



HAL
open science

Contribution à la résolution collective de problème (Modèles d'auto-organisation par interactions directes et indirectes dans les SMA réactifs et robotiques)

Olivier Simonin

► **To cite this version:**

Olivier Simonin. Contribution à la résolution collective de problème (Modèles d'auto-organisation par interactions directes et indirectes dans les SMA réactifs et robotiques). Autre [cs.OH]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010. tel-00546300

HAL Id: tel-00546300

<https://theses.hal.science/tel-00546300>

Submitted on 14 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à la résolution collective de problème **Modèles d'auto-organisation par interactions directes** **et indirectes dans les SMA réactifs et robotiques**

Mémoire présenté et soutenu publiquement le 10 décembre 2010

pour l'obtention de l'

Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Henri Poincaré
(spécialité informatique)

par

Olivier SIMONIN

Composition du jury

Rapporteurs : Jean-Louis Deneubourg, Professeur-chercheur à l'Université Libre de Bruxelles
René Mandiau, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes
H. Van Parunak, PhD. Chief Scientist, Vector Research Center, Ann Arbor, USA

Examineurs : François Charpillet, Directeur de Recherche INRIA, LORIA, Nancy
Jacques Ferber, Professeur, LIRMM, Université Montpellier 2
Jean-Paul Haton, Professeur, LORIA, Université Henri Poincaré, Nancy
Abderrafaa Koukam, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Marc Schoenauer, Directeur de Recherche INRIA, LRI, Saclay

Resumé

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches présente les principales activités de recherche que j'ai menées depuis 2002 en tant que Maître de Conférences, tout d'abord à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, jusqu'en 2006, puis à l'Université Henri Poincaré dans l'équipe Maia au LORIA. Ce mémoire synthétise une partie de mes contributions au domaine de la résolution collective de problème, en informatique et en robotique. Il s'agit d'une approche inspirée du vivant, reposant sur les interactions d'un grand nombre d'agents simples entre eux et avec leur environnement, capable de faire émerger des structures ou des organisations constituant des solutions à des problèmes donnés. Cette approche est connue pour générer des solutions robustes et auto-adaptatives aux conditions variables et inconnues de l'environnement ou du système. La principale motivation de ces travaux est de modéliser ces comportements d'auto-organisation pour mieux les comprendre et les utiliser dans la définition de processus de résolution de problème ou de contrôle de flottilles de robots. Dans ce cadre, le mémoire présente les recherches menées selon deux approches possibles des interactions entre agents. Dans un premier temps, nous considérons des interactions directes entre agents ou robots, essentiellement par signaux/perceptions, et montrons comment la coordination réactive peut être efficace pour la résolution de problèmes spatiaux, ainsi que pour la navigation en formation. Dans un deuxième temps, nous examinons des modèles de coopération indirecte, c'est-à-dire fondés sur le marquage et la lecture d'informations dans l'environnement. Nous focalisons sur l'étude des processus d'auto-organisation engendrés par ce principe, puis examinons des approches pour leur implémentation réelle et robotique. Enfin, le mémoire présente mes perspectives de recherche en détaillant des pistes pour la définition d'une approche générique de résolution collective de problème fondée sur la construction de champs dynamiques dans l'environnement, et pour son déploiement en robotique dans des environnements réels et large échelle.

“Elephants don’t Play Chess”¹

Rodney A. BROOKS.

“L’expérience est la source unique de la vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau.”

Henri POINCARÉ,
Les hypothèses en physique.

¹“interacting with the physical world is far more difficult than symbolically reasoning about it” [21]

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction générale | 9 |
| 1.1 | Positionnement scientifique | 9 |
| 1.1.1 | Evolution de l'Intelligence Artificielle (IA) | 9 |
| 1.1.2 | Les Systèmes Multi-Agents | 10 |
| 1.1.3 | Robotique et intelligence collective | 11 |
| 1.1.4 | Vers des essaims de robots | 11 |
| 1.2 | Articulation des recherches, des encadrements et des collaborations | 12 |
| 1.3 | Plan du mémoire | 14 |
| I | Résolution par coordination spatiale émergente | 15 |
| 2 | Modèles d'inspiration physique | 17 |
| 2.1 | Retour sur le modèle satisfaction-altruisme | 17 |
| 2.1.1 | Combiner intelligence individuelle et collective | 17 |
| 2.1.2 | Résumé des apports de la thèse | 17 |
| 2.1.3 | Résolution par champs de forces | 19 |
| 2.1.4 | Evolution et impact du modèle après la thèse | 19 |
| 2.2 | Problèmes de positionnement | 20 |
| 2.2.1 | Formalisation du problème | 21 |
| 2.2.2 | Analyse de l'approche proposée | 22 |
| 2.2.3 | Résumé des apports du modèle | 23 |
| 2.2.4 | Positionnement dynamique | 24 |
| 2.3 | Vers une méthodologie de conception | 26 |
| 3 | De la coordination multi-robot aux véhicules intelligents | 29 |
| 3.1 | Coordination Multi-Robot | 29 |
| 3.1.1 | Introduction | 29 |
| 3.1.2 | Robots footballeurs | 30 |
| 3.1.3 | Du box-pushing au robot-pushing | 31 |
| 3.2 | Coordination de véhicules | 34 |
| 3.2.1 | Platooning décentralisé | 34 |
| 3.2.2 | Croisement sans arrêt de deux platoons | 35 |
| 3.2.3 | Phénomènes émergents dans les réseaux de transport | 36 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| II | Résolution par marquage de l'environnement | 39 |
| 4 | Construction collective | 41 |
| 4.1 | Enjeux de la stigmergie digitale | 41 |
| 4.2 | Champs de potentiels et foraging collectifs | 42 |
| 5 | Phéromones et auto-organisation | 47 |
| 5.1 | Diffusion et émergence multi-niveaux | 47 |
| 5.2 | Le modèle EVAP : évaporation et auto-organisation | 48 |
| 5.2.1 | Un modèle pour la patrouille multi-agent | 48 |
| 5.2.2 | Auto-organisation en cycles | 51 |
| 5.2.3 | Applications | 54 |
| 6 | Implémentation et déploiement des modèles | 57 |
| 6.1 | Problématique | 57 |
| 6.2 | Implémentation des SMA réactifs par automates cellulaires | 58 |
| 6.3 | Vers des environnements actifs réels | 60 |
| 6.3.1 | Enjeux et verrous | 60 |
| 6.3.2 | Dalles intelligentes | 61 |
| 6.3.3 | Conclusion | 62 |
| III | Perspectives | 63 |
| 7 | Perspectives de recherche | 65 |
| 7.1 | Positionnement scientifique | 65 |
| 7.2 | Modèles d'organisation et de résolution par champs dynamiques | 68 |
| 7.3 | Problème du passage au réel : contrôle d'essaims de robots | 70 |
| 7.4 | Vers une intelligence située | 72 |
| 7.5 | Résumé des objectifs | 74 |
| 8 | Bibliographie | 75 |

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Positionnement scientifique

1.1.1 Evolution de l'Intelligence Artificielle (IA)

L'IA a produit au cours des dernières décennies différentes approches, que l'on classe habituellement en quelques grandes catégories : symbolique (logique, représentation des connaissances), neuro-computationnelle, évolutionnaire et approche sub-symbolique ou bio-inspirée.

C'est dans cette dernière approche, sub-symbolique ou bio-inspirée, que se situent nos travaux. Elle repose davantage sur une interprétation immédiate des perceptions du monde que sur une capacité à le représenter symboliquement pour raisonner *a posteriori* dessus. Cette démarche, amorcée dans les années 80, repose sur plusieurs constats :

- L'approche symbolique n'est pas adaptée à la représentation des problèmes ancrés dans le réel (environnements continus, informations bruitées, incomplètes et sous forme de signaux). En particulier, les systèmes experts ne permettent pas de développer des comportements adaptatifs.
- Les systèmes et les problèmes ne cessent de croître en complexité et d'être distribués sur des réseaux (machines, robots, Web).
- Les systèmes intelligents sont plongés dans le réel et dans l'interaction avec l'humain : évolution de la robotique vers des systèmes multi-robots et humanoïdes, des habitats intelligents, des réseaux de capteurs, etc.

Ainsi, les travaux fondateurs de Marvin Minski dans les années 80, synthétisés dans son livre "La société de l'esprit" (1988), déboucheront sur un concept majeur de l'IA moderne : l'intelligence humaine est organisée en une multitude de capacités élémentaires en interactions, leur organisation résultant d'expériences sans fin entre l'individu et son environnement. Minski emploie alors le terme d'agent pour conceptualiser sa vision de ces capacités élémentaires.

Au même moment, une autre révolution va bouleverser l'IA distribuée, l'intelligence n'est pas uniquement individuelle mais également collective, comme vont le montrer des chercheurs en informatique et en éthologie (eg. ¹, ²), provoquant l'établissement du domaine des Systèmes Multi-Agents (SMA).

