plus particulièrement les insectes sociaux [1,2,3]. Ces études biologiques dans la théorie de l'auto-organisation ont inspiré un grand nombre de chercheurs pour développer des algorithmes évolutionnaires. C'est ainsi que plusieurs méthodes d'optimisation par essaims particuliers issus d'une analogie avec les comportements collectifs de groupes d'animaux ont vu le jour.

Les études menées sur les fourmis qui ont la particularité d'employer une substance chimique ou phéromone pour communiquer entre elles afin d'exécuter une tâche ou pour marquer leur trajet ont donné naissance aux algorithmes de colonies de fourmis artificielles. Ces algorithmes d'optimisation sont, aujourd'hui, utilisés efficacement dans plusieurs domaines techniques comme la robotique cognitive, la coopération entre robots etc.

Dans ce papier, nous présentons, d'abord, la fourmi réelle, sa vie et son comportement en société. Dans cette partie, les termes qui pourraient intéresser l'ingénieur seront mis en gras. Dans la section suivante, nous montrerons comment les chercheurs ont franchi le pas vers la conception de la fourmi artificielle. Les domaines d'application seront traités dans la quatrième section.

2. La fourmi réelle [4]

La fourmi est un insecte qui fait parti de la famille des *Formicidae* incluse dans l'ordre des hyménoptères et qui comprend, entre autres, les abeilles et les guêpes. Les fourmis sont des millions de milliards d'individus. Leur masse totale est équivalente à la masse totale des Humains. Elles ont colonisé tous les milieux terrestres compatibles avec la vie, y compris les déserts, à l'exception des zones glaciaires et des environnements marins. Les fourmis ne sont pas solitaires. Elles vivent en société. Elles sont réparties en 11 sous-familles, 297 genres et approximativement 10 000 espèces. Pour certaines, les colonies ne renferment qu'une vingtaine d'individus alors que, chez d'autres, les colonies sont gigantesques comme les fourmis *magnans* qui comptent jusqu'à 20 millions d'individus. Cependant, il existe d'autres colonies comme celle des fourmis rousses formée du Jura suisse qui vivent à plus de 100 millions d'individus occupant 70 hectares.

2.1 Les fourmis et l'environnement

L'impact des fourmis sur de nombreux milieux terrestres est très important à cause de leurs activités comme remuer la terre pour aménager leurs nids souterrains. Elles dispersent de nombreuses graines qu'elles perdent au cours de leur chemin permettant ainsi la régénération de la végétation. Les fourmis *Atta* qui prennent des morceaux de feuilles jusqu'à six mètres de profondeur contribuent à la fertilisation du sol. D'autres, comme celles que l'on trouve dans la forêt amazonienne en grand nombre, rejettent dans l'atmosphère une quantité estimée à un million de tonnes la quantité d'acide formique chaque année.

Parfois, elles tissent des liens avec différents animaux. Même agressives, les fourmis *magnans* sont tolérantes envers de nombreux animaux, surtout d'autres insectes. Certains sont parasites de fourmis, d'autres vivent en symbiose avec elles comme le coléoptère *Lomechusa Strumosa* qui mange les larves des fourmis en se faisant nourrir par les ouvrières qui régurgitent, pour lui, le contenu de leurs jabots. Il est toléré, car il fournit aux fourmis une substance qu'il sécrète par des glandes spéciales et qui agit comme une drogue sur ces fourmis. Pour en obtenir sans cesse, elles en arrivent à délaissier les larves. Certains oiseaux comme le *manikup* de Cayenne suivent les colonies de fourmis chasseresses du genre *Eciton*. Ces oiseaux se précipitent sur les insectes que les fourmis délogent de leurs abris pour les dévorer. En Amérique du Sud, certaines fourmis habitent dans les épines creuses d'arbres du genre *Acacia*. Elles sont très agressives et patrouillent sans cesse sur les arbres. Elles protègent ces arbres des attaques des animaux herbivores et, de plus, elles nettoient les alentours de l'arbre en éliminant toute la végétation. Elles contribuent à la survie de ces arbres. D'ailleurs, en Europe, les fourmis rousses sont utilisées pour la protection des forêts. En Chine, une autre espèce est employée pour protéger les orangers contre les insectes ravageurs.

2.2 Les fourmis nuisibles

Les fourmis nuisibles au sens propre du terme sont peu nombreuses. Parmi elles, on trouve les fourmis d'Argentine qui envahissent les maisons en s'attaquant aux denrées qui y sont entreposées. Il est très difficile de s'en débarrasser, car elles construisent des nids petits nombreux et espacés. En Afrique, les fourmis du genre *Macromischoides* sont très venimeuses et gênent lors de la cueillette du café. D'autres fourmis qui élèvent des pucerons sont nuisibles car ces derniers détruisent de nombreuses plantes.

