

IC2

Traité Informatique et Systèmes d'Information

Fourmis artificielles 1

*des bases de l'optimisation
aux applications industrielles*

sous la direction de
Nicolas Monmarché
Frédéric Guinand
Patrick Siarry

Hermès

Lavoisier

Chapitre 1

Des fourmis réelles aux fourmis artificielles

La vie sociale des fourmis a fasciné les hommes depuis l'antiquité pour leur courage, leur sagesse et leur aptitude au travail. On leur attribue même des sentiments. Elles sont un modèle d'organisation. Cependant, quand on les observe, on a souvent plutôt l'impression qu'elles s'agitent dans tous les sens et font n'importe quoi. Et pourtant, finalement la brindille est bien entrée dans le nid, ou la proie rapportée au nid rapidement. En réalité, les fourmis ne sont pas des automates programmés tous identiques ; elles sont différentes et ne font pas toutes la même chose. C'est ainsi que dans un système apparemment chaotique, une organisation stable se maintient. Pour expliquer ce phénomène, on a imaginé la notion d'auto-organisation. Les fourmis sont devenues un objet d'étude pour les informaticiens qui modélisent leur comportement afin de mieux comprendre leur organisation sociale. Dans ce chapitre, nous rappellerons d'abord ce que sont les vraies fourmis. Ensuite, nous avons choisi de présenter quelques exemples de modélisation. Dans une troisième partie, nous verrons que la fourmi devient purement virtuelle quand les informaticiens ont utilisé le modèle fourmi pour résoudre leurs propres problèmes.

1.1. Les vraies fourmis

Les fourmis représentent un univers à elles seules. « *The ants* », la bible des myrmécologues, est un pavé de 780 pages [HÖL 90], de nombreuses publications sont

Chapitre rédigé par Alain LENOIR et Nicolas MONMARCHÉ.

accessibles au grand public [KEL 06, PAS 05] et on retrouve très souvent des illustrations des capacités des fourmis dans les reportages animaliers¹. Elles occupent en effet [PAS 06] presque tous les habitats terrestres où leur biomasse est considérable. Par exemple, en forêt amazonienne, la biomasse des fourmis est quatre fois supérieure à la biomasse des vertébrés terrestres [PAS 05]. En mars 2008, on recensait 12 307 espèces différentes et il en reste peut-être encore autant à découvrir, surtout en milieu tropical très mal connu. Elles ont inventé l'élevage des pucerons (c'est un vrai bétail qui est mis à l'abri en hiver, transporté lors des déménagements, et défendu contre les prédateurs), la culture de champignons, l'esclavage (il s'agit d'esclavagisme interspécifique : une espèce comme la fourmi amazone *Polyergus* utilise une autre espèce pour subvenir à ses propres besoins), la vie en parasite, la guerre, la division du travail, le nomadisme, des antibiotiques et des poisons. Elles mesurent de moins d'un millimètre à 4 cm. Leurs colonies comportent de quelques individus à plusieurs dizaines de millions (plus de 20 millions chez les fourmis légionnaires nomades d'Afrique tropicale, plus de 300 millions dans les supercolonies de fourmis rousses des bois au Japon ou dans le Jura suisse, avec un million de reines et 45 000 nids sur quelques km²). Elles nichent dans le sol jusqu'en haut des plus hauts arbres de la canopée. Comment expliquer ce succès ? Justement par leur vie sociale très développée dont on va présenter les principales caractéristiques, mais d'abord comment reconnaître une fourmi ?

Ce que l'on appelle fourmi est en général une ouvrière. Il s'agit d'un insecte, caractérisé par un exosquelette (littéralement « squelette extérieur », c'est-à-dire carapace, aussi appelée cuticule), six pattes, des yeux et deux antennes. Elle a un corps en trois parties : la tête, le thorax et l'abdomen (figure 1.1). Tout cela fait que le faciès fourmi est très caractéristique. Tout le monde reconnaît facilement une fourmi de loin, même si elle n'a que quatre pattes comme dans les dessins animés de Walt Disney. L'anatomie de la fourmi se caractérise classiquement par un tube digestif, un appareil circulatoire, un système nerveux et de nombreuses glandes, qui sont de véritables usines chimiques. Le tube digestif comporte une poche spéciale, le jabot, où est stockée la nourriture liquide. L'ouvrière est stérile. La reine est le seul individu pondreur, il peut d'ailleurs y avoir plusieurs reines au sein d'une même colonie (chez les fourmis envahissantes comme la fourmi d'Argentine sur la Côte d'Azur, il y a des milliers de reines). Elles sont en général beaucoup plus grosses que les ouvrières et ce sont souvent de véritables machines à pondre (deux œufs à la minute, en période de ponte, chez les fourmis légionnaires).

Lorsque l'on observe une fourmilière ou des fourmis dans un nid artificiel en laboratoire, on est surpris par la richesse du répertoire comportemental de ces animaux.

1. Cet engouement s'est également traduit par le succès considérable des livres de B. Werber, livres dont le point de départ est souvent un fait réel, mais très vite l'auteur fait de la science-fiction et attribue aux fourmis des sentiments humains, ce qui, évidemment, n'est pas pertinent pour l'étude scientifique des fourmis, qu'elles soient réelles ou artificielles.

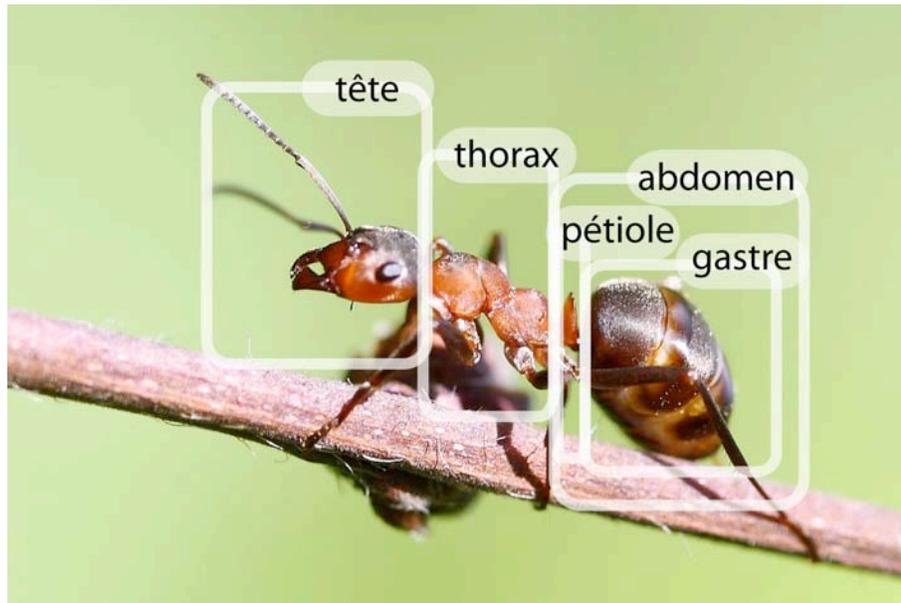


Figure 1.1. Quelques renseignements anatomiques sur la fourmi (ici, *formica polyctena*) - photo N. Monmarché

