

Recherche de chemin par dépôt de phéromones

Merwan Achibet – Université du Havre

Introduction

On se propose d'étudier l'implémentation NetLogo de José M. Vidal inspirée de *Synthetic Pheromone Mechanisms for Coordination of Unmanned Vehicles* de Parunak, Brueckner et Sauter. Dans un premier temps, on étudie le modèle original, puis on analyse l'implémentation fournie.

1 Le modèle

1.1 Analogie avec le vivant

Les fourmis sont des insectes reconnus pour leur caractère social. Seules, elles restent vulnérables à l'environnement immense les entourant. Pourtant, la coopération entre individus de la même colonie caractérisant cette espèce leur permet de compter parmi les êtres vivants les plus présents sur le globe terrestre.

Les fourmis communiquent par le biais de signaux chimiques que l'on peut assimiler à des odeurs, les phéromones [Pai]. Elles peuvent dialoguer d'individu à individu en utilisant leurs antennes mais, dans le contexte de la croissance de la fourmilière, il est plus efficace de déposer dans leur environnement des messages généraux adressés à tous. C'est notamment le cas lorsqu'une nouvelle source de nourriture est trouvée puisque la fourmi à l'origine de l'heureuse découverte déposera derrière elle des phéromones de piste afin que ses congénères puissent y être guidées. Plusieurs autres types de phéromones existent : certaines préviennent d'un danger tandis que d'autres délimitent un territoire ou bien, chez d'autres espèces, attirent les individus de sexe opposé en période de reproduction.

Les phéromones étant des signaux chimiques éphémères, un phénomène d'évaporation se produit naturellement et efface progressivement les pistes. Pour qu'une piste perdure, elle doit être entretenue par accumulation des phéromones des autres fourmis l'arpentant. Ainsi seules les meilleures pistes sont conservées tandis que les autres (sources de nourriture épuisées ou moins importantes) disparaissent par érosion. Un aspect important des phéromones est qu'elles sont soumises à une diffusion dans l'environnement et que les insectes disposent d'un odorat assez fin pour en retrouver la source. Ainsi, un individu peut détecter et être attiré par une odeur en passant à proximité d'une piste sans nécessairement la croiser.

Ce type de comportement est une source d'inspiration pour la conception de méthodes de résolution destinée à des systèmes multi-agents puisqu'il rassemble des qualités notables [Dor96] :

Diversité Une phéromone peut aussi bien indiquer une piste à suivre qu'un danger. Tout type de sémantique peut leur être associé.

Distribution Les signaux chimiques guidant les insectes sont répartis sur tout l'environnement.

Décentralisation Si une fourmi est mangée par un oiseau, cela n'impactera pas l'avenir de la fourmilière car l'individu manquant n'est qu'un rouage d'un mécanisme plus complexe et les signaux qu'il a déposés perdureront jusqu'à évaporation.

Dynamicité Les tracés se renforçant et s'évaporant continuellement, les insectes s'adaptent à tout changement impromptu de l'environnement.

Parunak *et al.* partent de ce constat, et s'inspirent des modèles existants [BDT99], pour proposer une méthode de guidage destinée aux véhicules non habités dans le cadre d'opérations militaires.

1.2 Les agents et leur monde

Ici, la fourmi est remplacée par un véhicule, un drone aérien dans l'exemple. Sa mission est de partir d'une base et d'atteindre un bâtiment ennemi cible tout en évitant certaines infrastructures pouvant l'impacter négativement (radars, batteries anti-aérienne). La figure 1 montre un exemple scénario possible.

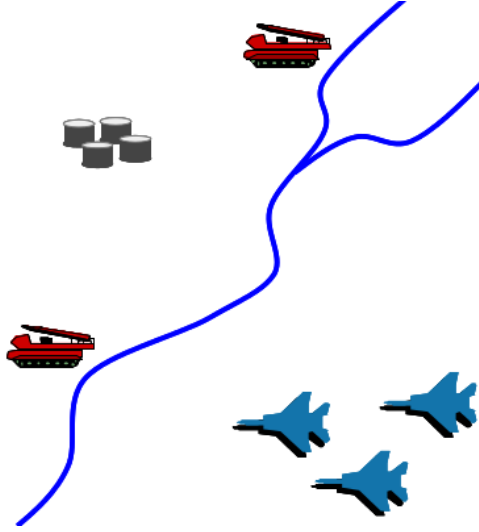


FIGURE 1 – Exemple de scénario. En bleu, les drones ; en gris, la cible ; en rouge les menaces [PBS02].