2.3 Anatomie de la fourmi

Physiologiquement, la fourmi est constituée d'une tête, d'un thorax et d'un abdomen. La tête est principalement composée de deux antennes et pièces buccales ou mandibules (fig.1). **Les antennes** composées de plusieurs segments et recouvertes de cils tactiles sont des organes sensoriels ayant pour fonction le goût, le toucher et l'odorat. Elles sont utilisées pour **la communication**. Les mandibules dures et cornées formant la partie supérieure de la mâchoire servent à saisir et à broyer la nourriture ou à la porter jusqu'à la fourmilière. **Les**

deux yeux de la fourmi sont constitués d'une centaine de facettes qui donnent aux fourmis une vision large de 180°. Certaines fourmis voient en noir et blanc et d'autres en couleur. Ils en existent même celles qui sont aveugles. Chez les reines et les mâles, on retrouve, sur leur front, trois petits yeux appelés ocelles et disposés en triangle sur le sommet de la tête. Ce sont **des capteurs infrarouges** qui permettent de détecter des sources de chaleur. Quant au cerveau, il compte environ 500 000 neurones et est composé de trois parties à savoir le *tritocérébron*, le *protocérébron* et le *deutocérébron* ayant un rôle dans l'intégration des informations chimiques perçues par les **chimiorécepteurs** comme les ocelles ou les antennes. Le thorax, situé entre la tête et l'abdomen est composé de trois anneaux, chacun portant une paire de pattes. Le prothorax est le segment antérieur autour duquel la tête s'articule. Vient ensuite le mésothorax puis le métathorax. De plus, on y trouve plusieurs glandes parmi lesquelles la glande labiale qui sécrète les enzymes digestives. Le pétiole est l'articulation entre le thorax et l'abdomen qui est la partie postérieure des fourmis. Séparé en 11 ou 12 parties qui sont des segments abdominaux, l'abdomen renferme des cavités digestives comme le jabot social ou estomac social et le gésier ou estomac.

Les fourmis sont, généralement, omnivores. Elles peuvent, cependant, adapter leur régime alimentaire. Leur nourriture est stockée dans le jabot qui est un réservoir à nourriture. Cette nourriture peut être régurgitée pour les autres individus de la fourmilière. Il y a ainsi échange de nourriture entre individus de la même société: c'est la *trophallaxie*. Ce sont les ouvrières les plus anciennes nourrissent toute la colonie. Quant au gésier, il est le « véritable » estomac de la fourmi. Il sert aussi de pompe pour propulser, vers la bouche, les aliments contenus dans le jabot. L'abdomen est aussi constitué de l'intestin et des conduits respiratoires ainsi que des appareils reproducteurs chez la reine et le mâle. Chez certaines espèces de fourmis, l'abdomen est terminé par une glande à venin et par un aiguillon.

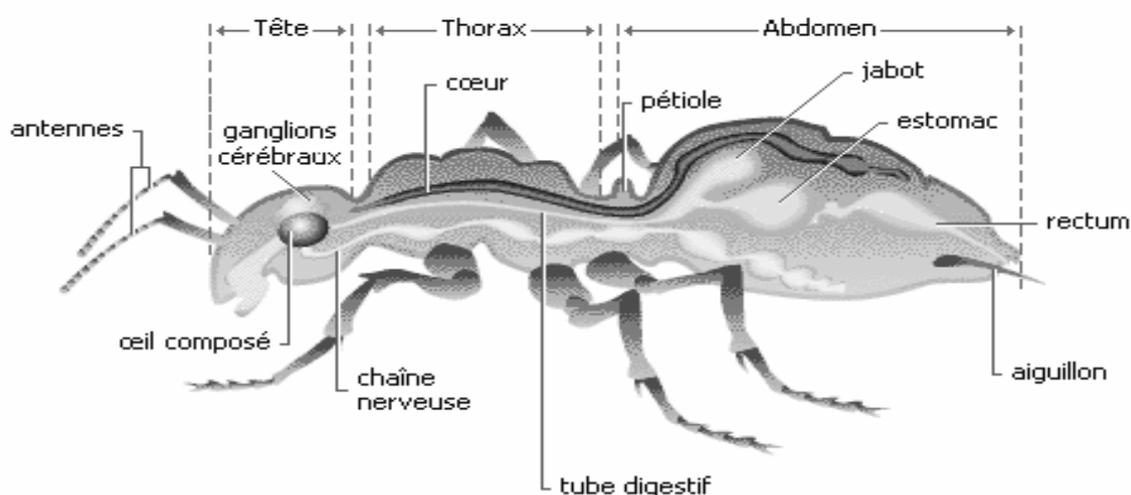


Fig.1.1 Anatomie de la fourmi [4]