¹Deneubourg J.L. & Goss S., Collective patterns and decision-making. *Ethology, Ecology & Evolution*, 1, 295-311., 1989

²Steels L., Cooperation between distributed agents through self-organization. In : Demazeau, Y. and Muller, J.-P. (eds) *Decentralized A.I. Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, pp. 175-196, Amsterdam : Elsevier Science Publishers (North-Holland), 1990

1.1.2 Les Systèmes Multi-Agents

Le domaine des SMA se met en place au début des années 90, en focalisant sur la problématique de l'interaction entre de nombreux agents autonomes. Les questions centrales étant : comment résoudre un problème de façon décentralisée, comment programmer des agents coopératifs, comment faire émerger une organisation performante ? En 1995, J. Ferber propose un livre³ aujourd'hui célèbre, où il classe les différents types de SMA, en particulier selon que l'on considère des agents réactifs ou délibératifs, ainsi que les enjeux de leur conception et de leur maîtrise dans le cadre de l'informatique et de la robotique. Ce besoin de clarification est en effet nécessaire car les systèmes multi-agents s'apparentent plus à un paradigme de modélisation capable d'englober l'ensemble des systèmes, qu'à un modèle formel ou mathématique (comme les automates cellulaires par exemple). Ainsi le domaine des SMA se subdivise en plusieurs catégories (ou écoles) :

- SMA délibératif vs. réactif : les premiers sont composés d'un faible nombre d'agents capables d'établir une représentation du monde et de raisonner dessus (il s'agit d'une réintégration de l'approche symbolique de l'IA dans le paradigme SMA), les seconds reposent sur des systèmes composés d'un grand nombre d'agents simples (réagissant à des stimuli) capables seulement d'interaction locale avec leur environnement.
- Communications directes vs. indirectes : dans le premier cas les agents utilisent un moyen de communication de haut niveau (protocole, langage commun), dans le second ils interprètent des signaux ou des marques inscrites dans l'environnement par les autres.
- Organisationnel vs. émergent : la première approche est qualifiée de top-down car le concepteur du système pré-établit les rôles des agents ou bien un agent les distribue en ligne (ce qui revient à centraliser le système), le second est bottom-up, il fait l'hypothèse que l'organisation émergera des interactions, sans aucun contrôle extérieur.

Ces trois aspects divisent clairement les SMA en deux grandes catégories : les SMA délibératifs (ou communicants) et les systèmes réactifs (ou collectifs). Aujourd'hui la question de l'hybridation se pose car chacune des approches offre des avantages (cf. [46]). Depuis mes travaux de thèse, nous nous sommes positionnés dans l'étude des SMA réactifs, où les questions centrales sont :

- Quels sont les mécanismes permettant l'émergence d'une propriété globale dans un système collectif ?
- Comment programmer un SMA réactif pour résoudre par émergence un problème donné ?
- Comment intégrer ces concepts/mécanismes dans la définition de systèmes ou robots intelligents ?

Le succès dans les années 90 de plusieurs méta-heuristiques inspirées des techniques collectives des insectes sociaux (Eco-résolution⁴, ACO⁵) provoque l'intérêt pour ces approches dans les domaines de la robotique mobile, mais aussi de la modélisation des systèmes complexes. Nous reviendrons sur ce dernier point dans les perspectives de recherche au Chapitre 7. Nous examinons maintenant l'expression de ces questions dans le cadre de la robotique.

³Ferber J., Les Systèmes Multi-agents, vers une intelligence collective, InterEditions, 1995 (1999 en anglais)

⁴Ferber J., Jacopin E., The Framework of Eco Problem Solving, Proceedings of Decentralized Artificial Intelligence (vol II), Y. Demazeau & J.-P. Müller (Eds), North Holland, 1991.

⁵Dorigo M., Maniezzo V., et Colonna A., Ant system : optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B , volume 26, numéro 1, pages 29-41, 1996.

1.1.3 Robotique et intelligence collective

En parallèle à ces changements de paradigmes en IA, la robotique subit également des évolutions. En particulier, dans les années 90, les systèmes multi-robots sont envisagés comme une solution plus souple et robuste qu'un seul robot omnipotent. On envisage également de doter les robots de capacités d'apprentissage et d'auto-adaptation, afin de traiter des tâches d'exploration, de robot rescue, de surveillance et de transport.

Ainsi, ces questions amènent des chercheurs à tester les principes de l'intelligence en essaim avec des robots mobiles autonomes. R. Brooks, M. Mataric et R. Arkin aux Etats Unis, ainsi que L. Steels et A. Drogoul en Europe démontrent la faisabilité et la robustesse de systèmes multi-robots inspirés des techniques d'auto-organisation du vivant : déplacements en formation, robots footballeurs, robots explorateurs, pour ne citer que quelques exemples.

Ces recherches seront très influencées par les travaux de C. Reynolds sur le Flocking⁶ (simulation de nuées d'oiseaux) et par le principe d'embodiment de Brooks⁷, montrant qu'un robot ne se limite pas à un programme informatique mais qu'il représente lui-même une partie de l'environnement. On parle d'agent incarné, faisant référence à cette dimension physique de l'agent.

Cette nouvelle approche, mettant en interaction de nombreux agents physiques, aussi nommée robotique collective, reçoit en même temps un certain nombre de critiques qui sont autant de verrous qu'il reste à traiter :

- Comment intégrer les approches collectives aux architectures et modèles classiques de la robotique ?
- Comment garantir/programmer une propriété émergente dans un système robotique ?
- Comment implémenter physiquement les modèles de l'intelligence collective exploitant des environnements actifs ? (marquage de l'environnement, dépôt de phéromones digitales).
- Comment passer de modèles informatiques/simulés souvent discrets au monde continu et bruité de la robotique ?

Dans les années 2000, le robot devient humanoïde et la question de l'interaction robot-humain et de l'adaptation devient essentielle. Là encore, l'interaction entre l'agent/robot et son environnement est au coeur de la problématique.

Ces questions sont au coeur des perspectives de recherche que je présente au Chapitre 7.

1.1.4 Vers des essaims de robots

La question se pose aujourd'hui de l'émergence de nouveaux modèles de calculs et de contrôles, émanant de l'étude des systèmes complexes, naturels ou artificiels, massivement parallèles et autonomes (e.g. [41]). Cette nouvelle forme de calcul est apparue dès les années 90 comme inadaptée aux systèmes informatiques et robotiques classiques [35], basés ou pensés comme des éléments monolithiques (mono-processeur, mono-agent ou encore mono-robot).

Il apparaît important de souligner qu'à l'émergence de cette nouvelle forme de calcul massivement parallèle est associée une (r)évolution technologique. Il suffit de regarder l'explosion actuelle de la programmation ou re-programmation de modèles sur les cartes graphiques et autres FPGA⁸. La miniaturisation

⁶Reynolds, C. W., Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model, in Computer Graphics, 21(4) (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings) pages 25-34., 1987

⁷Rodney A. Brooks, Intelligence Without Reason (1991), Proceedings of 12th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Sydney, Australia, pp. 569-595, 1991

⁸Field Programmable Gate Array

des processeurs, des capteurs et des effecteurs au cours des années 2000 (et la réduction de leur coût), permet aujourd'hui de déployer de grands réseaux de capteurs/processeurs définissant l'ambient intelligence [121]. Ainsi, une question centrale de l'intelligence en essaim est aujourd'hui la définition et le déploiement d'essaims de robots, reposant sur ces nouveaux composants et réseaux.

Nous mentionnerons tout au long du mémoire dans quelles mesures certains de nos travaux participent à cette (r)évolution technologique, et bien sûr nous y reviendrons dans les perspectives de recherche.

1.2 Articulation des recherches, des encadrements et des collaborations

Cette section vise à résumer l'évolution de mes travaux au cours des trois périodes (de 4 ans) que j'ai passé respectivement en tant que doctorant et ATER au LIRMM (98-02), et en tant que Maître de Conférences au SeT (02-06) et au LORIA (06-10).

La question centrale de l'intelligence collective, et que j'ai abordée dès ma thèse, peut se résumer par l'énoncé suivant : considérant un ensemble d'agents autonomes simples⁹, comment définir leurs comportements afin qu'il émerge de leurs interactions une propriété globale dans le système ? Cette propriété pouvant prendre la forme d'un comportement auto-organisé des agents ou bien d'une construction ou d'une organisation de l'environnement.

La thèse préparée au LIRMM (98-01) avec Jacques Ferber et Alain Liégeois portait sur la définition d'un modèle générique de coopération et de résolution distribuée de conflits entre agents situés, reposant sur la propagation de champs émis par les agents [106, 113]. Le modèle a été étudié et validé en simulation et avec des robots réels sur des problèmes de navigation et d'exploration [66, 23, 108]. Nous avons abordé la question de l'auto-organisation en adoptant une démarche *bottom-up*, qui prend le contre-pied de l'approche classique en algorithmique. C'est-à-dire que nous ne sommes pas partis de la propriété globale visée pour en déduire des mécanismes locaux (approche *top-down*). Nous avons d'abord considéré un mécanisme d'interaction assurant localement une propriété, pour ensuite étudier son passage à l'échelle globale du système. Ceci a forgé une méthodologie de travail que l'on retrouvera tout au long du document dans les divers modèles que j'ai pu aborder, et la volonté de valider et formaliser cette approche.

En fin de thèse et durant l'année d'ATER, j'ai co-encadré avec J. Ferber les DEA de Gregory Beurrier et Jérôme Chapelle. Ils m'ont permis d'aborder respectivement l'étude de l'émergence multi-niveau à partir du processus de diffusion de phéromones [15] et l'apprentissage social comme un prolongement du modèle satisfaction-altruisme [23].

Suite à la thèse, j'ai rejoint en 2002 l'équipe Systèmes Multi-Agents¹⁰ du laboratoire SeT (Systèmes et Transports) à l'UTBM, animée par Abder Koukam. Ce premier poste de Maître de Conférences me permettant d'approfondir l'étude des SMA réactifs dans une perspective de résolution distribuée de problème et de contrôle de flotilles de robots, mais aussi d'enseigner ces domaines.

Dans ce nouveau contexte, j'intègre aussi de nouvelles dimensions à mes travaux comme la spécification et la preuve formelle de propriétés, ainsi qu'un nouveau cadre applicatif, celui des réseaux de transports. Ceci aura pour conséquence le développement de travaux de simulation et d'optimisation des réseaux de transports (encadrement du DEA de David Meignan, coordination des développements du logiciel SeTRTC) [76]. Sur le plan des modèles nous débutons avec Vincent Hilaire un travail de réexamen du modèle Satisfaction-Altruisme, pour le plonger dans le formalisme RIO¹¹-ObjectZ développé dans l'équipe. Ce qui mènera à une

⁹au sens de leur capacités de calcul, de perception et de mémoire

¹⁰aujourd'hui renommée ICAP (Informatique : Communication, Agents et Perception)

¹¹Modèle Rôle-Interaction-Organisation, proposé dans la thèse de V. Hilaire [51]

nouvelle expression du modèle et à la preuve de résolution de conflits sur des environnements spécifiques [52, 53].