Tout d’abord, l’environnement est divisé en zones (*places*) dont les dimensions dépendent de la simulation envisagée. Dans l’exemple *SEADy Storm* proposé dans le papier étudié, une zone correspond à un hexagone de 50 kilomètres de diamètre. C’est sur ces zones que les quantités des différentes phéromones déposées par les acteurs de la simulation sont stockées et que le phénomène de diffusion se produit entre zones voisines.

L’acteur principal, le drone, peut déposer deux types de phéromones :

GNest Libérée par un agent venant de quitter la base. Elle guide les autres agents vers cette base.

GTarget Libérée par un agent venant de rencontrer une cible ennemie et rentrant à sa base. Elle guide les autres agents vers cette cible.

Dans ce modèle, les bâtiments ennemis sont eux aussi agents. Ils émettent les phéromones suivantes :

RTarget Libérée par les bâtiments cibles. Elle attire les drones.

RThreat Libérée par les bâtiments de contre-mesure. Elle repousse les drones.

Chacune de ces phéromones véhicule une information différente, mais au delà de leur sens, elles diffèrent de par leur taux de diffusion dans l’environnement. Pour les bâtiments ennemis, ce taux de diffusion dépend de l’aire

d'effet du bâtiment associé, et correspond concrètement à son rayon d'action : le rayon de détection pour un radar, la portée pour une batterie anti-aérienne. Le taux de diffusion des phéromones libérées par les drones doit quant à lui être finement mesuré pour que les pistes soient remarquées par les véhicules passant à proximité sans pour autant définir une route trop large et donc plus encline à empiéter sur les aires d'effet des bâtiments ennemis.

Le fonctionnement intrinsèque de ce modèle commence à s'esquisser. Les phéromones émises par les différents acteurs de la simulation vont tisser un canevas de signaux chimiques marquant l'environnement. Typiquement, les drones auront pour but de suivre une piste menant à un bâtiment cible tout en évitant les aires d'effet des bâtiments menaçants, puis à revenir jusqu'à une base. La figure 2 illustre la configuration de la figure 1 de ce point de vue.

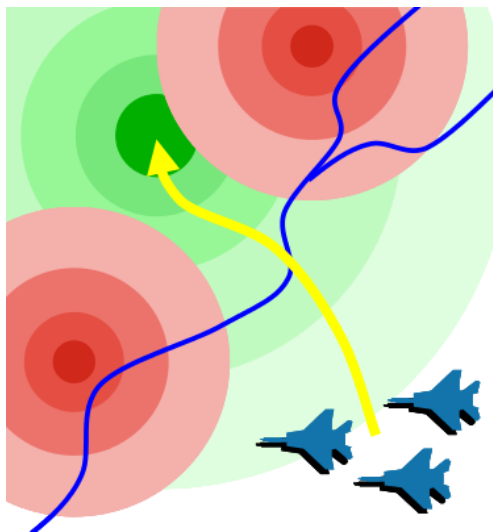


FIGURE 2 – Le même environnement, marqué par les phéromones des bâtiments ennemis [PBS02].

1.3 Guidage

Les phéromones décrites sont bien sûr spécifiques au modèle présenté et on peut aisément imaginer, selon la simulation, que l'on en introduise de nouveaux types. Dans un soucis de généralisme et de simplicité, on ne souhaite pas qu'un agent ait à envisager des considérations complexes prenant

en compte chaque phéromone séparément et on préfère associer aux zones une fonction g calculant une valeur d'attractivité nette afin de guider le déplacement des drones. Dans l'exemple proposé, cette fonction est la suivante, avec α , β , γ , δ et θ des facteurs de réglage et Dist une approximation de la distance séparant le drone de sa cible :

$$g = \frac{\theta \text{RTarget} + \gamma \text{GTarget} + \beta}{\alpha \text{RThreat} + \delta \text{Dist} + \beta} \quad (1)$$

Lorsqu'un véhicule se trouve dans une zone, il a accès aux quantités de phéromones présentes dans les zones voisines et un tirage aléatoire de type roue de la fortune biaisée permet de simuler un choix quant à la route à emprunter. Plus une zone est attractive (beaucoup de phéromones menant à la cible, peu de phéromones menant à une menace) et plus la probabilité d'y aller est élevée.