2.4 Vie sociale de la fourmi

Les fourmis vivent, donc, dans des fourmilières creusées sous le sol ou dans les arbres. La fourmilière est divisée en castes constituées d'individus qui diffèrent par quelques centaines de caractéristiques morphologiques ayant un rôle chacune. Dans la caste des ouvrières, on trouve des femelles stériles avec des caractéristiques physiques adaptées à leur fonction spécifique et assurant diverses tâches comme l'élevage des jeunes larves, la construction et l'entretien du nid et la récolte de la nourriture. Chez les fourmis charpentières, les plus grandes ouvrières sont chargées de la défense du nid, celles de taille intermédiaire, de la recherche de la nourriture et, les plus petites, de s'occuper du couvain. Mais, en cas de nécessité, n'importe quelle ouvrière peut prendre en charge n'importe quelle autre activité. Chez diverses fourmis, comme les *magnans* d'Afrique, il existe une caste supplémentaire, celle des soldats ayant une grosse tête et d'énormes mandibules pour assurer la défense de la société ou pour attaquer les ennemis. La caste des reproducteurs comprend des femelles ou reines et des mâles. Beaucoup plus grosses et plus grandes que les ouvrières, les reines naissent avec des ailes qu'elles perdent après l'accouplement. Par contre, les mâles sont plus petits et pourvus d'ailes et meurent après l'accouplement. Mâle et reine sont les seuls individus sexués contrairement aux autres individus. La reproduction est assurée par la reine ou les reines faisant partie de la colonie selon un mode de reproduction assez original dans le règne animal appelé *parthénogenèse arrhénotoque*. Ce mode permet à la reine, quand elle est fécondée par un mâle, d'engendrer des femelles, donc des ouvrières, mais également d'engendrer des mâles si elle n'est pas fécondée, mâles qui pourront, par la suite, éventuellement la féconder. Au cours de leur vie, les reines pondent plusieurs millions d'œufs. Ainsi, les fourmis passent, au cours de leur vie, par quatre stades : œuf, larve, nymphe et adulte (fig.2). Les œufs minuscules, blancs ou jaunâtres, éclosent de deux à six semaines après la ponte et donnent naissance à des larves blanches dépourvues de pattes et immobiles. Au bout d'un temps variant de quelques semaines à plusieurs mois, les larves se transforment en nymphes, souvent enveloppées dans un cocon sécrété à la fin du stade larvaire. Enfin, les adultes succèdent au stade nymphal. Ces larves sont nourries, nettoyées et protégées par les ouvrières tout au long de leur développement. En échange, ces dernières lèchent une substance que les larves sécrètent à la surface de leur corps.

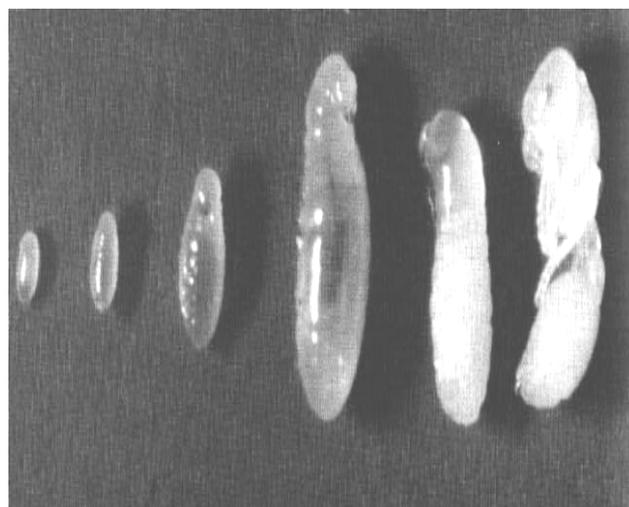


Fig.1.2 Les stades de développements d'une fourmi [4]