Par exemple, quand deux fourmis se rencontrent, elles s’inspectent à l’aide de leurs antennes. Elles peuvent ainsi se reconnaître comme familières ou étrangères et avoir le comportement adapté (voir figure 1.2). Les relations interindividuelles sont très développées, elles aiment se lécher réciproquement, comme les singes. La fourmi va aussi passer beaucoup de temps à sa toilette personnelle ; elle se nettoie les antennes et tout le corps avec ses pattes antérieures. Une autre particularité des insectes sociaux est le développement extraordinaire des échanges de nourriture de bouche à bouche. C’est ce que l’on appelle la trophallaxie. C’est un moyen simple de transporter les aliments liquides. En effet, la fourmi récolteuse stocke la nourriture liquide (par exemple le miellat de pucerons) dans son jabot. De retour au nid, elle peut la régurgiter (« la vomir ») à ses congénères restées dans le nid qui vont l’utiliser pour leur propre alimentation et aussi pour élever les larves. C’est pour cette raison que l’on qualifie le jabot d’estomac social.

Dans la colonie, les ouvrières n’ont pas toutes les mêmes occupations. Il existe une véritable répartition des tâches, ou division du travail. Elle est plus ou moins marquée selon les espèces, mais elle existe partout. Schématiquement, les jeunes ouvrières s’occupent du couvain et de la reine, puis progressivement des autres tâches à l’intérieur du nid (construction, nettoyage, défense, transferts de nourriture), et enfin sortent pour récolter la nourriture qu’elles rapportent au nid. En fait ce système

est très souple, il permet de s'adapter aux besoins de la colonie, par exemple si le taux de prédation des fourrageuses est très élevé, les jeunes fourmis vont sortir plus vite. Chez certaines espèces, il existe des castes différenciées anatomiquement, avec des ouvrières de grande taille (soldats) spécialisées dans la défense du nid. Cette organisation est l'une des causes du succès écologique des fourmis (toutes les fourmis envahissantes pratiquent ce recrutement de masse), cela permet par exemple d'exploiter rapidement une source de nourriture ou de mobiliser un grand nombre d'individus pour défendre le nid (voir figure 1.3).



Figure 1.2. Rencontre de deux fourmis (ici, *formica polyctena*) -
photo N. Monmarché

Une telle organisation sociale très sophistiquée ne pourrait fonctionner sans des mécanismes assurant la communication entre individus. Les fourmis utilisent trois types de communication : tactile par les antennes (voir figure 1.2), sonore par des stridulations, et chimique par de nombreuses odeurs. La vision est en général peu importante. La communication tactile intervient surtout pour inviter une congénère à suivre la piste vers une source de nourriture : la recruteuse tambourine la tête de l'autre fourmi pour la stimuler, on parle de comportement d'invitation. Lors de la trophallaxie, on assiste à un véritable ballet entre les antennes des deux fourmis : celle qui reçoit sollicite l'autre en lui balayant la tête ; la donneuse répond de la même manière. Elles s'informent sur leur état de satiété.



Figure 1.3. *Défendre la colonie est aussi une tâche collective (ici, formica rufa) - photo N. Monmarché*

C'est chez les insectes qu'ont été découvertes, dans les années 1960, les substances chimiques (phéromones) qui permettent à deux individus de la même espèce de communiquer. On dispose à l'heure actuelle de chromatographes en phase gazeuse couplés à un spectromètre de masse qui permettent d'analyser et d'identifier les substances constitutives d'une phéromone à des concentrations très faibles, de l'ordre du nanogramme (mais soyons modestes, les antennes des insectes ont une sensibilité colossale, à des concentrations que l'on ne sait pas détecter actuellement). Ces phéromones sont sécrétées par de très nombreuses glandes situées partout dans le corps qui est une véritable usine chimique : on connaît déjà 39 glandes chez les fourmis (voir figure 1.4) et plusieurs centaines de substances de catégories chimiques très variées. Elles interviennent dans toutes les activités de la colonie : l'agrégation, le marquage du territoire et de l'entrée du nid, la formation de pistes pour exploiter une source de nourriture ou déménager (changer de nid), le recrutement de congénères pour défendre la colonie (alarme et défense), l'appel sexuel, la reconnaissance de la reine, des autres membres de la colonie et même des cadavres.

Une autre particularité importante des sociétés d'insectes est qu'elles sont fermées : les individus étrangers à la colonie sont rejetés et parfois tués. On peut assister par exemple au printemps à de véritables « guerres » entre deux colonies voisines qui essaient de repousser leurs frontières au détriment de l'autre, avec de nombreux cadavres entre les deux zones. Certaines espèces tropicales comme les fourmis fileuses œcophylles vivent sur l'arbre qu'elles monopolisent complètement et défendent farouchement contre tout intrus. La fermeture des sociétés d'insectes s'inscrit dans le cadre théorique de la sélection de parentèle, élaboré par W.D. Hamilton [HAM 64a, HAM 64b]. En effet, selon la théorie de l'évolution darwinienne, un animal élève sa propre descendance dans le but de transmettre ses gènes. Or, chez les fourmis, les ouvrières stériles ne se reproduisent pas et élèvent leurs sœurs. On les qualifie d'altruistes. Mais cet altruisme est intéressé, elles transmettent indirectement leurs gènes. Alors, elles ne doivent pas élever des larves avec lesquelles elles n'ont pas de lien de parenté. Il faut que la colonie reste une entité fermée au niveau génétique. Même s'il y a de nombreux cas particuliers et diverses critiques, à l'heure actuelle, la théorie de sélection de parentèle reste un modèle heuristique très intéressant. Par quel mécanisme les fourmis se reconnaissent-elles quand elles se rencontrent et qu'elles échangent des battements antennaires ? Comme l'on pouvait s'en douter, elles se reconnaissent à l'odeur. L'odeur des fourmis est formée de substances très peu volatiles qui sont portées par la carapace de la fourmi et perçues par les antennes. Il s'agit essentiellement d'hydrocarbures qui sont des molécules simples dérivées de lipides, des chaînes de carbone et d'hydrogène. Chaque colonie a un bouquet « d'odeurs » qui la caractérise, composé souvent d'une cinquantaine, voire même d'une centaine de molécules différentes : c'est l'odeur coloniale. C'est un peu un abus de langage de parler d'odeur car cela se rapproche plutôt de la gustation, mais c'est entré dans le langage des myrmécologues. Ces substances sont fabriquées dans le corps par des cellules spécialisées. Chaque fourmi fabrique ses propres hydrocarbures en fonction de son patrimoine génétique, exactement comme les mammifères sécrètent des odeurs liées au complexe majeur d'histocompatibilité (CMH). Les hydrocarbures sont excrétés sur la cuticule, mais sont aussi stockés dans une glande de la tête, la glande post-pharyngienne, dont le contenu est versé avec les liquides régurgités pendant la trophallaxie. Ainsi l'odeur coloniale est-elle échangée constamment entre individus. Si l'on ajoute les léchages interindividuels très fréquents, on constate un brassage permanent et très important des odeurs individuelles. Cela aboutit à une odeur commune partagée entre tous les individus et caractéristique de la colonie. On parle de *gestalt* [DAH 98].