Dès mon arrivée à l’UTBM, on me confie la responsabilité de la plate-forme robotique mobile, ce qui me permet de mener des travaux sur le contrôle hybride supervisé/autonome de robots mobiles [116]. Nous participons également, avec des élèves ingénieurs, à des compétitions internationales de robots footballeurs (FIRA cup), ce qui me permet d’établir des coopérations avec des universités européennes (cf. plus loin).

La première thèse que je co-encadre (avec A. Koukam) à partir de 2004 permet d’approfondir l’étude des modèles de résolution par champs de forces. Ce travail nous permet de faire le lien entre SMA réactifs d’inspiration physique et problème d’optimisation. Nous montrons que l’agentification d’un problème de positionnement continu par des agents réactifs soumis à des forces d’attraction/répulsion est une forme d’algorithme de recherche locale ayant des performances similaires à d’autres heuristiques classiques [82].

Côté robotique, les collaborations se traduisent en 2005 par le montage avec Drago Matko, Professeur à l’Université de Ljubljana (Slovénie), d’un projet bi-latéral PHC¹², qui nous permet de financer une collaboration sur le thème de la navigation en convois (ou platooning) de robots mobiles (06-08) [74]. En parallèle, je mène à l’UTBM avec Olivier Grunder (MCF) un travail sur la coordination réactive par champ, permettant d’aborder le problème de l’implémentation de ces modèles bio-inspirés avec des robots mobiles. Nous définissons une variante du problème du box-pushing, consistant au déplacement collectif d’un robot guideur (tâche dite du “robot-pushing”) [111].

Enfin, en 2005, j’engage un travail de fond sur la construction collective de champs de potentiels en environnements discrets par marquage de l’environnement, que je développerai dans l’équipe Maia [105].

En 2006, j’obtiens un détachement à l’INRIA Lorraine dans l’équipe MAIA qui me permet d’approfondir des recherches sur la résolution de problème par interaction agents-environnement, en particulier en focalisant sur les modèles à base de phéromones digitales. Ainsi, durant les stages de M2R d’Arnaud Glad et Nam Chu, nous analysons les mécanismes de diffusion et d’évaporation utiles au contrôle d’essaims d’agents [24].

L’année 2007 est marquée par mon installation définitive dans l’équipe MAIA, suite au concours de mutation à l’UHP. Ainsi nous poursuivons les travaux engagés avec Arnaud Glad et le recrutons en Thèse (co-encadrée avec F. Charpillat). Nous focalisons sur la résolution du problème de la patrouille multi-agent en définissant le modèle EVAP. Ce travail nous permet d’identifier puis de prouver des processus d’auto-organisation [43, 44]. Il mène aussi à une collaboration avec Olivier Buffet (CR¹³/Maia) sur les preuves mathématiques de ces propriétés. Enfin, nous appliquons ces résultats aux projets SMAART puis SUSIE sur la patrouille avec un essaim de drones (avec l’ENST Brest et la DGA) [64].

En parallèle de ces travaux je développe une activité robotique au sein de Maia, en lançant une série d’études sur la navigation et la perception de flotilles de robots mobiles, mais aussi en m’investissant dans le projet Cristal sur la thématique platooning décentralisé de véhicules autonomes. Ces travaux débouchent d’une part sur une collaboration forte avec Alexis Scheuer et François Charpillat sur la navigation en convois de robots (définition d’un méta-modèle garantissant la non collision [101]). D’autre part, je lance avec F. Charpillat l’étude et le développement de nouveaux supports de communication et de perception permettant l’implémentation d’algorithmes bio-inspirés et distribués avec des robots réels (modèle des dalles intelligentes, table interactive pour robots mobiles) [94, 104].

Dernière année charnière, 2009, qui est marquée par l’obtention d’une délégation au CNRS et d’un projet ANR Robotique “Carotte”, co-déposé avec nos collègues du LISA (Université d’Angers, Philippe Luci-

¹²Partenaria Hubert Curien

¹³Chargé de Recherche INRIA

darme). L'étude concerne la cartographie d'un environnement intérieur par une flottille de robots mobiles autonomes, en mettant en avant la coopération entre agents et la robustesse de l'approche. Nous obtenons le financement d'une thèse, pour laquelle nous recrutons Antoine Bautin (co-dirigé avec F. Charpillet). Enfin, avec A. Scheuer, nous définissons et ouvrons une option "IA pour la robotique" dans le cadre de la spécialité RAR (Reconnaissance, Apprentissage, Raisonnement) du Master 2 Recherche d'informatique de l'UHP.

1.3 Plan du mémoire

L'étude et la définition de systèmes multi-agents auto-organisés est une problématique vaste que l'on peut subdiviser en deux catégories de systèmes, selon que l'on considère des interactions directes ou indirectes entre agents. On entend par directe le fait que les interactions se font à travers les perceptions ou les communications directes entre agents. A l'opposé, les interactions indirectes sont réalisées par l'intermédiaire du marquage de l'environnement, celui-ci servant de mémoire commune aux agents. Il est intéressant de noter que cette dichotomie a pour conséquence de différencier aussi les modèles définis sur des espaces continus et discrets. En effet les systèmes par marquage de l'environnement supposent en général que l'environnement est discrétisé (graphe, grille) pour faciliter le marquage de l'information. A l'inverse, les interactions directes entre agents, définies généralement comme des fonctions des distances/signaux perçus, se prêtent plus naturellement à des modèles continus.

Ainsi le mémoire est organisé en deux grandes parties. La première est consacrée aux modèles de résolution par émergence basés sur des interactions directes entre agents situés en environnements continus. La deuxième partie présente l'étude de modèles d'auto-organisation et de résolution par coopération indirecte, reposant sur le marquage d'environnements discrets. Le mémoire comprend une troisième partie présentant les perspectives de ce travail en proposant des pistes de recherche.

Première Partie La première partie du mémoire est organisée en deux chapitres. Le premier présente l'étude de modèles visant à établir une organisation émergente au sein de systèmes multi-agents situés continus. Les mécanismes étudiés sont bio ou physico-inspirés, chaque agent ou robot étant considéré comme une particule soumise à l'influence combinée de plusieurs champs générés par l'environnement. Ainsi, nous revenons sur le modèle satisfaction-altruisme et ses évolutions, puis nous détaillons le modèle développé durant la thèse de Sana Moujahed à l'UTBM, permettant le traitement de problèmes de positionnement par auto-organisation. Le second chapitre focalise sur les modèles de coordination réactive et leur utilisation en robotique collective. Nous examinons également les travaux sur la coordination de convois de véhicules autonomes, et la simulation multi-agent de réseaux de transports pour leur optimisation.

Deuxième Partie La deuxième partie est organisée en trois chapitres. Dans un premier temps je reviendrai sur les enjeux de la stigmergie digitale avant de présenter l'étude d'un premier modèle par marquage passif, consistant en la construction collective d'un champ de potentiel. Le second chapitre abordera l'utilisation de marques actives. Tout d'abord en revenant sur un modèle d'émergence multi-niveau utilisant la diffusion d'une phéromone digitale, proposé avec G. Beurrier au LIRMM. Puis, en détaillant les résultats obtenus sur le modèle EVAP lors de la thèse d'Arnaud Glad au LORIA. Ce modèle, qui repose sur le processus d'évaporation d'une phéromone digitale, fait émerger des solutions optimales ou quasi-optimales au problème de la patrouille multi-agent. Enfin le dernier chapitre présentera les travaux menés au LORIA sur la problématique de l'implémentation robotique de ces modèles, et donc du rapprochement des modèles discrets et continus.

Première partie

**Résolution par coordination spatiale
émergente**

Chapitre 2

Modèles d'inspiration physique

Ce premier chapitre focalise sur la résolution collective de problème par champs de potentiels ou de forces dans des environnements continus. Après un résumé des apports de la thèse et des développements ultérieurs, nous examinerons le modèle développé dans la thèse de Sana Moujahed. Il concerne le problème du positionnement de ressources, pour lequel nous avons proposé une approche agents auto-organisés, appliquée aussi aux variantes multi-niveaux et dynamiques. Nous concluons en présentant un principe de conception de telles solutions multi-agent reposant sur l'expression du problème dans le modèle de l'environnement.

2.1 Retour sur le modèle satisfaction-altruisme

2.1.1 Combiner intelligence individuelle et collective

Le modèle satisfaction-altruisme a fait l'objet de ma thèse, menée au LIRMM de 1998 à 2001 et co-encadrée par Jacques Ferber et Alain Liégeois. Notre objectif était l'étude et l'extension des techniques de coordination réactive multi-agent pour faire coopérer des agents situés¹ ou des robots mobiles dans le cadre de la résolution distribuée de problème spatialisés.

Le travail mené a permis d'établir un modèle combinant des mécanismes d'auto-organisation et des comportements individuels intentionnels (en général ces deux aspects sont contradictoires). Tout en conservant une approche reposant sur la coordination par champs de potentiels/forces (cf. Fig. 2.1a), nous avons introduit dans le comportement réactif des agents l'émission de signaux visant à influencer leur voisinage, mais aussi la capacité à agir pour les autres, et non exclusivement pour eux, en fonction de ces signaux.