2.5 Communication entre fourmis

Les fourmis possèdent de nombreuses glandes de sécrétions jouant plusieurs rôles. Les glandes de Dufour et de Pavan sont utilisées pour le **marquage des chemins et voies d'exploration** autour de la fourmilière par des substances odorantes ou pour se rassembler. Les glandes métagéales dont le **produit est perceptible par les antennes** sont utilisées pour la reconnaissance et sécrètent aussi des substances antiseptiques. Les glandes mandibulaires sécrètent une substance dite «d'alarme» ou «d'alerte» et attractive ou répulsive selon la **dose émise** et fait fuir les ouvrières étrangères. Les glandes *tergales* ou *pygidiales* permettant aux fourmis d'**entrouvrir** leur membrane inter segmentaire du dos de l'abdomen pour libérer une phéromone sexuelle. Chez les fourmis des bois, la glande à poison peut propulser, parfois, à une distance de un mètre de l'acide formique qui sert d'arme de défense chimique. Dans tous les cas, **ces phéromones qui sont des substances volatiles** et qui fonctionnent comme des **signaux chimiques** constituent des **messages d'odeur** échangés par les fourmis par le biais de leurs antennes pour **communiquer entre elles**. Ces signaux chimiques sont formés d'un type d'hydrocarbures et véhiculent, à la fois, **l'information sur l'espèce**, la société, la caste et le stade de développement auxquelles appartiennent les individus rencontrés. C'est une véritable carte d'information génétique. C'est un **système de communication** très sophistiqué qui regroupe donc, la communication sexuelle, la communication reine - ouvrière, le recrutement, l'alarme et la défense ainsi que les phéromones territoriales. Très souvent, les fourmis utilisent, entre elles, des tapotements des antennes et des premières pattes face à face ou des effleurements pour **transmettre certains types de messages**, simples et directs. Par exemple, pour couder les feuilles entre elles lors de la construction de la fourmilière, les fourmis tisserandes font **vibrer l'extrémité de leurs antennes** autour de la tête d'une larve une dizaine de fois avant que la larve sécrète de la soie. Toutefois, la **communication par l'intermédiaire des pattes** reste aussi très fréquente et de nature souvent utile. Une ouvrière peut amener une autre fourmi à régurgiter de la nourriture liquide en étendant une patte antérieure sur le labium provoquant, de ce fait, un réflexe vomitif dont l'autre fourmi peut profiter pour se nourrir. En plus de ces deux moyens de communication, les fourmis disposent, aussi, de deux modalités différentes pour échanger les **messages sonores** : les stridulations et les émissions sonores sans des organes stridulatoires. Dans le cas des messages sonores dus aux stridulations, le signal sonore est à l'origine d'un crissement aigu, dû aux frottements d'un mince grattoir transversal situé sur sa taille, contre un plateau de fines crêtes parallèles, situé sur la surface adjacente de l'abdomen. Cette stridulation peut remplir différentes fonctions, selon l'espèce et les circonstances comme, par exemple, émettre des **signaux de détresse**. Une ouvrière en danger émettra, donc, ce signal de détresse qui se propagera dans le sol et permettra l'aide d'autres fourmis. Ce type de message est **perçu par les pattes** des fourmis qui sont des **véritables détecteurs ultra sensibles aux variations du sol**, alors que les fourmis **réagissent très peu aux vibrations transmises par l'air**. En fonction de l'intensité de la vibration émise, cette stridulation est également utilisée pour renseigner sur la qualité de l'alimentation. En effet,

une fourmi récolteuse qui repérera une feuille désirable se mettra à « **chanter** », dans le but d'attirer ses sœurs et de les **renseigner** sur la **qualité de la nourriture**. La dernière fonction de cette stridulation est de provoquer **un signal de renforcement**. En effet, les fourmis *Aphenogaster* du désert crissent lorsqu'elles ont trouvé un aliment de grande taille pour obtenir l'aide de leurs sœurs. Il existe également, des émissions **sonores sans organes stridulatoires**. Certaines espèces de fourmis, lors d'un éventuel danger, frappent leurs têtes sur un substrat dur, permettant ainsi la **propagation d'un message** qui va alerter ses congénères. Pour donner l'alerte, d'autres espèces se servent de leur abdomen pour frapper les parois de la fourmilière. La fourmi *Camponotus Ligniperda*, quant à elle, frappe le sol alternativement avec les mandibules et l'extrémité de l'abdomen quand elle est dérangée, ce qui excite les congénères qui deviennent beaucoup plus agressifs. On peut remarquer un comportement assez similaire chez le castor qui frappe l'eau avec sa queue, en cas d'alarme, pour alerter ses congénères d'un danger. Quant à la **communication visuelle**, elle était, pour la fourmi, une des formes couramment utilisée au stade primaire de l'évolution, mais elle l'est de moins en moins. Ceci vient du fait de l'évolution considérable des fourmis qui implique une communication plus efficace. Cependant, certaines espèces s'en servent encore pour des situations bien particulières. En effet, si une ouvrière tombe sur de trop grosses graines, elle **tourne frénétiquement** autour de celles-ci jusqu'à ce que d'autres ouvrières la voient et viennent l'aider. Chez les *Tisserandes*, lorsque la fourmilière veut construire un nouveau nid, une fourmi qui parvient à recourber une feuille sera un premier signe de succès. Les fourmis des alentours viennent l'aider. Plus la feuille est recourbée, plus il y aura de fourmis. Ainsi, **la communication visuelle** varie selon les espèces mais aussi selon les individus. En effet, chez les fourmis rousses, par exemple, les mâles sexués ont une très bonne vue contrairement aux ouvrières qui sont presque aveugles. Le mâle sexué aura donc un avantage certain sur ses congénères appartenant aux autres castes et, il pourra repérer un prédateur dans la forêt pour en avertir la fourmilière.