On peut se demander ensuite comment la fourmi s'identifie à sa colonie pour être capable de discriminer les autres. La jeune fourmi apprend, quand elle sort de son cocon, à reconnaître l'odeur de son nid, donc de ses sœurs et elle va mémoriser cette odeur pour toute sa vie. Cet apprentissage commence d'ailleurs parfois même à l'état larvaire. Bien sûr, il reste une flexibilité puisque l'odeur de la colonie change un peu en fonction de l'alimentation, des matériaux du nid ou de la composition en individus. La

fourmi doit en permanence ajuster l'odeur qu'elle porte avec celle des autres (*labels*), mais aussi l'image mentale qu'elle mémorise dans son cerveau que l'on appelle *template*. En fait, l'évolution a imaginé un processus très économique pour permettre la reconnaissance des congénères : il suffit d'apprendre et mémoriser en toute confiance l'odeur des congénères du nid [LEN 99] ! C'est ainsi que les fourmis amazones *Polyergus* esclavagistes vont faire des razzias de cocons dans les colonies de l'espèce hôte. Quand les jeunes ouvrières éclosent dans la colonie esclavagiste, elles s'imprègnent de l'odeur de leur colonie d'adoption et vont considérer les amazones comme leurs sœurs et travailler à leur service.

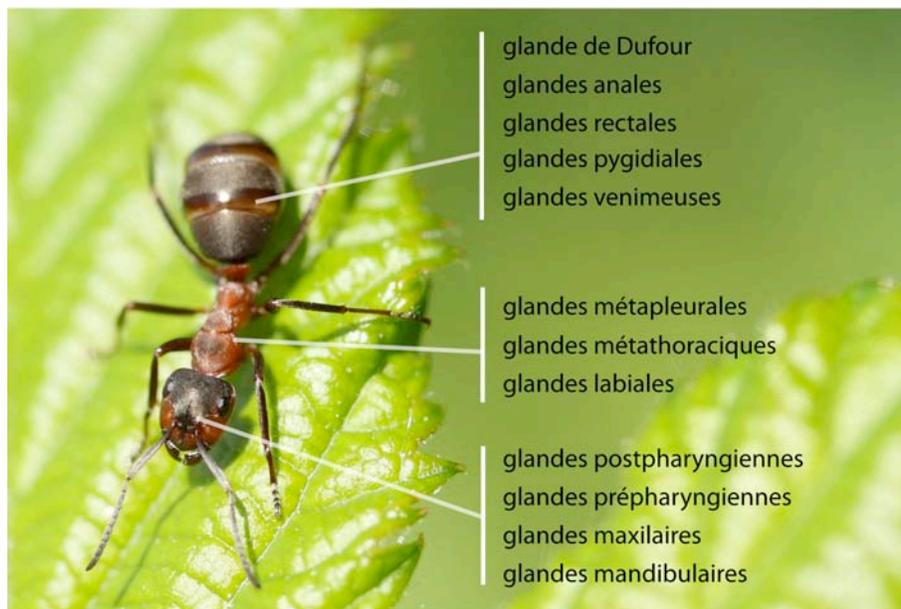


Figure 1.4. L'importance des glandes chez les fourmis - photo N. Monmarché

1.2. L'intelligence collective et l'auto-organisation

Lorsque l'on regarde un nid de fourmis, comme on l'a dit plus haut, cela grouille dans tous les sens ! A première vue, les comportements individuels sont fantaisistes et semblent indépendants. C'est une observation courante que de voir une fourmi tirer la charge dans le mauvais sens et il est impossible de prédire exactement ce qu'un individu va faire à un moment donné. Pourtant, ce fouillis apparent est remarquablement efficace : même si certains individus échouent, la tâche est accomplie, la grosse proie rentrée au nid, la brindille insérée correctement dans le dôme et la colonie fonctionne

de manière prévisible. Comment expliquer cela alors qu'il n'existe pas d'organe central donnant des ordres? En effet, la reine ne joue pas ce rôle, il n'y a ni *leader* ni despote. On peut marquer individuellement des ouvrières avec une pastille numérotée (ou des tâches de couleur), suivre leur activité dans un nid artificiel et les soumettre à diverses tâches. On s'aperçoit que certaines sont hyperactives, d'autres peu actives ou même totalement inactives, ces dernières représentent même la majorité. Tout se passe comme s'il y avait un volant important d'ouvrières inactives en attente de travail. On constate que la fourmi adapte son comportement aux besoins de la colonie, qui peuvent varier, et aussi en fonction de l'environnement. En dotant ainsi la fourmi d'un simple comportement d'adaptation de ses seuils de réponse à différents stimuli de son quotidien, celle-ci se spécialise, c'est-à-dire répond plus rapidement à un stimulus donné et accomplit l'action correspondante plus efficacement, et ceci d'autant plus que la colonie s'agrandit. Plus la colonie est importante, plus les besoins sont importants mais plus les fourmis se spécialisent et accomplissent certaines tâches très efficacement : ceci peut expliquer que, la taille de la colonie augmentant, la proportion de fourmis inactives augmente également. L'ensemble devient ainsi de plus en plus flexible et robuste, s'il faut beaucoup d'individus pour exploiter une source de nourriture importante, les réserves sont disponibles.

À partir des données d'observation, on peut construire des modèles pour essayer de simuler le fonctionnement des sociétés. Ce travail permet d'approfondir nos connaissances fondamentales sur les sociétés de fourmis. Un pas décisif a été franchi avec les modèles récents inspirés de la théorie de l'auto-organisation. L'auto-organisation correspond à un ensemble de processus décrits par I. Prigogine (Prix Nobel de chimie en 1977), au cours desquels des structures émergent au niveau collectif, à partir d'une multitude d'interactions entre individus, sans être codées explicitement au niveau individuel ([NIC 77] et voir par exemple [BON 97, CAM 01]).