Généralement, et si le drone suit déjà une piste et qu'il est aligné sur sa direction, les zones les plus attrayantes se trouvent devant et derrière lui. Afin d'éviter qu'il ne change intempestivement de direction et prenne la piste à l'envers, son élan est pris en compte et la zone directement dans le sens de son déplacement bénéficie d'un bonus lors du tirage aléatoire.

Pour l'instant, seuls les agents mobiles de type drone ont été présentés. Il en existe pourtant une seconde catégorie, qui peuple en majorité l'espace de la simulation et que nous appelons les fantômes. Un fantôme est un drone virtuel à courte portée et à courte durée de vie, libéré par le véritable drone, et dont la principale caractéristique est de disposer d'une vitesse d'exploration plus importante. Les fantômes se comportent de la même façon que leur drone parent vis à vis des phéromones ; elles servent à leur guidage et ils les déposent sur leur chemin. Ils font ainsi office d'éclaireurs et améliorent les choix de déplacement du véritable drone en évaluant par avance les choix qui s'offriront à lui dans un futur proche (voir figure 3).

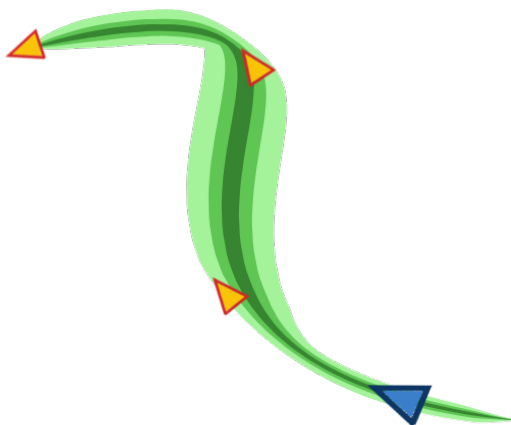


FIGURE 3 – Un drone (en bleu) suit une piste de phéromones (en vert) déposée et renforcée par ses fantômes (en orange).

Le concept des fantômes est une différence majeure entre la méthode proposée et un algorithme de colonies de fourmis classique. Il est bien sûr plus adapté au cadre opérationnel décrit, car l'action d'un drone doit être rapide et efficace. En effet, on imagine mal que le travail d'exploration de tout l'espace aérien lui revienne. L'utilisation d'éclaireurs, plus rapides et de plus petite taille, est donc justifiée.

2 L'implémentation

2.1 Étude

L'implémentation de Vidal est basée sur une grille torique de *patches* carrés alors que l'implémentation originale utilisait des hexagones. Cette différence est négligeable au niveau des résultats que fournit cette simulation car Parunak *et al.* précisent que la configuration du terrain et des blocs le formant, ainsi que leurs dimensions, peuvent varier librement.

Chaque *patch* contient une valeur réelle représentant le volume de chacune des phéromones qu'il contient. La diffusion de ces signaux chimiques se fait

par la fonction NetLogo `diffuse` qui partage une fraction de la phéromone entre les huit zones adjacentes. L'évaporation est réalisée manuellement et la valeur de chaque phéromone est réduite à chaque itération d'un pourcentage réglable. Un exemple d'environnement est visible sur la figure 4 ; chaque vue correspond à l'isolation d'une phéromone.

La simulation comprend un unique drone physique et se termine lorsque ce dernier atteint une des cibles. Ce véhicule ayant ici pour unique but de toucher l'objectif, il ne fait que se déplacer de *patch* en *patch* en utilisant comme heuristique la quantité de phéromone GTarget (menant à une cible) des cases voisines, via la fonction NetLogo `uphill`. L'équation 1 n'est donc pas utilisée. En conséquence, le drone se dirige vers les cibles sans prêter attention aux menaces ennemies, l'intérêt de la simulation en est donc fortement réduit puisque l'évitement des obstacles est l'un des principaux atouts du modèle.