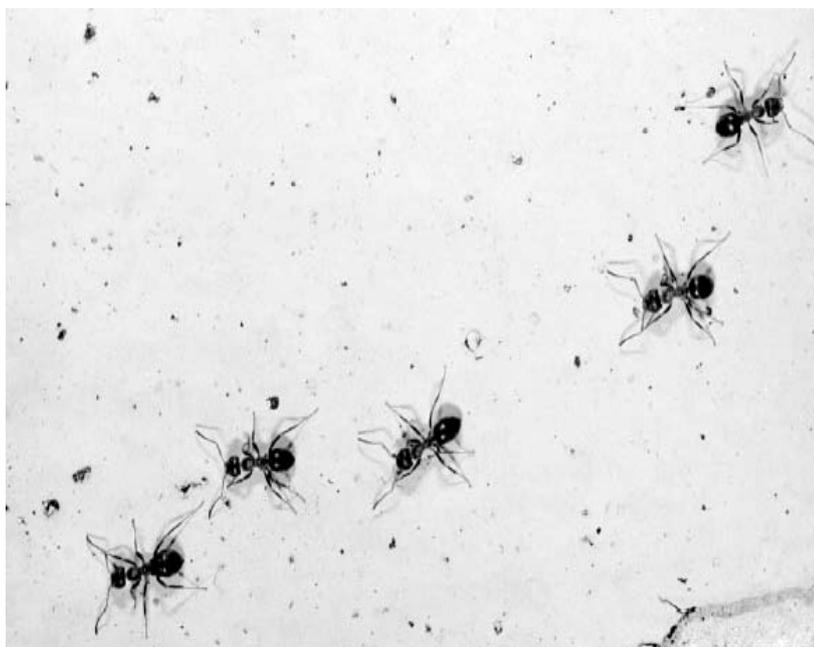


Fig.1.3 Des fourmis suivant une piste de Phéromone [5]

En effet, si une ouvrière tombe sur de trop grosses graines, elle **tourne frénétiquement** autour de celles-ci jusqu'à ce que d'autres ouvrières la voient et viennent l'aider. Chez les *Tisserandes*, lorsque la fourmilière veut construire un nouveau nid, une fourmi qui parvient à recourber une feuille sera un premier signe de succès. Les fourmis des alentours viennent l'aider. Plus la feuille est recourbée, plus il y aura de fourmis. Ainsi, **la communication visuelle** varie selon les espèces mais aussi selon les individus. En effet, chez les fourmis rousses, par exemple, les mâles sexués ont une très bonne vue contrairement aux ouvrières qui sont presque aveugles. Le mâle sexué aura donc un avantage certain sur ses congénères appartenant aux autres castes et, il pourra repérer un prédateur dans la forêt pour en avertir la fourmilière.

Ce sont tous ces différents types de communication qui permettent à la fourmi d'être un insecte social ayant la capacité de se partager le travail en accomplissant les tâches de recherche de nourriture, de défense, de l'entretien et de la construction du nid, de l'entretien des larves et leur approvisionnement en nourriture etc. Toutes ces activités doivent être assurées simultanément pour la survie, le développement et le bon fonctionnement de la colonie. Ce bon fonctionnement est assuré par la caste des ouvrières qui se chargent donc de la défense ou de la guerre, de l'entretien de la colonie et ainsi de la construction de la fourmilière, des soins apportés à la reine et aux couvains, de la quête de nourriture.

1.5 Point de vue de l'ingénieur

Cette manière avec laquelle les fourmis **interagissent** entre elles et mettent en jeu des **processus de communication, de transfert d'information** par le biais de signaux, d'indices ou autre, constitue une mine d'inspiration fascinante du point de vue de **l'ingénieur** ou du **chercheur**. Comme les fourmis sont capables d'accomplir des tâches difficiles dans des environnements dynamiques et variés, l'ingénieur qualifiera cette forme d'organisation, de **systèmes complexes** ayant également des structures des plus élaborées comme l'architecture des nids. Ce sont donc des **organisations distribuées**, sans **contrôle centralisé** ni de **coordination du niveau supérieur**. Elles sont sous forme d'**hétéarchie** dense et de **structure horizontale**, ce qui signifie que la colonie forme un **réseau hautement connecté**. Ainsi, chaque fourmi peut échanger des informations avec n'importe quelle autre en disposant d'une vision locale de son environnement sans connaître de problème dans son ensemble, ce qui a pour avantage, la **robustesse** et la **flexibilité**. Cette robustesse permet au système d'être capable de continuer à fonctionner en cas de **panne** de quelques fourmis et la flexibilité assure l'efficacité de par son **caractère dynamique**.

3. De la fourmi réelle à la fourmi artificielle

Ainsi, de la fourmi réelle, les chercheurs ont franchi le pas vers la conception de la fourmi artificielle. En effet, de la recherche de nourriture de la fourmi réelle, le chercheur a conçu des algorithmes d'optimisation combinatoire et de routage dans les réseaux. De la division de travail entre fourmis réelles, est déduit le problème d'allocation des tâches. A partir du rangement des larves et des cadavres de la fourmi réelle, c'est le partitionnement de graphes, la classification automatique et le tri collectif qui en ont découlé. Du transport coopératif des fourmis réelles, on est passé à la robotique distribuée.