Le concept d'auto-organisation permet d'expliquer, du moins de prédire, de nombreux phénomènes macroscopiques en définissant des règles comportementales au niveau microscopique. Dans la perspective scientifique habituelle, ces règles sont sélectionnées en respectant le principe de minimalité (le système le plus réduit/simple qui peut induire ou expliquer le phénomène est plébiscité). Un certain nombre de propriétés générales ont été dégagées de ces systèmes auto-organisés pour qu'il y ait des chances d'observer l'émergence d'une structure stable :

- la présence de deux types de renforcements : positif (*positive feedback*), qui induit l'amplification d'un phénomène, et négatif (*negative feedback*), qui contrebalance l'amplification et assure donc une stabilisation du phénomène ;
- l'amplification des fluctuations : les fluctuations sont la composante aléatoire du phénomène et l'amplification de certaines manifestations repose sur les mécanismes de renforcement ;
- la multitude des interactions : plus les interactions sont nombreuses, plus la stabilité des structures construites est forte.

Le phénomène observé macroscopiquement prend la forme d'une structure présentant une certaine stabilité spatio-temporelle, c'est-à-dire observable dans l'espace et/ou le temps, dont les manifestations chez les fourmis sont, par exemple, la construction de pistes, la construction du nid (creusement de galeries). Ces structures apparaissent dans un milieu plus ou moins homogène (la surface de la terre ou le sous-sol) et plusieurs états stables peuvent coexister (plusieurs chemins vers différentes sources de nourriture). Ces phénomènes auto-organisés présentent aussi parfois des bifurcations dans le comportement observé, notamment lorsque certains paramètres environnementaux sont modifiés : par exemple, l'évaporation des phéromones devenant plus importante à cause des conditions climatiques, les chemins qui ont été construits et qui représentent des structures stables peuvent subitement se disloquer.

La simplicité des entités considérées et participant à l'auto-organisation ne doit cependant pas dissimuler que la fourmi reste à son échelle une merveille de miniaturisation et d'autonomie (notamment lorsque l'on envisage de construire un robot présentant les mêmes capacités, voir chapitre 2 du volume 2 [URB 09]). En effet, les fourmis ne se comportent pas comme de simples molécules [DET 06] et leurs capacités individuelles, notamment cognitives, ne sont pas à négliger pour expliquer des comportements évolués, qu'ils soient collectifs ou individuels.

La suite de cette section donne quelques illustrations de modèles de comportement.

1.2.1. *Les pistes*

Comme on l'a vu, une fourmi qui découvre une source de nourriture importante dépose une trace de phéromone en rentrant au nid. La règle dans ce cas est très simple : les fourmis suivent la piste chimique et l'on observe une croissance exponentielle du nombre de fourmis sur cette source. D'un comportement simple individuel (le dépôt d'une gouttelette de phéromone et l'attraction pour un chemin marqué par de la phéromone), émerge un comportement collectif (le suivi de piste et le recrutement de masse). S'il y a plusieurs chemins possibles pour accéder à la nourriture, le chemin le plus court sera alors choisi collectivement sans aucune décision individuelle et perception individuelle de la distance, tout simplement parce que la piste la plus courte sera renforcée plus vite, comme cela a été observé chez la fourmi d'Argentine [DEN 90, GOS 89]. C'est un processus autocatalytique, les fourmis rentrant au nid choisissent et renforcent toujours davantage la piste la plus marquée (renforcement positif) jusqu'à ce que la source s'épuise ou que l'accès à la nourriture devienne trop embouteillé (renforcement négatif). Ces expériences sont maintenant classiques et sont décrites dans des manuels comme celui de M. Dorigo et T. Stützle [DOR 04] (voir également les chapitres 2 et 3 du présent ouvrage).

Une recherche récente montre aussi que les fourmis sont capables d'estimer le trafic sur une piste : quand la densité devient trop importante, elles choisissent le

chemin le moins embouteillé. Cela a été montré chez la petite fourmi noire des jardins, *Lasius niger*, par A. Dussutour [DUS 04]. Cette fourmi est capable de recrutement de masse et forme des pistes plus ou moins permanentes. Dès que la densité sur la piste atteint un certain seuil, une deuxième piste est formée avant que le trafic ne soit affecté, ce qui garantit une efficacité optimale.

Elles sont aussi capables d'ajuster le trafic à la largeur de la piste. Ce phénomène a été étudié, toujours chez *Lasius niger*, où l'on peut observer sur les pistes un trafic très important dans les deux sens. On a examiné les effets d'un goulot d'étranglement sur la piste. A. Dussutour [DUS 05] a réuni un nid de *Lasius* à une aire de fourragement à l'aide d'un pont. Deux types de pont ont été utilisés : avec ou sans goulot. Les fourmis arrivent à réguler leur trafic : avec les deux types de pont, le volume de trafic et la quantité totale de nourriture rapportée au nid restent identiques. Cela est possible, quand il y a un goulot d'étranglement, par une réorganisation temporelle du flux : quand la largeur de la voie décroît, les fourmis se répartissent en groupes alternant dans les deux sens (aller ou retour) comme s'il y avait un feu rouge virtuel. Cela limite le nombre de rencontres en face à face entre deux fourmis allant en sens contraire et permet la même durée de trajet. On peut imaginer que ce type de problème se pose sans arrêt dans les galeries des nids de fourmis ou de termites.

Ces capacités des fourmis réelles à résoudre des problèmes, comme trouver le meilleur chemin pour arriver à une source de nourriture, à l'aide de phéromones, a inspiré des algorithmes nombreux, par exemple à des chimistes pour élaborer des polymères [MAR 08]. Cependant, les pistes ne sont pas utiles qu'à la recherche de nourriture, par exemple chez les *Magnans* on observe une organisation particulière quand le nid est déplacé : les soldats surveillent et protègent la piste empruntée par les ouvrières (voir figure 1.5). Ainsi, la recherche d'un nouveau nid et le déplacement des colonies est un autre modèle pour comprendre les interactions entre décisions individuelles et collectives. N. Franks et son équipe à Bristol étudient depuis plusieurs années une toute petite fourmi qui vit dans les fissures de rochers (*Temnothorax albipennis*). Si l'on donne le choix entre deux sites possibles, l'un proche mais de mauvaise qualité, l'autre plus éloigné et sur la route du premier mais meilleur, le plus souvent les colonies commencent à émigrer simultanément vers les deux nids. Mais, un peu plus tard, elles redirigent tout le trafic exclusivement vers le meilleur nid. Un modèle a montré que ce choix minimise l'exposition aux risques liés au déménagement à l'air libre [FRA 08].