Le modèle satisfaction-altruisme étend le principe d'architecture réactive en introduisant deux concepts issus du comportement animal : les motivations (ou satisfactions) définies par C. Hull [56] pour les tâches individuelles et les comportements altruistes pour les tâches coopératives [75]. Au niveau collectif, le modèle repose sur la propagation d'agent à agent des insatisfactions, faisant émerger des comportements auto-organisés (cf. fig. 2.1b). Les contraintes environnementales guident la résolution du problème.

2.1.2 Résumé des apports de la thèse

Les principaux résultats de ce travail peuvent se résumer en quelques points :

¹SMA situé : agents évoluant dans un environnement physique (réel ou simulé)

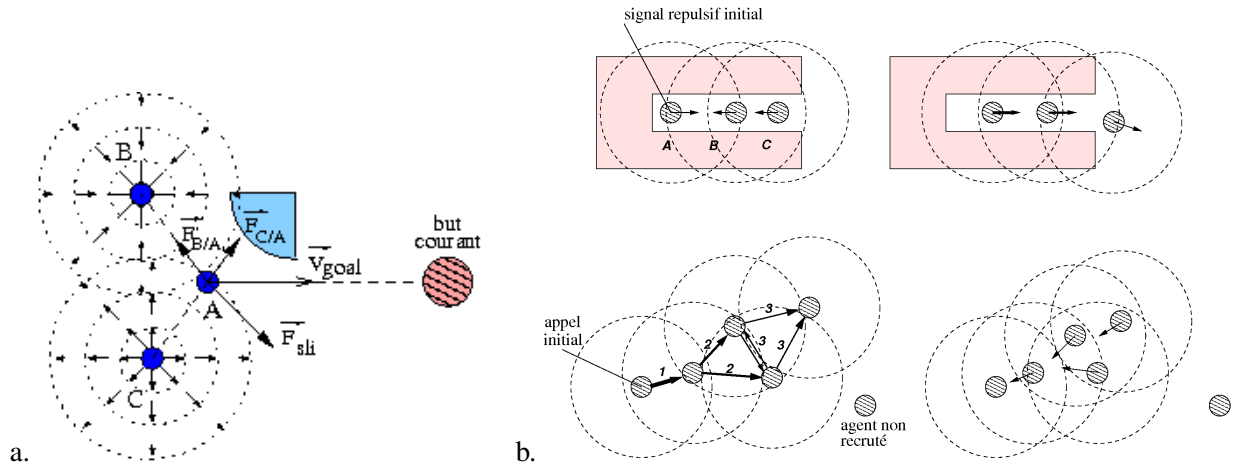
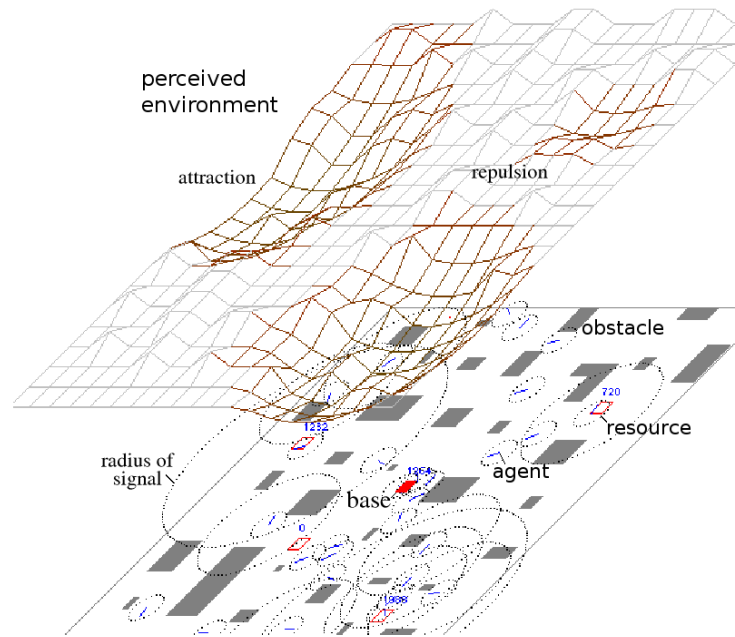


FIG. 2.1 – Illustrations du modèle : a. représentation vectorielle b. propagation des contraintes par signaux répulsifs et recrutement par propagation de signaux attractifs [103]

- Définition de trois mesures de satisfaction d'un agent : satisfactions individuelle, interactive (nature des interactions avec le voisinage) et d'empathie (satisfaction des voisins), cf. [106].
- Définition d'un comportement agent générique permettant la résolution collective de problèmes spatialisés. Cette architecture repose sur trois mécanismes définis au niveau de l'agent :
 - la comparaison entre satisfactions individuelle et interactive pour le déclenchement de comportements coopératifs (altruistes) [106, 113],
 - la sélection/combinaison de signaux/forces définissant le déplacement (l'action) de l'agent, et
 - la propagation des contraintes entre agents, menant à la résolution émergente des conflits² [113].
- Définition d'une récompense fondée sur les signaux de satisfactions, dans le cadre de l'apprentissage par renforcement, permettant d'optimiser les comportements coopératifs des agents, cf. [23].
- La résolution distribuée et efficace, sans connaissance préalable de l'environnement, de problèmes :
 - de recherche et de transport de ressources (*foraging*) (mesure des performances et de l'auto-adaptation du modèle) [106],
 - de coordination d'actions (*box-pushing*) [23] (étude du modèle dans le cadre d'agents hétérogènes et de l'introduction de l'apprentissage) et
 - de résolution de conflits de navigation multi-robots (émergence de solutions, étude et preuve sur des classes environnements) [113, 66].
- Enfin, le modèle a été validé avec des robots mobiles autonomes sur des problèmes de résolution de conflits spatiaux [66] (nécessitant la proposition et l'implémentation d'un modèle de communication locale par signaux infrarouges [103] sur des robots mobiles autonomes également conçus lors de ce travail [65]).

²résolution de conflits spatiaux (blocages), dont nous avons fait la preuve pour certains types d'environnements, mais qui n'est pas garantie dans le cas général.

2.1.3 Résolution par champs de forces



- Tout d’abord, en arrivant à l’UTBM, j’ai eu l’opportunité de travailler à la spécification formelle du modèle, avec Vincent Hilaire, Abder Koukam et Pablo Gruer, en exploitant le modèle RIO (Rôle-Interaction-Organisation) qu’ils développent depuis dix ans. Ce travail a permis en particulier d’exprimer formellement le module de décision (en Z) [54] et de vérifier la propriété de résolution des conflits sur des environnements particuliers (couloirs et impasses) [52, 53]. Ce dernier point a nécessité de considérer un couloir discrétisé sous forme d’un vecteur de cellules, afin de réduire l’espace d’états et éviter la limite combinatoire des prouveurs. Le travail de discrétisation du modèle, du point de vue spatial, est ici partiel, il a été entièrement mené plus récemment, comme précisé ci-après.
- Lors de la thèse, j’ai abordé la question de l’apprentissage de comportements coopératifs en utilisant les mesures de satisfactions ([103] chapitre 10 et [23]). Ce travail s’est fait en collaboration avec Jérôme Chapelle, alors en DEA, puis s’est poursuivi par sa thèse [22] (02-06). Dans celle-ci il a étendu le modèle de satisfaction à celui d’émotion et proposé une architecture d’agents apprenants inspirée du modèle des colonnes corticales du cerveau.
- La première thèse que j’ai co-encadrée, c’est-à-dire celle de Sana Moujahed à l’UTBM (04-07) sur des problèmes de positionnement de ressources, repose sur un mécanisme de coordination spatiale mettant en jeu des forces d’attraction et de répulsion. On retrouve ici cette démarche de combinaison de champs de forces et de comportements réactifs à la base du modèle satisfaction-altruisme [81, 82]. Ce modèle est présenté dans la prochaine section.
- Dans l’équipe MAIA, nous nous sommes posé la question de l’écriture du modèle dans un environnement discret. Ce travail s’est fait dans le cadre de l’étude du modèle des dalles intelligentes permettant l’implémentation d’algorithmes distribués dans un environnement réel actif (cf. Section 6.3.2). L’adaptation de l’algorithme satisfaction-altruisme aux environnements discrets (grilles) a été mené lors du Master 2 Recherche de Nicolas Pepin et porté dans un simulateur (cf. publication [94] et rapport [93]).
- Enfin notons que le modèle satisfaction-altruisme a inspiré d’autres travaux, qu’il s’agisse du modèle des satisfactions (e.g. thèse [98]) ou du mécanisme de coopération entre agents/robots (e.g. thèses [3] et [2]).

Comme on le voit, le modèle satisfaction-altruisme est une base générique pour définir le comportement d’agents coopératifs dans un SMA situé. C’est un modèle ouvert, qui peut encore évoluer et être enrichi selon les applications. Il suscite encore aujourd’hui l’intérêt dans les domaines de la simulation d’individus et de foules, de la navigation multi-robot (résolution de conflits) et de la coopération auto-organisée entre agents (mon mémoire de thèse a été sélectionné en 2010 par un éditeur pour être proposé sous forme d’un livre [103]).

2.2 Problèmes de positionnement

Dans le cadre de la thèse de Sana Moujahed, que nous avons encadrée avec Abder Koukam à l’UTBM de 2004 à 2007, nous nous sommes intéressés à l’utilisation des champs de forces/potentiels pour traiter des problèmes d’optimisation. En effet, en général, ils permettent de guider ou de coordonner des agents dans l’espace, mais pas d’optimiser leur comportement. On peut toutefois mentionner les essaims particulières (ou PSO³), métaheuristique d’optimisation inspirée du flocking [97], qui permet de rechercher le minimum global d’une fonction (de préférence continue). Ainsi chaque particule évolue dans l’espace d’état du

³Particle Swarm Optimization [58, 37]

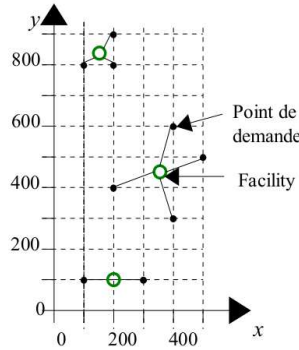
problème, à la recherche d'un minimum. Dans le problème que nous abordons ci-après, notre démarche est différente, dans la mesure où chaque agent est un élément du problème, et que l'ensemble des agents se coordonnent pour construire une solution. A ce titre, elle se rapproche de l'optimisation par colonies de fourmis (ACO ⁴), permettant la recherche d'un plus court chemin dans un graphe par marquage de phéromones (problème du voyageur de commerce). La difficulté étant alors de ramener un problème quelconque à un tel problème d'optimisation sur un graphe.