4. Les algorithmes de colonies de fourmis artificielles

Le domaine des fourmis artificielles n'est pas encore bien défini. De manière plus générale, en s'intéressant à d'autres êtres vivant en société, certains auteurs préfèrent parler d'intelligence collective artificielle ou d'intelligence en essaim. Ainsi, la première

conférence consacrée à ce domaine s'est déroulée à Bruxelles en 1998. Il était question, majoritairement, de communications consacrées aux algorithmes évolutionnaires, à la vie artificielle et à la simulation des comportements adaptatifs des animaux [6]. Ainsi, à partir de l'observation de la vie et du comportement des fourmis, plusieurs algorithmes ont été développés par les chercheurs. Les premiers principaux travaux ont été pratiquement menés au début des années 1990 par Alberto Colorni, Marco Dorigo et Vittorio Maniezzo [7] pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Dans l'article [8], Colorni et *al.* Mettent en œuvre, pour la première fois, les algorithmes de colonies de fourmis appelés communément Ant System (AS).

Les fourmis utilisent toujours le chemin le plus court. Plusieurs expériences ont été réalisées pour comprendre comment les fourmis choisissent cet itinéraire sans avoir une vision globale du trajet. Dans l'expérience de la figure 3, il a été constaté que les fourmis les plus rapidement arrivées au nid, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui empruntent les deux branches les plus courtes. Ainsi, la quantité de phéromone présente sur le plus court trajet est légèrement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long. Or, une piste présentant une plus grande concentration en phéromone est plus attirante pour les fourmis. Elle a une **probabilité** plus grande d'être empruntée. La piste courte va alors être plus renforcée que la longue, et, à terme, elle sera choisie par la grande majorité des fourmis. On constate qu'ici, le choix s'opère par un mécanisme d'amplification d'une fluctuation initiale.

Pour transposer ce comportement à un algorithme général d'optimisation combinatoire, on fait une analogie entre l'aire dans laquelle les fourmis cherchent de la nourriture et l'ensemble des solutions admissibles du problème, entre la quantité ou la qualité de la nourriture et la fonction objectif à optimiser et, enfin, entre les traces et une mémoire adaptative.

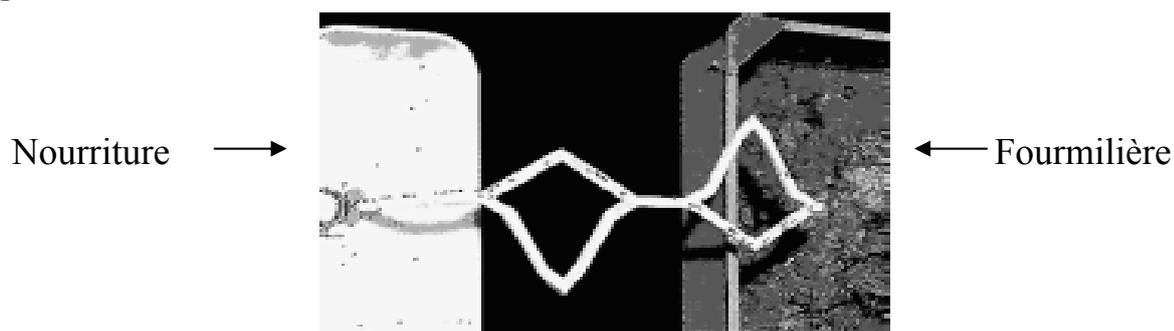


Fig.1.4 Expérience de sélection des branches les plus courtes par une colonie de fourmis

L'algorithme général basé sur une colonie de fourmis peut être décrit comme suit :

- 1) Initialiser les traces.
- 2) Répéter en parallèle pour chacune des p fourmis et tant qu'un critère d'arrêt n'est pas satisfait :
 - a. Construire une nouvelle solution à l'aide des informations contenues dans les traces et une fonction d'évaluation partielle.
 - b. Évaluer la qualité de la solution.
 - c. Mettre à jour les traces.
 - d. Application avec une probabilité donnée d'une recherche locale à ces solutions (la meilleure)

4.1 Application au problème du voyageur de commerce

On rappelle que dans ce problème, il s'agit de trouver le trajet le plus court reliant n villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois. Ce problème est l'un des premiers à avoir suscité «l'utilisation» des fourmis pour le résoudre. Il s'agit d'une minimisation de distance à parcourir. Un certain nombre de travaux ont montré que les fourmis réelles confrontées à ce type de problème sont capables d'y apporter une réponse. La liste des villes à visiter étant connue, l'algorithme est basé sur l'évaporation des pistes de phéromones et la visibilité ou inverse de la distance entre les villes. Cette application a fourni des résultats très satisfaisants [9].

4.2 Application aux problèmes continus et dynamiques

Devant le succès rencontré par les algorithmes de colonies de fourmis, de nombreuses pistes autres que celle de l'optimisation combinatoire commencent à être explorées comme, par exemple, l'utilisation de ces algorithmes dans des problèmes continus et/ou dynamiques, ou encore, la mise en relation de ce type d'algorithmes dans un cadre d'intelligence en essaim et avec d'autres métaheuristiques. La première application des algorithmes de colonies de fourmis à des problèmes dynamiques concernait l'optimisation du routage sur des réseaux de type téléphonique [10]. Cependant l'algorithme proposé n'ayant pas fait l'objet d'études et de comparaisons approfondies, il est difficile d'en tirer des enseignements. D'autres applications comme l'algorithme ont été développés pour des problèmes de routage sur des réseaux de type Internet [11].