On peut enfin noter que certains travaux [ALT 05] ont montré qu'en situation de panique, les fourmis pouvaient perdre leur aptitude à distribuer équitablement la charge de trafic et ont tendance à s'engouffrer vers la sortie la plus engorgée (à l'image d'une foule entraînée par une seule sortie).



Figure 1.5. *Colonne de Magnans - photo A. Lenoir*

1.2.2. *Tri d'objets*

Une application particulière du tri d'objets est le transport et l'agrégation des cadavres, qui aboutissent à l'élaboration des fameux « cimetières » de fourmis observés par les anciens naturalistes qui n'hésitaient pas à dessiner les cadavres bien alignés. Les fourmis rejettent les cadavres hors du nid afin de réduire les risques d'infection dans la colonie et les regroupent dans un endroit éloigné. Lorsque l'on disperse au hasard des cadavres dans une arène expérimentale, en quelques heures, les fourmis vont les regrouper en petits tas. Il est possible de modéliser ce comportement en attribuant à chaque fourmi une probabilité d'exécuter une action, tout d'abord de saisir le cadavre rencontré, puis de le déposer dès qu'elle rencontre un autre cadavre. Cependant, il ne faut pas prendre un cadavre déjà déposé sur un tas. Pour résoudre ce problème, on introduit une nouvelle règle : plus le tas est gros, moins la fourmi aura tendance à prendre un cadavre et plus elle le déposera facilement. Le modèle permet de prédire qu'il existe une densité critique de cadavres en deçà de laquelle l'agrégation n'aura pas lieu : les tas n'ont pas le temps de se former [THE 02].

Un autre exemple de tri est le tri du couvain (figure 1.6). En effet, dans le nid, les divers éléments de couvain ne sont pas mélangés en vrac mais répartis dans des

chambres différentes selon leur âge. C'est ainsi que les œufs et petites larves sont entassés au centre du nid, les larves plus grosses dans des chambres périphériques. Les cocons sont régulièrement montés à la surface du nid pour être chauffés au soleil, ce qui accélère leur développement. Dans le modèle correspondant, les fourmis prennent et déposent tout élément de couvain en fonction du nombre d'items présents et de leur catégorie [DEN 91].



Figure 1.6. *Le couvain chez Lasius niger : les cocons de sexués et d'ouvrières sont séparés (ici sur la photo) et se trouvent dans des chambres différentes des larves et œufs - photo N. Monmarché*

Le chapitre 1 du volume 2 [HAM 09] donne des détails sur les modèles construits à partir de ces notions de tri d'objets par les fourmis, et notamment leurs utilisations en classification de données.

1.2.3. Activités de creusement du nid

Dans le cas du creusement du nid, les ouvrières dégagent les chambres du nid et rejettent les grains de sable en dehors de l'entrée du nid. C'est ce que l'on peut observer après une pluie quand la terre est meuble et plus facile à creuser. Le dépôt de centaines de charges conduit à la formation d'un cratère régulier. Comment cela est-il possible ? E.J.H. Robinson *et al.* ont étudié ce problème [ROB 07] : des règles simples permettent de le résoudre. La fourmi rejette la particule préférentiellement

au sommet du cratère vers la pente la plus douce depuis l'entrée du nid. D'autres règles simples, comme la mémoire de la direction des sorties précédentes, permettent d'affiner le modèle et un comportement régulier et prévisible émerge (voir figure 1.7).



Figure 1.7. *Cratères creusés après une pluie (Camponotus, Maroc) - photo A.Lenoir*

1.2.4. Agrégation d'individus

L'agrégation est une caractéristique de tous les animaux sociaux, mais elle est fondamentale pour les insectes sociaux qui ne peuvent survivre longtemps hors de leur colonie. Toutes les fourmis présentent, à divers degrés, cette attraction mutuelle qui permet l'agrégation [DEP 08].

La distribution spatiale des individus dans la colonie est déterminante pour l'efficacité de celle-ci, il faut être au bon endroit au bon moment. Les individus vont se regrouper en fonction des tâches comme le couvain ou la reine à soigner (voir la revue de [AND 02]). L'agrégation peut s'effectuer en fonction de repères physiques ou physico-chimiques dans le nid (par exemple, taille des chambres, humidité, luminosité, etc.). Des critères chimiques peuvent aussi intervenir. C'est ainsi que l'on a montré chez la blatte (qui n'est pas sociale comme les fourmis, mais grégaire, ce qui peut être considéré comme une forme basique de la socialité) que les individus reconnaissent l'odeur de leurs congénères et s'en servent pour se regrouper dans des abris

[RIV 98]. En l'occurrence, les odeurs sont aussi des hydrocarbures, comme chez les fourmis. Par exemple, chez *Lasius niger*, des traces de marquage colonial sur le sol favorisent l'agrégation [DEP 04a, DEP 04b]. Ce système de reconnaissance est donc apparu tôt dans l'évolution. On a même fabriqué des robots imprégnés de l'odeur des blattes qui arrivent à induire un regroupement des individus, les blattes sont leurrées et considèrent les robots comme des congénères [HAL 07].

1.2.5. Modélisation de l'odeur coloniale

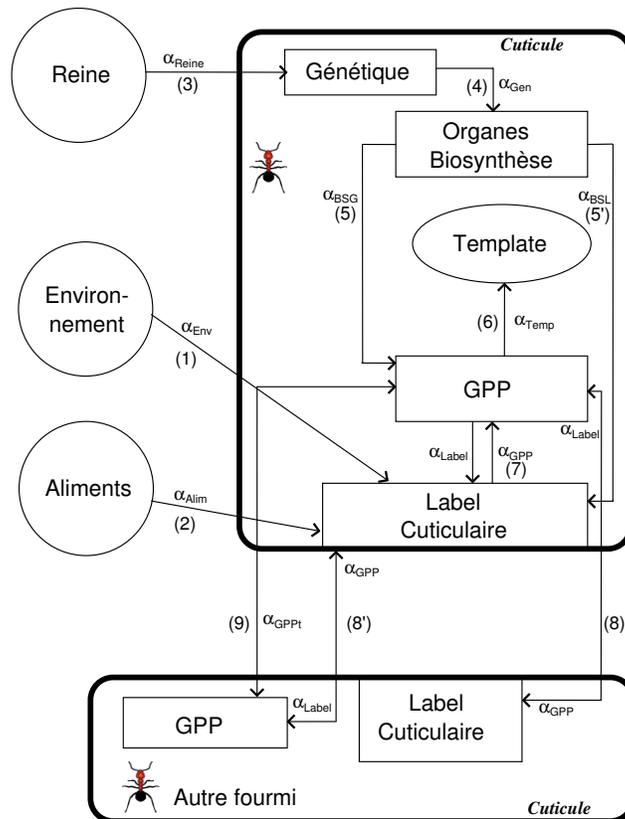


Figure 1.8. Schéma récapitulatif du modèle d'échange des odeurs

N. Labroche [LAB 02] a développé un simulateur virtuel de l'odeur coloniale des fourmis (*Virtual Ants Laboratory Simulator* : VALS) dont le schéma est présenté figure 1.8. Il représente une fourmi (encadré en haut à droite) avec les organes qui jouent un rôle dans la fermeture coloniale. Les interactions de la fourmi avec son environnement sont également représentées : les relations sociales avec les autres individus de