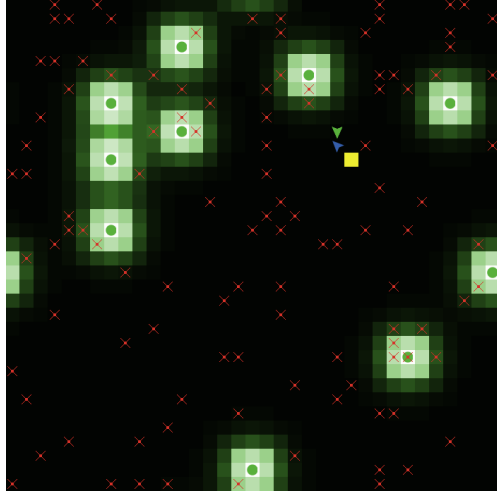
On retrouve dans cette implémentation le fait que les fantômes disposent d'une vitesse plus élevée que leur drone parent afin d'explorer en avance l'espace de la simulation. Ici, une itération de la simulation correspond à un unique déplacement de fantôme. Le véritable drone se déplace tous les n pas de fantômes (n est réglable par l'utilisateur).

Les fantômes sont instanciés par le drone principal dès le début de la simulation. À chaque fois qu'un fantôme est arrivé à la fin de sa durée de vie, il disparaît et un nouveau est ajouté à la position du drone. Un fantôme passe par deux modes :

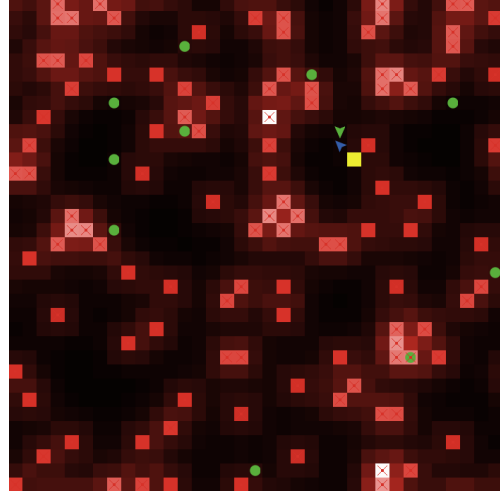
to-target Il se dirige vers une cible en suivant les phéromones de type RTarget (libérées par les cibles) et lâche des phéromones de type GNest (menant à la base). Les déplacements se font de la même façon que pour les drones physiques, via `uphill`. La formule 1 n'est toujours pas utilisée. Il passe au mode suivant quand une cible est atteinte.

to-home Il revient à la base en suivant les phéromones de type GNest et libère des phéromones de type GTarget menant à la dernière cible visitée.

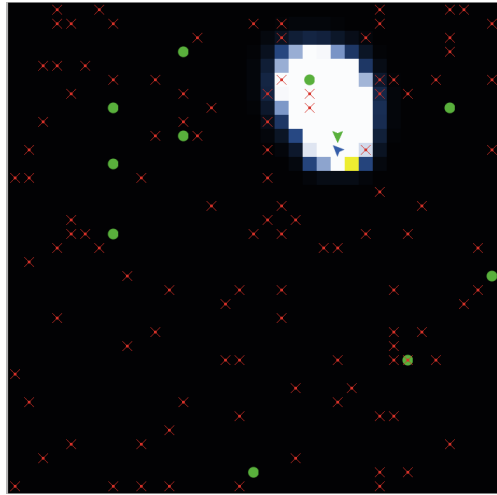
On remarque que **to-target** est le mode initial d'un fantôme. La phéromone déposée pendant cet état guide donc en fait vers leur position de naissance et non vers une véritable base physique (zone d'atterrissage par exemple). Cette position de naissance correspond en fait à la position de leur drone parent puisque les fantômes sont plus rapides et il est donc possible qu'ils atteignent une cible puis repassent par la position du drone parent avant même que ce



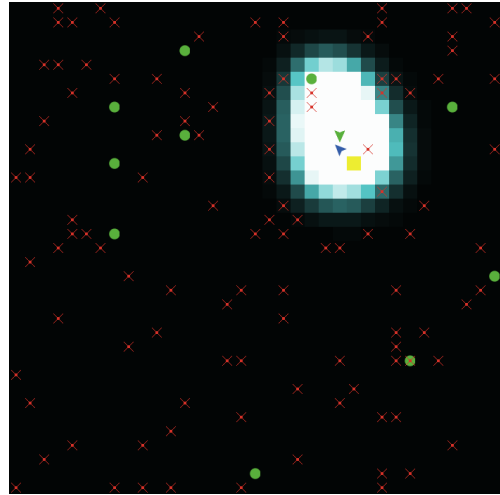
(b) RTarget



(c) RThreat



(e) GTarget



(f) GNest

FIGURE 4 – Les quatre types de phéromone pour un scénario donnée (drone en vert, fantômes en bleu, cibles en vert et menaces en rouge).