4.3 Application en robotique collective

Initialement, les insectes ont constitué une source d'inspiration intéressante dans la conception de robots dits solitaires. Cependant, une communauté de robots coopératifs s'est avérée plus performante en termes de vitesse et d'efficacité que le même nombre de robots agissant de manière individuelle. En effet, un ensemble de robots simples, donc moins coûteux, est plus robuste qu'un seul robot très élaboré. Aussi, la répartition d'une colonie de robots peut s'ajuster dynamiquement à la densité des objets recherchés. Les travaux, dans ce domaine, n'utilisent pas les capacités collectives des colonies d'insectes, mais ils s'inspirent plutôt des capacités des insectes en matière de perception ou de mobilité [12]. On trouve par exemple des robots capables d'utiliser la lumière polarisée ou focalisée pour se diriger comme l'utilisent certaines espèces de fourmis. L'utilisation des phéromones a aussi été mise en œuvre sur un robot. D'autres chercheurs ont aussi construit un robot capable de se diriger en suivant des traces de camphre. L'utilisation de la chaleur comme information environnementale a aussi été envisagée. Ainsi, les fourmis qui sont de petites créatures relativement simples, du point de vue des roboticiens, aux capacités de communication réduites mais capables d'accomplir des tâches complexes, ont inspiré de nombreux robots hexapodes en utilisant des réseaux de neurones artificiels pour en contrôler le comportement.

4.4 Application en programmation informatique

La programmation informatique a évolué, suite à l'apparition de comportements adaptatifs. Certains manipulent des programmes-fourmis sous la forme de réseaux de neurones artificiels ou d'automates à états finis. Les gènes de chaque organisme sont représentés sous la forme de chaînes binaires codant, soit les poids d'un réseau de neurones, soit la table de transition d'un automate fini. Ce système parvient en quelques centaines de générations à faire évoluer une population de 64 000 individus initialisés au hasard vers la capacité à suivre un chemin incomplet assimilable aux traces de phéromones.

4.5 Application au tri d'objets

Deneubourg apparaît comme le pionnier dans le domaine du tri automatique d'objets en utilisant des fourmis artificielles. Dans son article [14] il propose les principes suivants : des fourmis artificielles se déplacent sur un plan. Les objets à rassembler sont répartis sur ce plan. Une fourmi ne dispose que d'une perception locale de ces objets et ne communique pas avec les autres. Lorsqu'une fourmi rencontre un objet, elle le ramasse avec une certaine probabilité basée sur la fréquence de rencontre d'objets dans un passé récent. Une fois un objet ramassé, elle se déplace au hasard dans le plan et elle dépose l'objet avec une autre probabilité. Ces principes relativement simples font qu'il apparaît des regroupements d'objets. Ce procédé a été inspiré du tri du couvain par la fourmi réelle.

4.6. Application à la classification

Le pas qui sépare le tri d'objets de la classification a ensuite été franchi dans l'article de Monmarché [15]. Il existe plusieurs algorithmes de classification automatique basée sur les fourmis artificielles. On peut aussi introduire un modèle à base de fourmis pour la classification utilisant le système d'identification chimique des fourmis. Celui-ci est fondé sur la construction d'une odeur coloniale qui est le fruit des apports génétiques, environnementaux et comportementaux. Cette odeur est construite par les individus pour identifier qui fait partie du groupe et qui doit être rejeté. A partir de ce modèle, un nouvel algorithme de classification a été proposé dans lequel chaque donnée est une fourmi dont l'odeur est déterminée par les valeurs prises par les attributs décrivant cette donnée. Les fourmis effectuent des rencontres aléatoires et décident d'appartenir au même groupe ou non. Il en résulte l'établissement d'une classification.

4.7 Application en traitement d'images

Des études plus récentes ont étendu les algorithmes de colonies de fourmis (ACO) aux problèmes de la classification pour les appliquer au domaine du traitement d'images tel que

Les travaux de J. Dréo [16] qui a développé un algorithme d'optimisation continu pour le recalage d'images d'angiographie rétinienne. Les ACO ont été aussi appliqués pour segmenter des images en se basant sur l'odeur phéromonale de la colonie pour extraire des régions d'intérêts appliqué dans le domaine de l'imagerie médicale.