la colonie (une ouvrière et la reine), l'environnement physique de la fourmi, comme son alimentation ou l'odeur des matériaux du nid. Il a ainsi été possible de simuler l'évolution de l'odeur de colonies en faisant varier le poids respectif de l'environnement (la diète ou les matériaux du nid) et de la production propre de l'individu (facteurs génétiques). Ce modèle a été testé à partir de données expérimentales obtenues chez la fourmi champignoniste *Acromyrmex subterraneus subterraneus*, où la séparation entre groupes induit une divergence d'odeur, divergence accrue ou diminuée en fonction du régime alimentaire. Dans ce cas, la simulation aboutit à des résultats comparables aux données expérimentales.

1.3. Fourmis artificielles

Dans une troisième étape, la fourmi devient complètement virtuelle et n'a presque plus aucune caractéristique, du moins physique, d'une fourmi. C'est un agent artificiel. On a gardé le nom de fourmi par facilité et parce que la fourmi a inspiré les premiers informaticiens qui se sont intéressés à l'intelligence collective. Toutes les fourmis étant sociales, cela simplifie aussi le propos. Enfin, la fourmi reste plus populaire que le termite et son image – même fausse – de travailleuse infatigable correspond à ce que l'on peut attendre d'elle d'un point de vue informatique !

La programmation informatique moderne permet de faire fonctionner en parallèle divers « agents », par exemple des agents fourmis qui interagissent entre eux et avec leur environnement. Chaque agent répond en fonction d'une ou d'un petit nombre de règles simples, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des capacités cognitives élaborées. Les fourmis modélisées sont alors des agents réactifs et on parle alors d'intelligence en essaim [BON 99, BON 00]. Le terme « intelligence en essaim » a d'abord été utilisé dans le contexte des systèmes robotiques cellulaires (fin des années 1980), mais s'applique parfaitement à une gamme plus large de systèmes artificiels. La manifestation d'une intelligence collective s'observe par l'émergence ou l'apparition de structures temporelles et/ou spatiales issues d'interactions multiples et répétées, directes ou indirectes, entre des individus appartenant à une même colonie ou un même groupe. Cette définition n'est pas sans rappeler les phénomènes d'auto-organisation évoqués dans la section précédente. La notion d'intelligence collective intègre en plus l'adaptation du comportement dans les conditions environnementales données : l'intelligence peut être considérée comme une capacité à s'adapter et à survivre dans son environnement. Et, de ce point de vue, les fourmis sont bien placées car on peut trouver des fourmis à peu près partout sur la surface des terres émergées.

La fourmi artificielle peut prendre la forme d'un processus informatique, qui possède donc ses propres zones de mémoire et ses instructions de fonctionnement. L'implantation informatique des différents modèles précédemment présentés amène à des considérations nous éloignant des contraintes naturelles : discrétisation du temps et de l'espace, synchronisme/asynchronisme des actions. Malgré ces efforts, l'intérêt de la

modélisation et la simulation informatique pour le biologiste est évident : cela permet de tester des modèles facilement (par rapport à l'effort expérimental de manipuler de vraies fourmis), de chercher une explication à des phénomènes émergents ou de tester la capacité de prédiction d'un modèle.

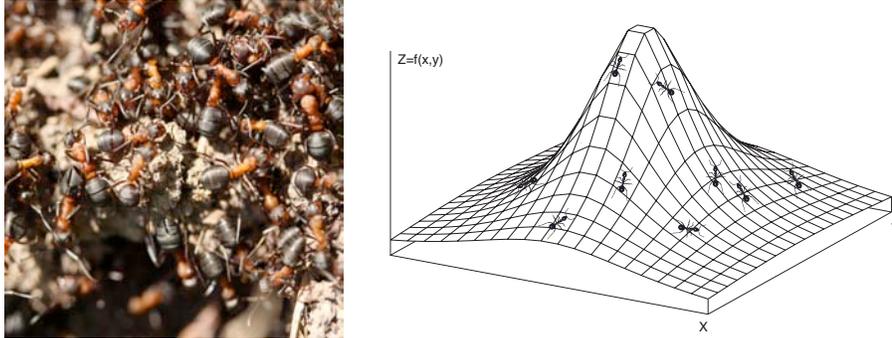


Figure 1.9. *Les fourmis réelles et artificielles partagent-elle le même espace de recherche ?*

Quand il s'agit de résoudre des problématiques « humaines », l'objet de la suite de cet ouvrage, la fourmi artificielle, va perdre encore de ce qui la rattachait à son modèle naturel. Par exemple, si cela suffit de considérer la fourmi comme un point dans un espace de recherche auquel on s'intéresse, on s'abstiendra bien de lui fournir des pattes, un thorax, des antennes, etc. Le lien entre le point et la vraie fourmi ne sera alors peut-être plus qu'une lointaine similitude dans la stratégie de déplacement du point et le modèle de comportement de la fourmi dans son environnement naturel.

Dans les chapitres de ce volume, mais aussi du volume 2, certains des modèles exposés précédemment seront repris et abordés dans le cadre d'une problématique précise : l'utilisation des pistes pour exploiter des sources de nourriture dans les problèmes modélisés par un graphe (chapitres 2 et 3 du volume 1), le tri d'objet et la modélisation de l'odeur coloniale dans les problèmes de classification (chapitre 1 du volume 2 [HAM 09]).

Enfin, nous avons commencé ce chapitre par le constat de la suprématie des fourmis dans les environnements naturels et nous pourrions tenter la même analyse dans le domaine des fourmis artificielles. C'est ainsi que, si l'on observe le nombre d'articles publiés dans des journaux ou conférences scientifiques dans les domaines de l'informatique, la robotique ou des mathématiques appliquées, on constate, même avec un relevé incomplet, une augmentation significative du nombre de publications abordant

la notion de fourmi artificielle (voir la figure 1.10, qui donne l'évolution du nombre de publications scientifiques abordant le thème des fourmis artificielles²).