Dans la coordination réactive, on distingue les techniques basées sur les champs de potentiels ou de forces (que nous étudions dans ce chapitre), et celle utilisant le marquage de l'environnement (concerne le chapitre suivant). Dans les deux cas, la coordination réactive s'accomplit *in situ*, et non *a priori* comme les techniques de planification. Comme le précise J. Ferber dans [35] "Les approches très réactives n'assurent pas nécessairement une très grande optimisation de l'ensemble des résultats mais sont capables d'intervenir dans des contextes évolutifs et d'une manière générale dans des situations où il est difficile d'anticiper ce qui va se passer". Il nous est apparu toutefois intéressant d'examiner les performances des techniques de coordination réactives par champs lorsqu'on se place dans le cadre de problèmes d'organisation spatiale des agents. Ce qui nous a conduit à considérer des problèmes de positionnements, connus sous le nom de *Facility Location problem* (une facility correspondant à une ressource). La littérature sur ces problèmes est vaste, et nombre d'heuristiques ont été proposées [79]. Il s'agit en effet d'un problème NP-difficile, intéressant de nombreux domaines applicatifs (transport, industrie, robotique, urbanisme,..). Notre but n'était pas de rechercher une solution optimale à ce problème, mais d'étudier une heuristique multi-agent réactive et de la comparer aux approches de recherches locales ou par voisinage.

2.2.1 Formalisation du problème

Le problème consiste à positionner des ressources (ou *facilities*) dans un environnement pour servir des clients afin d'optimiser une ou plusieurs fonctions objectifs. Nous avons considéré la version la plus classique, où les demandes (clients) sont fixes et la fonction objectif minimise la somme pondérée des distances séparant les demandes de leur ressource la plus proche. Il s'agit de la version continue du problème, où les ressources peuvent être placées n'importe où dans le plan (cf. illustration ci-dessous). Ce problème est aussi appelé problème du p-médian, il peut être exprimé formellement comme suit :

$$\begin{cases} \text{Minimiser } F(x) \\ F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \min_{x_j \in x} d(x_j, a_i) \end{cases}$$



où

$a_i = (a_{i1}, a_{i2})$: la position connue de la demande i , $i \in [1, n]$;

w_i : le poids de la demande i ,

$x = (x_1, \dots, x_p)$: le vecteur des positions relatives aux facilities, avec $x_j = (x_{j1}, x_{j2})$ les coordonnées inconnues de la facility j , $j \in [1, p]$;

⁴Ant Colony Optimisation [31]

$d(x_j, a_i) = [(x_{j1} - a_{i1})^2 + (x_{j2} - a_{i2})^2]^{1/2}$: la distance séparant la demande a_i de la facility x_j .

On le voit, il s'agit d'un problème naturellement spatialisé, qui se prête à une ré-écriture sous forme d'agents situés (cf. ci-après). Nous avons également examiné des versions pour des environnements contraints et considéré des versions dynamiques où les demandes peuvent être mobiles (cf. plus loin). Nous nous sommes aussi intéressés à la robustesse des solutions lorsque le système est perturbé.

2.2.2 Analyse de l'approche proposée

Dans notre approche, les facilities sont modélisées par des agents mobiles qui évoluent selon des forces induites par les demandes et les agents. Ainsi deux types de forces sont appliquées sur l'agent :

- les attractions vers les demandes voisines, proportionnelles au poids et à la distance de chaque demande,
- les répulsions exercées par les facility voisines, inversement proportionnelles à leur distance.

A chaque instant, pour un agent-facility A , on considère l'attraction moyenne vers les demandes perçues dans un rayon r_a , notée $\vec{F}_{demandes/A}$. On calcule également la moyenne des répulsions des autres agents perçus dans un rayon r_r , notée $\vec{R}_{agents/A}$ (cf. détails dans [79, 82]). On en déduit le comportement d'un agent-facility comme étant un déplacement élémentaire à faire dans la direction du vecteur \vec{Mouv} :

$$\vec{Mouv} = \alpha \vec{F}_{demandes/A} + (1 - \alpha) \vec{R}_{agents/A}$$

Le coefficient α permet de pondérer l'attraction par rapport à la répulsion (par défaut $\alpha = 0.5$).

Ainsi l'algorithme final consiste à appliquer ce comportement à tous les agents-facility (de façon synchrone ou non), et à laisser évoluer le système vers un état stable, correspondant à une solution approchée du problème. Ce principe est illustré en figure 2.3, il montre comment un ensemble de facility placées aléatoirement sur un environnement dont la demande est représentée en chaque point par une intensité, évolue vers un état stable concentrant les agents sur les zones à forte demande (plus la demande est forte, plus elle est foncée).

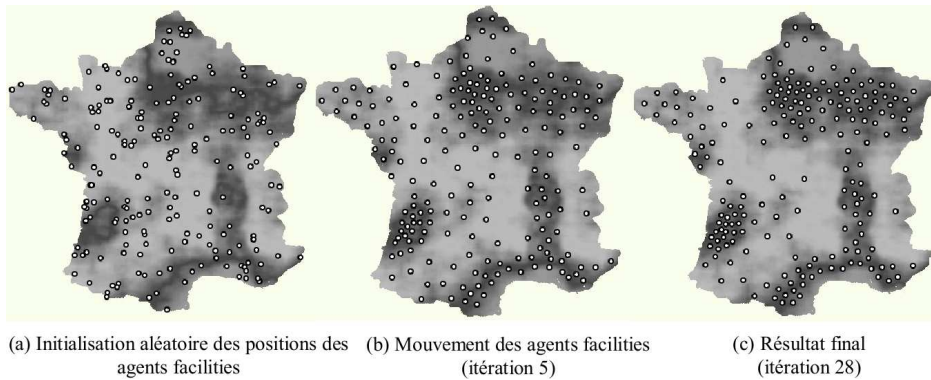


FIG. 2.3 – Illustration du modèle de positionnement sur un environnement avec une forte densité de demande (gradation vers le noir pour le poids maximum)

Plusieurs questions se sont posées concernant le processus de résolution : comment choisir les paramètres α , r_a , r_r et quel est leur rôle ; la convergence vers un équilibre global est-elle garantie ; et quelle est la qualité de la solution obtenue ?

Concernant les paramètres, finalement peu nombreux comparés à d'autres heuristiques (e.g. recuit simulé), l'étude a montré que leur valeur dépendait des contraintes de l'instance traitée (taille de l'environnement, nombre de demandes / nombre de ressources). Il se dégage qu'un environnement avec une forte densité de demandes entraînera des rayons de perceptions de faibles tailles, et qu'un faible nombre d'agents par rapport au nombre de demandes déterminera un coefficient α faible (afin d'équilibrer répulsion et attraction). Notons qu'il serait intéressant d'approfondir cette étude et d'examiner si le paramétrage peut être déterminé automatiquement, en particulier par un mécanisme itératif en ligne permettant d'optimiser la solution obtenue.

La convergence du système vers un état stable est un élément central du modèle. La force d'attraction seule correspond à un déplacement vers le barycentre des demandes perçues (cf. [79] Annexe A). Le barycentre est connu pour minimiser la somme pondérée des carrés des distances, mais pas la somme des distances⁵. Par contre le barycentre nous donne un point d'équilibre, puisque par définition c'est le point qui annule la somme des forces pondérées. Dans notre modèle, il s'agit de minima locaux dans lesquels "tombent" les agents, et donc les immobilisent. La force de répulsion inter-agents est introduite pour éviter que les agents tombent dans les mêmes minima et desservent de façon redondante les mêmes demandes. Cette force de répulsion permet donc de répartir les agents dans l'environnement et d'éviter les redondances. Cette force ne gêne pas la stabilisation de chaque agent dans un minimum local, puisqu'elle peut-être vue comme une force d'attraction supplémentaire, vers une demande virtuelle située à l'opposé de la répulsion (on retrouve la stabilisation vers le barycentre de n points pondérés). Chaque agent ayant un rayon de perception limité, il va évoluer jusqu'à se stabiliser au barycentre des éléments perçus. Toutefois le déplacement d'un agent peut entraîner une variation du nombre d'éléments perçus, et ainsi faire évoluer sa position finale. Cela peut se répercuter sur d'autres agents et propager des changements dans le système. Globalement il est difficile de décrire l'évolution d'un tel système complexe. Mais il est clair qu'après une phase de propagation des contraintes de répulsion, il évolue itérativement vers une stabilisation globale. A chaque itération il tend à rapprocher chaque agent d'un minimum local (comme une descente de gradient).

Ce système, d'inspiration physique, s'auto-organise sous l'influence des forces appliquées pour atteindre un état d'équilibre (comme le seraient des particules électriques dans des champs électro-statiques ou magnétiques). Le système se stabilise dans un minimum local de la fonction objectif, puisque composé d'un ensemble de minimums locaux. Nous avons alors réalisé une étude comparative aux approches existantes montrant que ce minimum est une solution approchée de qualité au problème du p -median, ces performances sont présentées ci-après.