dernier ne se soit déplacé. Ce choix peut être justifié par le fait que dans une situation réelle, les fantômes pourraient correspondre à de minuscules appareils utilisant leur drone parent, un véhicule plus imposant, comme base mobile.

2.2 Analyse

Les facteurs que l'utilisateur peut contrôler sont :

- Le nombre de cibles
- Le nombre de menaces
- Le taux de diffusion des phéromones
- Le taux d'évaporation des phéromones
- Le nombre de fantômes
- La durée de vie d'un fantôme
- La vitesse des fantômes par rapport au drone

On remarque que le taux de diffusion ainsi que le taux d'évaporation est commun à toutes les phéromones, contrairement au modèle original qui supporte les phéromones disposant de dynamiques différentes.

Comme suggéré précédemment, cette implémentation n'est pas assez fidèle au modèle original pour que les résultats soient significatifs. Le principal défaut étant un guidage simplifié ne prenant pas en compte les obstacles à éviter.

On peut néanmoins faire varier quelques paramètres et remarquer plusieurs résultats. Premièrement, on note qu'un grand nombre de fantômes diminue la durée de la recherche car plus de chemins sont explorés et plus vite les pistes prometteuses sont renforcées. Attention cependant à ne pas surcharger de fantômes l'environnement, au risque de créer trop de pistes de phéromones et de noyer les plus intéressantes dans la masse.

On observe aussi qu'un taux de diffusion mal adapté peut grandement perturber la simulation. S'il est trop faible, les pistes restent linéaires et étroites et une fois qu'un fantôme en croise une, il la suit sans en ressortir (notamment à cause de l'utilisation stricte de `uphill` à la place de la formule 1). À l'inverse, un taux de diffusion trop élevé inonde l'environnement de phéromones et les drones errent sans qu'aucun chemin n'émerge.

De la même façon, le taux d'évaporation est à contrôler. S'il est trop faible, les pistes ne persistent pas et le drone et les fantômes n'ont pas le temps de les suivre. S'il est trop élevé, les pistes perdurent trop longtemps, même si elles sont de mauvaise qualité, et induisent les drones en erreur.

2.3 Nouvelle version

Comme montré précédemment, le défaut principal de cette implémentation est dû au fait que `uphill GTarget` est utilisé pour suivre les dépôts de phéromone et s'approcher d'une cible. En conséquence, le chemin est forcément le plus court (une ligne droite) mais il passe indifféremment sur des zones gardées ou non. On choisit de modifier le programme NetLogo afin d'obtenir des résultats plus fidèles à ceux du papier original.

Le cœur du script est conservé. On ajoute uniquement à chaque *patch* un nouveau type de phéromone : la phéromone nette calculée à l'aide de la fonction g (voir équation 1). Elle est mise à jour pour toutes les zones après chaque itération de la simulation.

Pour guider un agent mobile, on procède comme suit :

1. On obtient la valeur de la phéromone nette de chacune des huit zones voisines à celle de l'agent
2. On effectue un tirage aléatoire sur une roue de la fortune dont les huit tranches sont biaisées en fonction de la valeur d'attractivité de chaque case associée
3. On déplace l'agent sur la zone gagnante