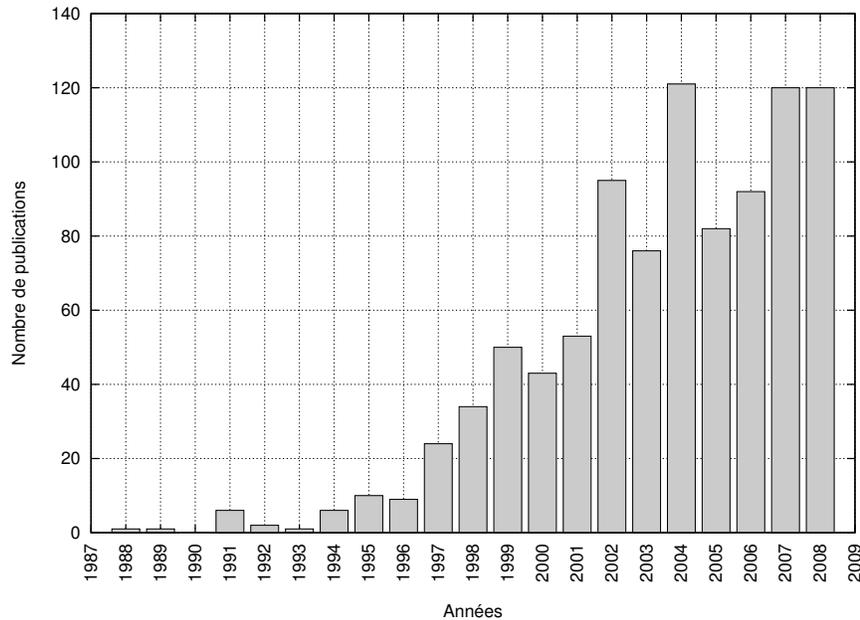


Figure 1.10. Evolution du nombre de publications repérées qui abordent le thème des fourmis artificielles

1.4. Bibliographie

- [ALT 05] ALTSHULER E., RAMOS O., NÚÑEZ Y., FERNÁNDEZ J., BATISTA-LEYVA A., NODA C., « Symmetry Breaking in Escaping Ants », *The American Naturalist*, vol. 166, n°6, p. 643–649, 2005.
- [AND 02] ANDERSON C., THERAULAZ G., DENEUBOURG J., « Self-assemblages in insect societies », *Insectes Sociaux*, vol. 49, p. 99–110, 2002.
- [BON 97] BONABEAU E., THERAULAZ G., DENEUBOURG J., ARON S., CAMAZINE S., « Self-organization in social insects », *Trends Ecol. Evol.*, vol. 12, p. 188–193, 1997.
- [BON 99] BONABEAU E., DORIGO M., THERAULAZ G., *Swarm Intelligence*, Oxford University Press, New York, 1999.

2. <http://www.hant.li.univ-tours.fr/artantbib/artantbib.php>

- [BON 00] BONABEAU E., THÉRAULAZ G., « L'intelligence en essaim », *Pour la Science*, p. 66–73, 2000.
- [CAM 01] CAMAZINE S., DENEUBOURG J.-L., FRANKS N. R., SNEYD J., THÉRAULAZ G., BONABEAU E., *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 2001.
- [DAH 98] DAHBI A., JAISON P., LENOIR A., HEFETZ A., « Comment les fourmis partagent leur odeur », *La Recherche*, p. 32–34, 1998.
- [DEN 90] DENEUBOURG J., ARON S., GOSS S., PASTEELS J., « The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant », *J. Insect Behav.*, vol. 3, p. 159–168, 1990.
- [DEN 91] DENEUBOURG J., GOSS S., FRANKS N., SENDOVA FRANKS A., DETRAIN C., CHRÉTIEN L., « The dynamics of collective sorting : robot-like ants and ant-like robots », MEYER J. A., WILSON E. O., Eds., *Simulations of animal behavior : from animals to animals*, Cambridge University Press, Cambridge, Mass., p. 356–365, 1991.
- [DEP 04a] DEPICKÈRE S., FRESNEAU D., DENEUBOURG J., « A basis for spatial and social patterns in ant species : dynamics and mechanisms of aggregation », *Journal of Insect Behavior*, vol. 17, p. 81–97, 2004.
- [DEP 04b] DEPICKÈRE S., FRESNEAU D., DETRAIN C., DENEUBOURG J., « Marking as a decision factor in the choice of new nesting site in *Lasius niger* », *Insectes Sociaux*, vol. 51, p. 243–246, 2004.
- [DEP 08] DEPICKÈRE S., RAMIREZ AVILA G.-M., FRESNEAU D., DENEUBOURG J., « Polymorphism : a weak influence on worker aggregation level in ants », *Ecological Entomology*, vol. 33, p. 225–231, 2008.
- [DET 06] DETRAIN C., DENEUBOURG J., « Self-organized structures in a superorganism : do ants "behave" like molecules ? », *Physics of Life Reviews*, vol. 3, p. 162–187, 2006.
- [DOR 04] DORIGO M., STÜTZLE T., *Ant Colony Optimization*, MIT Press, Cambridge, MA, 2004.
- [DUS 04] DUSSUTOUR A., FOURCASSIÉ V., HELBING D., DENEUBOURG J., « Optimal traffic organization in ants under crowded conditions », *Nature*, vol. 428, p. 70–73, 2004.
- [DUS 05] DUSSUTOUR A., DENEUBOURG J., FOURCASSIÉ V., « Temporal organization of bi-directional traffic in the ant *Lasius niger* (L.) », *The Journal of Experimental Biology*, vol. 208, p. 2903–2912, 2005.
- [FRA 08] FRANKS N., HARDCASTLE K. A., COLLINS S., SMITH F. D., SULLIVAN K. M. E., ROBINSON E. J. H., SENDOVA FRANKS A., « Can ants choose a far-and-away better nets over an in-the-way poor one ? », *Animal Behaviour*, vol. 75, n°2, p. 323–334, 2008.
- [GOS 89] GOSS S., ARON S., DENEUBOURG J., PASTEELS J., « Self-organized shortcuts in the Argentine ant », *Naturwissenschaften*, vol. 76, p. 579–581, 1989.
- [HAL 07] HALLOY J., SEMPO G., CAPRARI G., RIVAULT C., ASADPOUR M., TÂCHE F., SAÏD I., DURIER V., CANONGE S., AMÉ J. M., DETRAIN C., CORRELL N., MARTINOLLI A., MONDADA F., SIEGWART R., DENEUBOURG J., « Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices », *Science*, vol. 318, p. 1155–1158, 2007.