2.2.3 Résumé des apports du modèle

Les performances du modèle proposé ainsi que l'étude de ses propriétés peuvent se résumer par les points suivants :

- L'approche a été évaluée sur des benchmarks standards du domaine [19] utilisant les heuristiques Tabou, VNS⁶, PROJ (à base de relaxation de contraintes) et MALT⁷. Les résultats montrent que l'heuristique est compétitive, en particulier lorsque les instances deviennent grandes (1060 clients, 50 à 100 ressources à placer). Dans ce cas, notre approche produit une solution meilleure en moyenne que les autres heuristiques (et une meilleure solution après PROJ). Le tableau 2.1 résume ces résultats, réalisés dans les mêmes conditions que [19]. L'ensemble des mesures est présenté dans [79, 82]. L'approche a été également comparée à l'algorithme centralisé du k -mean, montrant que nous obtenons des solutions quasi-identiques, cf. [81].

⁵problème connu sous le nom de recherche des points de Fermat

⁶Variable Neighborhood Search

⁷version multi-start de l'heuristique de Cooper

TAB. 2.1 – Résultat pour Benchmarks 50 et 1060 clients : écarts en % aux meilleures valeurs connues

| n=50 clients (p ressources) | | | | n=1060 clients (p ressources) | | | |
|-----------------------------|-------------------|----------|---------|-------------------------------|-------------------|--------|---------|
| p | Approche Agent(%) | Tabou(%) | PROJ(%) | p | Approche Agent(%) | VNS(%) | MALT(%) |
| 2 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 5 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 2.96 | 1.77 | 2.40 | 30 | 5.50 | 5.44 | 7.28 |
| 20 | 3.40 | 6.34 | 3.63 | 60 | 18.11 | 20.59 | 30.19 |
| 25 | 11.86 | 9.64 | 2.00 | 100 | 14.47 | 23.34 | 37.26 |

- Ce qui est également remarquable, c'est que ces résultats sont obtenus plus rapidement qu'avec les autres modèles, d'autant plus que le nombre de ressources croît. D'une part, parce que nous n'avons pas besoin d'évaluer la fonction objectif à chaque itération. En effet, les agents se déplacent en fonction de leurs perceptions, selon une heuristique locale pré-codée, indépendante de la fonction de coût global (le coût de calcul dépend donc du rayon de perception des agents). D'autre part, ce processus converge rapidement. Il présente enfin l'avantage de pouvoir être implémenté de façon distribuée, permettant d'envisager le traitement d'instances de très grandes tailles.
- Le système présente une capacité de robustesse aux perturbations, c'est-à-dire qu'il se réorganise aussitôt qu'un élément est supprimé/ajouté/déplacé dans le système (sans avoir à re-paramétrer et relancer l'algorithme comme dans la plupart des approches). En particulier nous montrons que lorsqu'un grand nombre de demandes est ajouté dans l'environnement la ré-organisation depuis l'état courant est plus rapide qu'en relançant l'algorithme (cf. [79, 82]).
- Nous avons ensuite plongé le modèle dans des environnements contraints, comme cela peut être le cas dans de nombreuses applications réelles. En effet, le placement des ressources peut être limité à des zones particulières de l'environnement. C'est le cas avec le positionnement d'arrêts sur un réseau de lignes de transports. Nous avons montré comment le modèle pouvait être efficacement adapté à ce type d'environnement en contraignant les arrêts à se déplacer sur des lignes. L'étude du modèle et la qualité des résultats obtenus sont présentées dans [80].
- Enfin, nous avons considéré les problèmes de positionnement multi-niveaux. C'est-à-dire que des ressources hétérogènes doivent être positionnées à différents niveaux, selon une ou plusieurs fonctions objectifs. Une ressource au niveau k représente une demande pour les ressources de niveau $k+1$ et une ressource pour les demandes/agents du niveau $k-1$. Ainsi le modèle se généralise facilement, les répulsions sont présentes entre agents du même niveau, et les attractions se font vers les agents/demandes du niveau immédiatement inférieur. La convergence et la robustesse du modèle ont été étudiées expérimentalement dans [82].

2.2.4 Positionnement dynamique

Nous revenons sur une propriété intrinsèque du modèle, qui est sa capacité à s'adapter en temps réel à des demandes mobiles. Positionner des ressources pour des clients mobiles est un problème complexe et peu abordé, qui trouve des applications en particulier en robotique collective. En effet, les flottilles de robots mobiles sont des clients naturellement dynamiques qui nécessitent des ressources par forcément fixes (recharges d'énergie, borne de communication, etc.).

Nous avons exploré cette variante du problème de positionnement en considérant n flottilles de robots évoluant dans l'environnement et k ressources mobiles nécessaires à ces robots (recharges d'énergie). Nous

n'avons pas considéré une tâche à réaliser sur une unique région car, dans ce cas, positionner la ressource au centre de la région suffit à optimiser le coût moyen pour rallier cette ressource. Nous avons considéré une tâche qui devait être réalisée successivement sur différentes régions de l'environnement, pour une durée aléatoire sur chacune. La tâche consiste à patrouiller⁸ une région à l'aide d'une flottille de robots (étude développée dans le prochain chapitre). Les environnements considérés sont constitués de quatre régions rectangulaires, comme représenté en figure 2.4. L'objectif est de positionner en temps réel les k recharges mobiles de façon à minimiser leur temps d'accès lorsqu'un robot à besoin de s'approvisionner.

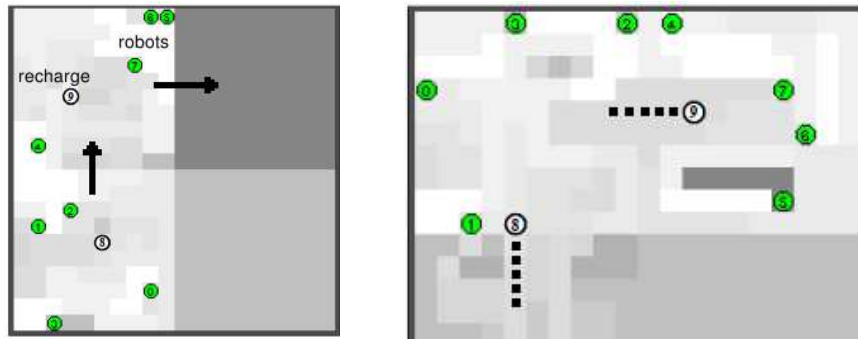


FIG. 2.4 – Illustration du modèle de positionnement dynamique : 2 recharges mobiles suivent l'évolution de 2 flottilles réalisant une tâche de patrouille, cf. [79]. Lorsque les flottilles changent de région, les recharges sont entraînées par effet d'attraction et tendent à rester à leur barycentre.

Considérer des demandes mobiles n'a nécessité aucun changement du modèle de positionnement. L'application aux recharges mobiles a nécessité de prendre un rayon d'attraction couvrant un disque inscrit dans une région, un rayon de répulsion identique et un même poids à chaque robot. On observe en simulation qu'une recharge se déplace au barycentre d'une flottille, et reste relativement stable pendant que les robots patrouillent une région (fig. 2.4a). Lorsqu'une flottille doit changer de région, en se dirigeant vers celle-ci, la recharge est aussitôt entraînée car elle cherche à rester au barycentre du groupe (fig. 2.4b).

Cette expérience montre la flexibilité du modèle et sa nature dynamique. En effet comme de nombreux modèles par champs, l'évolution des contraintes inscrites dans l'environnement entraîne le déplacement des agents qui tendent à les réduire. On parle d'auto-organisation spatiale. Nous avons approfondi ce paradigme de résolution de problème en proposant une approche de conception de SMA réactifs présentée en Section 2.3.

Pour conclure, cette approche est une alternative originale aux heuristiques connues pour les problèmes de positionnement de type p-median, capable d'adaptation aux perturbations et aux demandes mobiles, et dont les performances sur des benchmarks de référence sont proches de l'optimal dans un délai rapide (cf. détails dans article [82]). Ce travail suscite toutefois des perspectives. En effet certaines instances du problème montrent que la solution obtenue est sensible à la répartition initiale des facilities (aléatoire, régulière, etc) et au paramétrage des rayons de perception. Il s'agira d'étudier la recherche automatique des paramètres optimaux et d'étudier des techniques de variation en ligne de ces paramètres. Plus généralement, l'objectif est de poursuivre la recherche d'une méta-heuristique de résolution de problèmes basée sur des SMA réactifs évoluant selon des lois inspirées de la physique.

⁸qui consiste à visiter le plus régulièrement possible l'ensemble des lieux d'un environnement

2.3 Vers une méthodologie de conception

Dans le prolongement du modèle satisfaction-altruisme et de l'analyse des modèles de résolution par champs de potentiels existants, il m'est apparu intéressant de chercher à dégager les éléments communs à ces modèles pour établir une méthodologie de conception des SMA réactifs pour la résolution de problème. Peu de travaux se sont intéressés à cette question, en dehors des travaux fondateurs d'Alexis Drogoul [32] et de Jean-Pierre Muller [83]. Toutefois, des travaux récents ont mis l'accent sur le rôle central que devait jouer l'environnement dans les SMA situés [123].

Ainsi, en collaboration avec Franck Gechter (UTBM/SeT), nous avons proposé une démarche de conception des SMA réactifs qui établit le lien entre la représentation du problème, exprimé sous forme de contraintes environnementales, et les comportements des agents qui doivent être des éléments de régulation de ces perturbations. Pour cela, nous avons adopté le point de vue du contrôle des systèmes dynamiques pour exprimer cette approche.