5. Conclusion

Les algorithmes s'inspirant des colonies de fourmis commencent à être mieux décrits et formalisés. L'ensemble des propriétés les décrivant est connu. Il s'agit de la construction probabiliste d'une solution, d'une heuristique sur l'instance du problème, de l'utilisation d'une fourmi de mémoire indirecte et d'une structure comparable à celle d'un système auto-organisé. On pourrait décrire cette métaheuristique comme un système distribué où les interactions entre composants, par le biais de processus stigmérgiques, permettant de faire émerger un comportement global cohérent rendant le système capable de résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Les algorithmes des colonies de fourmis possèdent des caractéristiques intéressantes telles que le parallélisme intrinsèque élevé, la flexibilité (la colonie s'adapte à des modification de l'environnement), la robustesse (une colonie est apte à maintenir son activité si quelques individus sont défaillants) en plus de la décentralisation et de l'auto organisation, ce qui rend cette démarche plus utile pour les problèmes difficiles tels que la classification non supervisée et la recherche de l'optimum global dans les problèmes d'optimisation combinatoire. Les colonies de fourmis ont été appliquées avec succès à des nombreux problèmes combinatoires et commencent à être adaptées à des problèmes continus et dans des applications industrielles.

Plusieurs résultats obtenus ont montré l'efficacité de ces nouveaux algorithmes qui peuvent concurrencer d'autres méthodes stochastiques d'optimisation comme le recuit simulé et l'algorithme génétique en termes de qualité de solution.

Les revues et journaux pouvant accueillir des publications sur le thème des fourmis artificielles sont dans le même courant et plus globalement en intelligence artificielle telle que les périodiques *Adaptive Behavior Artificial Life BioSystems* et *Journal of Artificial Intelligence Research Evolutionary Computation*. En ce qui concerne les autres sources de publication, on trouve dans les revues centrées sur un domaine particulier des applications des fourmis artificielles (*Journal of Operation Research Society* etc.) ou des numéros spéciaux comme *Future Generation Computer Systems journal*.

Bibliographie

1. Bonabeau, E. and Theraulaz, G. (1994). *Intelligence Collective*. Hermès, Paris, 288 p.
2. M. Salomon Techniques d'optimisation : Les métaheuristicques, I.U.T. Belfort-Montbéliard, salomon@iut-bm.univ-fcomte.fr
3. Hölldobler, B. and Wilson, E.O., 1990, *The ants* (Springer-Verlag, Berlin).
4. Sites Internet suivants : [Alain Lenoir](#) , [Jean-Yves Bichaton](#), [Jean-Michel Dalin](#) , [Romain](#), [Bernard Weber](#) auteur d'une trilogie sur les fourmis.
5. J. Dréo, A. Petrowski, P. Siarry et G. Taillard, Métaheuristicques pour l'optimisation difficile, Éditions Eyrolles, 2003, ISBN : 2-212-11368-4
6. E. Bonabeau, M. Dorigo and G. Theraulaz. Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, Vol. 406, juillet 2000, pp. 39-42.

7. M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni. The Ant System: An autocatalytic optimizing process. Technical Report 91-016 Revised, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
8. A. Coloni, M. Dorigo, V. Maniezzo, and M. Trubian. Ant System for jobshop scheduling. *JORBEL - Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science*, 34(1):39–53, 1994.
9. Coloni, A., Dorigo M. et Maniezzo V., « Distributed optimization by ant colonies », dans : *Toward a practice of autonomous systems : proceedings of the First European Conference on Artificial Life (ECAL91)*, VARELA F. J. et BOURGINE P. (éditeurs), MIT Press, Cambridge, 1992, 134–142.
10. L. M. Gambardella, E. D. Taillard, and G. Agazzi. MACS-VRPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. In D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover, editors, *New Ideas in Optimization*, pages 63–76. McGraw Hill, London, UK, 1999.
11. R. Hadji, M. Rahoual, E. Talbi, and V. Bachelet. Ant colonies for the set covering problem. In M. Dorigo, M. Middendorf, and T. Stützle, editors, *Abstract proceedings of ANTS2000 – From Ant Colonies to Artificial Ants: A Series of International Workshops on Ant Algorithms*, pages 63–66. Université Libre de Bruxelles, 2000.
12. Deneubourg J.-L., Goss S., Frank N., Sendova A. Frank S. A., Detrain C., CHRETIEN L., « The dynamics of collective sorting : robot-like ant and ant-like robots », MEYER J., WILSON S., Eds., *Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990, p. 356–365.
13. Taillard, E. D. (1998). Programmation à mémoire adaptative et algorithmes pseudo-gloutons : nouvelles perspectives pour les métaheuristiques. Thèse d'habilitation à diriger les recherches, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, France.
14. J.-L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, and J.-M. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3:159–168, 1999.
15. Monmarché N., Slimane M., Venturi G., « On Improving Clustering in Numerical Databases with Artificial Ants », FLOREANO D., NICOUD J., MONDALA F., Eds., *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 13-17 September 1999, Springer-Verlag, p. 626–635.
16. Dréo, J. and Siarry, P. (2003). *Un algorithme de colonie de fourmis en variables continues hybridé avec un algorithme de recherche locale*. In 5ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2003), Avignon, France.