- [HAM 64a] HAMILTON W., « The genetical evolution of social behaviour I », *J. Theor. Biol.*, vol. 7, n°1-16, 1964.
- [HAM 64b] HAMILTON W., « The genetical evolution of social behaviour II », *J. Theor. Biol.*, vol. 7, p. 17–52, 1964.
- [HAM 09] HAMDY A., ANTOINE V., MONMARCHÉ N., ALIMI A., SLIMANE M., « Fourmis artificielles et classification automatique », MONMARCHÉ N., GUINAND F., SIARRY P., Eds., *Fourmis Artificielles, nouvelles directions pour une intelligence collective*, vol. 2 de *Traité IC2*, Chapitre 1, Hermès, Paris, 2009.
- [HÖL 90] HÖLLDOBLER B., WILSON E., *The Ants*, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1990.
- [KEL 06] KELLER L., GORDON E., *La vie des fourmis*, Odile Jacob, Paris, 2006.
- [LAB 02] LABROCHE N., RICHARD F.-J., MONMARCHÉ N., LENOIR A., VENTURINI G., « Modelling of the chemical recognition system of ants », HEMELRIJK C., Ed., *International Workshop on Self-Organization and Evolution of Social Behaviour*, Monte Verità, Ascona, Suisse, p. 283–292, 8-13 septembre 2002.
- [LEN 99] LENOIR A., FRESNEAU D., ERRARD C., HEFETZ A., « Individuality and colonial identity in ants : the emergence of the social representation concept », DETRAIN C., DENEUBOURG J., PASTEELS J., Eds., *Information Processing in Social Insects*, p. 219–237, Birkhäuser Verlag Basel, Suisse, 1999.
- [MAR 08] MARTINS B. V. C., BRUNETTO G., SATO F., COLUCI V. R., GALVÃO D., « Designing conducting polymers using bioinspired ant algorithms », *Chemical Physics Letters*, vol. 453, n°4-6, p. 290–295, 2008.
- [NIC 77] NICOLIS S. C. P. I., *Self-organization in non-equilibrium systems*, Wiley and Sons, New York, 1977.
- [PAS 05] PASSERA L., ARON S., *Les fourmis : comportement, organisation sociale et évolution*, Les Presses scientifiques du CNRC, Ottawa, 2005.
- [PAS 06] PASSERA L., *La véritable histoire des fourmis*, Fayard, Paris, 2006.
- [RIV 98] RIVAULT C., CLOAREC A., SRENG L., « Cuticular extracts inducing aggregation in the German cockroach, *Blattella germanica* », *Animal Behaviour*, vol. 55, p. 177–184, 1998.
- [ROB 07] ROBINSON E. J. H., HOLCOMBE M., RATNIEKS L. W. F., « The organization of soil disposal by ants », *Animal Behaviour*, vol. 75, p. 1389–1399, 2007.
- [THE 02] THERAULAZ G., BONABEAU E., NICOLIS S. C., SOLÉ R. V., FOURCASSIÉ V., BLANCO S., FOURNIER R., JOLY J., FERNANDEZ P., GRIMAL A., DALLE P., DENEUBOURG J., « Spatial patterns in ant colonies », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99, p. 9645–9649, 2002.
- [URB 09] URBANO P., MONMARCHÉ N., GAUCHER P., « Robotique collective et mobile inspirée par les insectes », MONMARCHÉ N., GUINAND F., SIARRY P., Eds., *Fourmis Artificielle, nouvelles directions pour une intelligence collective*, vol. 2 de *Traité IC2*, Chapitre 2, Hermès, Paris, 2009.

Index des noms propres

D

DORIGO, M. 31
DUSSUTOUR, A. 32

F

FRANKS, N. 32

H

HAMILTON, W.D. 28

L

LABROCHE, N. 36

P

PRIGOGINE, I. 30

R

ROBINSON, E.J.H. 34

S

STÜTZLE, T. 31

W

WERBER, B. 24

Index général

A

agent artificiel 37
agrégation 27, 33, 35
aire de fourragement 32
altruisme 28
amplification d'un phénomène 30
amplification des fluctuations 30
antenne 25, 26
apprentissage 28
auto-catalytique 31
auto-organisation 23, 30
autonomie 31

B

biomasse 24
blatte 35

C

caste 26
chromatographe en phase gazeuse 27
cocon 28, 34
communication 26
 chimique 26
 sonore 26
 tactile 26
complexe majeur d'histocompatibilité 28
comportement collectif 31
comportement d'adaptation 30
comportement d'invitation 26

conditions climatiques 31
construction de pistes 31
construction du nid 31
couvain 25, 35
cratère 34
creusement de galeries 31
creusement du nid 34
cuticule 24, 28

D

déménagement 32
déplacement des colonies 32
division du travail 25

E

émergence 30
estomac social 25
état larvaire 28
évaporation des phéromones 31
exosquelette 24

F

fermeture coloniale 36
fluctuations 30
forêt amazonienne 24
foule 32
fourmis
 Acromyrmex subterraneus
 subterraneus 37

amazone 24, 29
antenne 25, 26
cadavre 33
Camponotus 35
cimetière 33
couvain 33
d'Argentine 24, 31
distribution spatiale 35
division du travail 24
esclavagisme 24
esclavagiste 29
formica polyctena 25, 26
formica rufa 27
légionnaires 24
Lasius 32
Lasius niger 32, 34, 36
Magnans 32, 33
nomadisme 24
nombre d'espèces 24
Oecophylles 28
ouvrière 24
Polyergus 24, 29
reine 24
rousses 24
Temnothorax albipennis 32
toilette 25
trafic 31
vie sociale 24

G

galerie 32
gestalt 28
glande post-pharyngienne 28
goulot d'étranglement 32

H

hydrocarbure 28, 36

I

intelligence collective 37
intelligence en essaim 37
interactions entre individus 30

J

jabot 25

L

label 29
larve 34

M

marquage colonial 36
miniaturisation 31
modélisation 23
molécules 31
myrmécologue 23, 28

N

nid artificiel 30

O

odeur coloniale 28, 36
œufs 34
organisation sociale 26

P

panique 32
patrimoine génétique 28
phéromone 27, 31, 32
piste chimique 31
polymères 32
principe de minimalité 30
puceron 24, 25

R

répartition des tâches 25
reconnaissance 36
recrutement 27
recrutement de masse 31, 32
reine 35
renforcement 30
renforcement négatif 31
renforcement positif 30, 31
robot 31, 36

S

sélection de parentèle 28
seuil de réponse 30
soldat 26
spectromètre de masse 27

stabilité spatio-temporelle 31
stimulus 30
stridulations 26
suivi de piste 31
supercolonie 24
systèmes robotiques cellulaires 37

T

template 29
termite 32, 37
théorie de l'évolution darwinienne 28
théorie de sélection de parentèle 28
tri d'objets 33
tri du couvain 33
trophallaxie 25, 26, 28