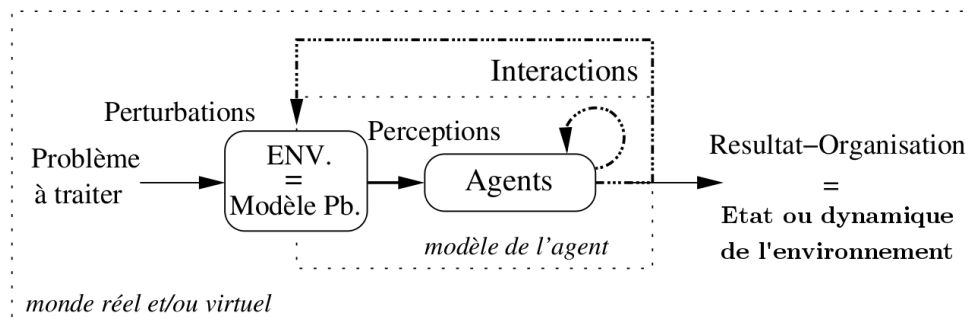


FIG. 2.5 – Principe de résolution réactif basé sur l'environnement [110]

L'environnement est défini comme étant la couche d'entrée de la boucle de régulation du système que l'on souhaite définir (cf. figure 2.5). Il formalise la topologie et les variations du problème devant être perçues par les agents qu'il contient. L'organisation émergente est la sortie du système et en représente l'état du point de vue temporel et spatial. Le mécanisme de régulation est défini par l'intermédiaire des agents et de leurs interactions. Ces interactions peuvent être séparées en deux catégories distinctes. Les interactions agent-agent, d'une part, composent la boucle de régulation directe (phénomène d'amplification ou de feedback positif tel qu'il est défini dans [91, 83]). D'autre part, les interactions agent-environnement caractérisent la boucle de retour et donc le processus de régulation (feedback négatif). L'environnement est modifié à la fois par la dynamique du problème et par la dynamique de régulation liée aux interactions. Si la dynamique de résolution peut être contrôlée par les paramètres du SMA, celle du problème est par nature non maîtrisable. Ce principe est illustré en figure 2.5 et détaillé dans la publication [110].

Cette vision nous a amené à proposer les bases d'une méthodologie de conception de SMA pour la résolution de problème par l'environnement, qui est composée de 4 étapes :

1. *Modéliser les contraintes du problème dans l'environnement.*
2. *Définir les perceptions des agents pour qu'ils puissent percevoir les contraintes du problème.*
3. *Définir les mécanismes d'interaction des agents dans le but de réduire les contraintes qui se manifestent dans l'environnement. Ces mécanismes se définissent sur 3 niveaux :*

- (a) Niveau individuel : actions locales et individuelles (agent-agent ou agent-environnement).
 - (b) Niveau coopératif : s'il existe des situations où ces actions locales sont inefficaces ou génèrent des conflits, définir des interactions coopératives destinées à réduire ces conflits,
 - (c) Niveau régulation : définir des actions/interactions de régulation des deux processus précédents (individuel et coopératif) quand ils présentent des instabilités (amplification, oscillations, etc.).
4. *Observer le résultat en tant que structure émergente*, à la fois en terme d'agents (position, dynamique, etc) et en terme d'environnement (structure topologique, etc) comme cela est défini dans [84]. Cette structure est la conséquence des interactions entre la dynamique de résolution et la dynamique propre du problème. Ce résultat ne peut être vu que par un observateur extérieur au système.

Nous avons exposé dans [110] des pistes pour définir chacune de ces étapes. Nous avons également montré comment cette approche a été mise en oeuvre lors de la définition des modèles Satisfaction-Altruisme (résolution des conflits spatiaux) et de tracking collectif proposé dans la thèse de F. Gechter. Elle s'applique également au modèle de positionnement auto-organisé que nous avons développé dans la thèse de Sana Moujahed (même si ce travail de rétro-ingénierie reste à faire).

Toutefois, cette approche se situe à un niveau méta de la conception d'un système de résolution collectif. La définition des mécanismes de régulation et d'auto-organisation est laissée au concepteur. Ainsi, la suite du mémoire présente l'étude de différents modèles ayant permis d'approfondir la compréhension, la définition et la réutilisation de différents mécanismes collectifs.

Chapitre 3

De la coordination multi-robot aux véhicules intelligents

Ce chapitre focalise sur les mécanismes de coordination réactive mis en jeu dans la navigation de robots mobiles et de véhicules autonomes. Nous examinons ce mécanisme dans le traitement de tâches complexes comme le transport collectif guidé ou les robots footballeurs, mais aussi dans le cadre de la navigation en convois de véhicules (problème du platooning). Ceci nous amènera à considérer la problématique de la simulation de véhicules dans un réseau urbain et sa régulation.

3.1 Coordination Multi-Robot

3.1.1 Introduction

La coordination réactive directe est apparue à la suite des travaux fondateurs de Reynolds sur le *flocking* [97] et de Khatib sur la navigation par champs de potentiels [59], puis généralisée à la coordination d'actions par Zeghal [125]. La caractéristique commune à ces modèles est la prise de décision qui ne dépend que de la perception courante de l'agent. Ces modèles se présentent comme une alternative aux approches de planification qui supposent l'environnement connu. Ici, le comportement de l'agent dépend directement de la perception d'autres agents ou d'obstacles dans un court rayon autour de lui. Les champs de potentiels généralisent cette démarche en supposant que la perception peut être étendue à une carte (partielle) de l'environnement. Chaque élément perçu pouvant alors générer un champ de potentiel ou de vecteurs. En général seul le calcul des vecteurs situés à la position de l'agent est requis¹ et donc s'obtient en temps réel. Toutefois cette rapidité a une contrepartie, qui est l'existence possible de minima locaux (e.g. position où la somme des forces s'annule). Ces minima pouvant piéger les agents loin de leur but. Il existe des solutions lorsqu'on calcule un champ sur un environnement connu [40], mais cela reste problématique en pratique.

Les minima locaux représentent une vraie limite à l'approche, qui est généralement employée pour la navigation mono-robot. Une partie des travaux présentés ci-après tente de dépasser ce cadre en proposant des outils et des modèles pour coordonner plusieurs robots par champs de potentiels/forces. En général la coordination d'un grand nombre de robots repose soit sur des comportements réactifs très frustrés (comme dans le box-pushing [61]) soit sur un système de communication et d'identification entre robots, permettant

¹R.C. Arkin rappelle dans [7] p. 99 cette confusion entre champs de potentiel et navigation *basée* sur les champs de potentiels, nécessitant seulement le calcul des forces s'exerçant à la position de l'agent.

la distribution de rôles ou encore l'apprentissage de tâches complexes, cf. [1]. Nous resterons dans le cadre des modèles réactifs, dont le comportement dépend exclusivement des perceptions locales.

Une autre caractéristique des travaux présentés ci-après est l'étude de modèles de coordination réactive avec de véritables robots mobiles. Il s'agit de confronter ces modèles - souvent étudiés en simulation - aux systèmes réels. Ainsi nous aborderons successivement des problèmes de robots footballeurs, de robot-pushing, de platooning et de transports avec des robots réels ou des données réelles.

3.1.2 Robots footballeurs

Depuis le début des années 90, les compétitions de robots footballeurs suscitent de nombreux travaux, tant le problème est complexe et riche [8]. On peut résumer les principales problématiques par l'étude de :

- la coopération multi-agent, dans un contexte de compétition,
- la prise de décision individuelle et collective en temps réel,
- le contrôle de robots mobiles pour réaliser des tâches de déplacement et de manipulation (de la balle) à grande vitesse,
- la détection et la localisation d'objets (balle, robots) en temps réel dans un environnement très dynamique.

La grande dynamique de ces systèmes et leur aspect difficilement prédictible (en particulier pas la non connaissance du comportement adverse) nous sont apparus comme un cadre bien adapté à l'exploration des techniques de coordination réactive.

En arrivant à l'UTBM en 2002, le laboratoire SeT m'a confié la responsabilité de la plate-forme de robots mobiles Mirobot dédiée aux compétitions de robots "footballeurs" FIRA, et plus généralement à la robotique mobile collective (jusqu'en 2006). Dans cette plateforme les robots sont contrôlés depuis une machine extérieure via une localisation par caméra (cf. fig. 3.1). Elle permet de focaliser les études sur la stratégie de jeu et la coopérations entre robots. C'est aussi un excellent outil pédagogique.

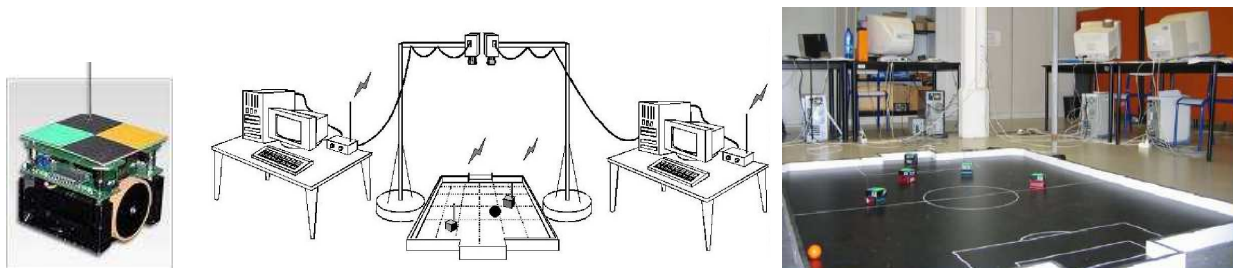


FIG. 3.1 – Plate-forme de robots Mirobot "footballeurs" du SeT

Je résume en quelques points les principaux travaux réalisés :

- Dans un premier temps, j'ai mené une étude sur la navigation réactive et l'évitement d'obstacles dans un tel système selon une approche vectorielle, aboutissant à un ensemble de comportements élémentaires (cf. fig. 3.2a). Puis, dans le cadre du stage de DEA de F. Tolba en 2003, nous avons élaboré une architecture de contrôle hybride permettant de lier stratégie de haut niveau et comportements réactifs, contrôleur qualifié de "macro-réactif", cf. [116]. Cette approche permettant d'exhiber des comportements émergents coopératifs.