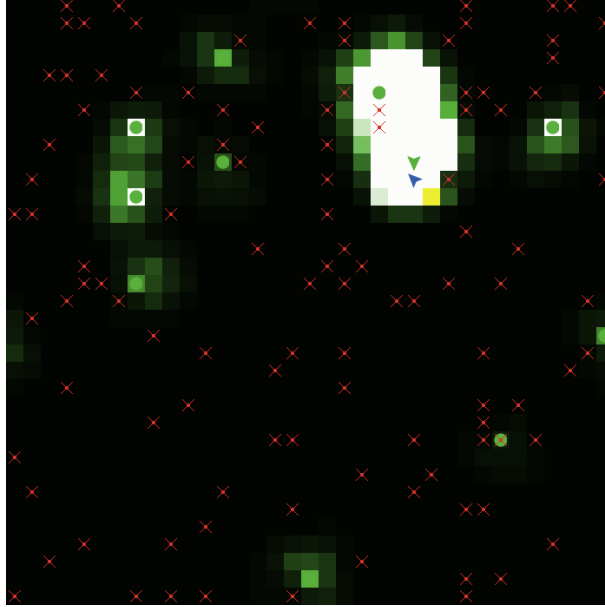
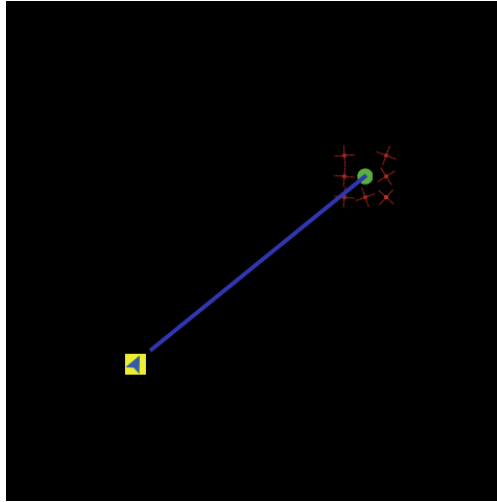


FIGURE 5 – Pheromone nette traduisant l’attractivité des zones de l’environnement.

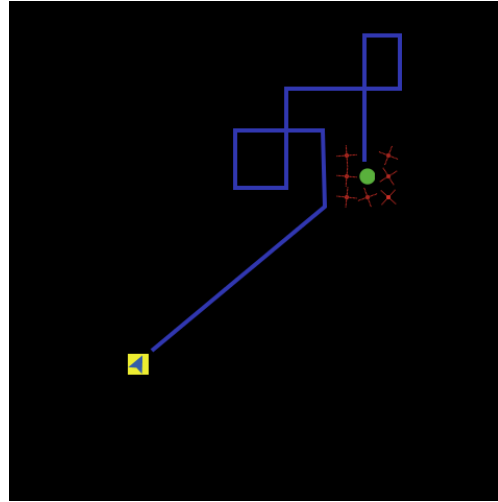
La phéromone nette calculées traduit l’attractivité de chaque zone (voir la figure 5 et comparer avec la figure 4) et le comportement des drones dépendra des facteurs utilisés. Si l’on prend α grand, alors on s’assure que la probabilité qu’un drone passe sur une zone à risque reste faible. Attention cependant à ne pas donner une trop grande valeur à ce facteur, sous peine d’amplifier de façon démesurée la répulsivité des bâtiments menaçants et d’empêcher les drones de se déplacer à travers certaines configuration de l’espace (couloir délimité par des menaces, par exemple).

Pour affiner le guidage du véhicule, on prendra $\gamma > \theta$. Pour rappel, γ est le facteur associé à la phéromone GTarget libérée par les fantômes et menant à une cible tandis que θ est le facteur associé à RTarget, la phéromone libérée par les bâtiments cibles. En faisant ce choix, on s’assure de favoriser les pistes construites par les fantômes plutôt que les pistes directes, plus piégeuses et pouvant mener à des dangers.

Drones et fantômes atteignent désormais leur but tout en évitant les menaces ennemies. La différence de guidage entre les deux versions du programme est visible sur la figure 6.



(b) Implémentation de José M. Vidal



(c) Nouvelle implémentation

FIGURE 6 – Chemins parcourus par le drone pour les deux versions différentes du programme. En rouge, les menaces à éviter ; en vert, la cible.

Références

- [BDT99] Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm Intelligence : from Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 1999.
- [Dor96] Marco Dorigo. *The Ant System : Optimization by a colony of co-operating agents*. PhD thesis, Politecnico di Milano, 1996.
- [Pai] Janine Pain. Les phéromones d’insectes, 30 ans de recherche. *Insectes*, (69).
- [PBS02] H. Van Dyke Parunak, Sven Brueckner, and John Sauter. Synthetic pheromone mechanisms for coordination of unmanned vehicles. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*, 2002.