- Nous avons alors participé à des compétitions internationales de la FIRA² cup, impliquant un petit groupe d'étudiants de l'UTBM. Dès 2003 nous participons successivement au championnat européen à Ljubljana et nous classons 6ème (sur 12), puis 9ème mondial à Vienne. Nous sommes freinés par la faiblesse du système de localisation de la plateforme, que nous parviendrons à remplacer en 2005. Ces compétitions nous permettent de monter des coopérations avec les équipes slovène de Ljubljana (projet PHC bi-latéral en 2006), néerlandaise de l'université de Twente (démonstrations robotique) et allemande de l'université de Dortmund (échanges pédagogiques et de matériels).
- Dans le cadre des stages de Master 2 Recherche de J. Joly et A. Opalinski que j'ai encadré respectivement en 2004 et 2005, nous avons exploré la possibilité d'utiliser l'apprentissage par renforcement pour améliorer notre approche. D'une part en modélisant la stratégie adverse par déformation d'un champ de potentiel en fonction des chemins les plus utilisés par l'adversaire (cf. Fig. 3.2b). D'autre part, en corrigeant la dérive des trajectoires courbes en apprenant à compenser cette erreur.

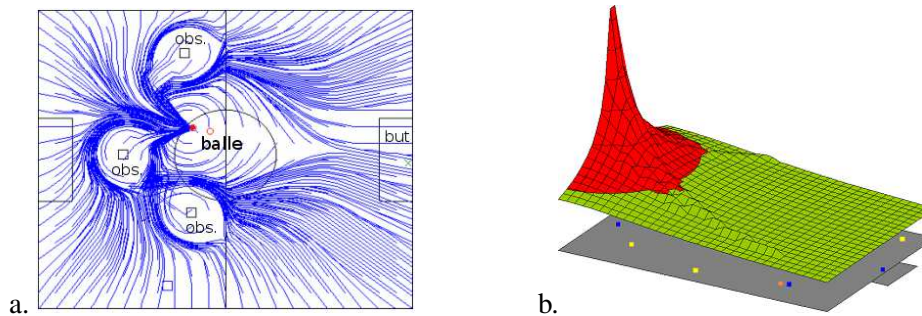


FIG. 3.2 – a. Principe de navigation réactive pour frapper la balle par combinaison vectorielle (évitement d'obstacles, attraction et orientation par la balle), calculé et dessiné depuis "tous" les points de l'environnement (nommé champ résultant) b. Apprentissage de la stratégie adverse : déformation d'un champ représentant les zones où l'adversaire déclenche ses tirs (le champ est initialement maximum devant le but)

Ces derniers points montrent la richesse des problèmes et des études pouvant être engagés autour d'une telle plateforme. Aujourd'hui nous disposons dans l'équipe Maia de robots mobiles autonomes Kheperas III, qui permettent d'envisager la poursuite de ces recherches. Le projet de plateforme interactive que je propose en perspectives (Section 7.3) facilitera ces études de champs et nous permettra d'aborder des défis du type robots footballeurs.

3.1.3 Du box-pushing au robot-pushing

Le transport collectif est une des tâches les plus emblématiques de la robotique collective. Elle a été introduite par Kube and Zhang dans [62] pour la tâche du box-pushing, qui consiste à faire déplacer un objet par un ensemble de robots mobiles très simples et indépendants. L'objet (une boîte), élément de l'environnement, attire et organise les robots pour être déplacée, *c'est-à-dire sans communications directes*. La coopération entre robots est nécessaire du fait que l'objet ne peut pas être déplacé par un seul robot. Ainsi, en combinant trois types de comportements, - pousser l'objet - suivre un robot - éviter les obstacles -, les robots parviennent à pousser l'objet jusqu'à un bord de l'environnement. Les problématiques étant alors de plusieurs ordres :

²Federation of International Robot-soccer Association

- comment faire en sorte que les robots poussent dans la même direction (et par extension dans une direction donnée)
- et comment optimiser l'efficacité de la poussée (éliminer les comportements contre-productifs).

Des extensions du type construction de nid (ou *blind bulldozing*), consistant à pousser circulairement un ensemble de granules, ont également été étudiées [88]. Toutefois, cette tâche collective reste basique et semble peu adaptée à un transport précis et/ou à un contexte de résolution de problème complexe. Ainsi, nous avons mené, d'une part, l'étude d'une version plus élaborée de la tâche permettant de guider les robots pousseurs, et d'autre part, la recherche d'une coordination par signaux plus précise et maîtrisée que le modèle standard.

Dispositif et approche. Comme nous venons de le voir, l'objet constitue l'attracteur des robots pousseurs. Dans ce travail, j'ai cherché à approfondir ce concept d'attracteur, en remplaçant l'objet par un agent capable de modifier/moduler ce "pouvoir" attracteur. Cette démarche nous a mené à remplacer la boîte par un robot immobile capable d'émettre des signaux. La contrainte étant de ne pas utiliser de communications de haut niveau, ni de représentation explicite du problème. Nous avons alors considéré deux types de signaux : ceux pouvant être émis intentionnellement par le robot non-pousseur et ceux induits par les perceptions directes. L'étude consistant alors à définir et combiner des champs attractifs/répulsifs afin d'attirer et guider les robots pousseurs dans leur tâche de transport collectif. Ceci nous a mené à définir un dispositif expérimental original, composé :

- d'un robot immobilisé, placé sur une "civière"³ munie de bras (2 ou 4), capable d'émettre des signaux attracteurs sur ses flans gauche et droite (cf. fig 3.3a).
- et d'un nombre variable de robots mobiles pousseurs capables de détecter des signaux.

Le robot placé sur la civière décide de la direction qu'il souhaite prendre et émet des signaux attractifs gauche et droit. Il différencie les valeurs émises en fonction de la perception de la direction effectivement prise, qu'il peut mesurer.

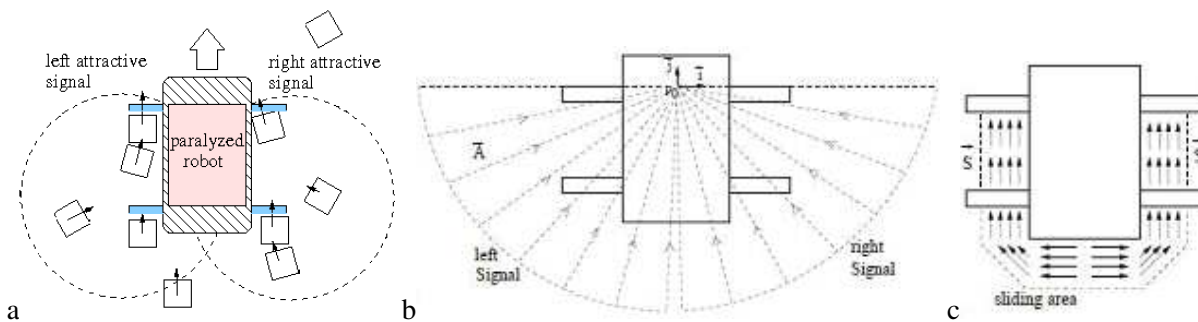


FIG. 3.3 – Modèle du robot-pushing

Travaux Cette nouvelle configuration du box-pushing nous a permis d'étendre le modèle et d'étudier différents aspects de la coordination réactive :

³ afin de faciliter le déplacement du robot immobilisé

- La formalisation et la combinaison des champs de potentiels. Il s'agit des champs attracteurs émis par le robot placé sur la civière (cf. fig. 3.3b) et des champs déduits de la perception de la civière : champ glissant (fig. 3.3c) et d'attraction des bras. Le comportement d'un robot pousseur est défini par la sélection et la combinaison de ces champs (architecture de subsomption et combinaison vectorielle). Le résultat montre que les robots pousseurs sont attirés de chaque côté de la civière et s'orientent de façon à pousser sur ses bras ou sur d'autres robots présents, cf. fig. 3.4a. Le robot placé sur la civière module ses demandes de poussées en fonction de l'erreur de déplacement mesurée, donc de façon indépendante du nombre de robots pousseurs. Cette première étude du modèle et son expérimentation, menée avec Olivier Grunder à l'UTBM, est présentée dans l'article [111].
- Nous avons montré que deux systèmes robotiques réactifs hétérogènes pouvaient se coordonner par l'intermédiaire de signaux : *les robots pousseurs deviennent les effecteurs du robot placé sur la civière*. Il s'établit une boucle fermée : signaux de poussées → action des robots pousseurs → mesure de l'erreur → modulation des signaux.
- Au LORIA nous avons approfondi l'étude et proposé une implémentation totalement décentralisée utilisant des robots mobiles autonomes Kheperas III, cf. fig 3.4b. Cette validation expérimentale, réalisée lors du stage de Master recherche de K. Bouzouita, a nécessité le placement de plusieurs émetteurs infrarouges sur la civière et le développement d'un circuit de contrôle [17].
- Ce dispositif a montré à la fois la flexibilité du modèle (adaptation et réorganisation automatique selon le nombre de robots pousseurs arrivants/partants) mais aussi la difficulté à implémenter des champs de potentiels. En particulier, nous nous sommes penchés sur le problème peu abordé de la modélisation des signaux infra-rouge et de leur optimisation. Ces signaux sont connus pour être bruités et pour se propager dans un cône difficile à dimensionner. On se heurte là, au problème *du passage au réel*, de modèles maîtrisables en simulation mais difficiles à implémenter sur de vrais systèmes (nous reviendrons plus loin sur cette problématique et en particulier dans les perspectives de recherche). La figure 3.4c illustre le travail de modélisation mathématique réalisé suite à une campagne de mesures, nous ayant permis d'optimiser le placement des émetteurs infrarouges (cf. [17] et publication en cours).

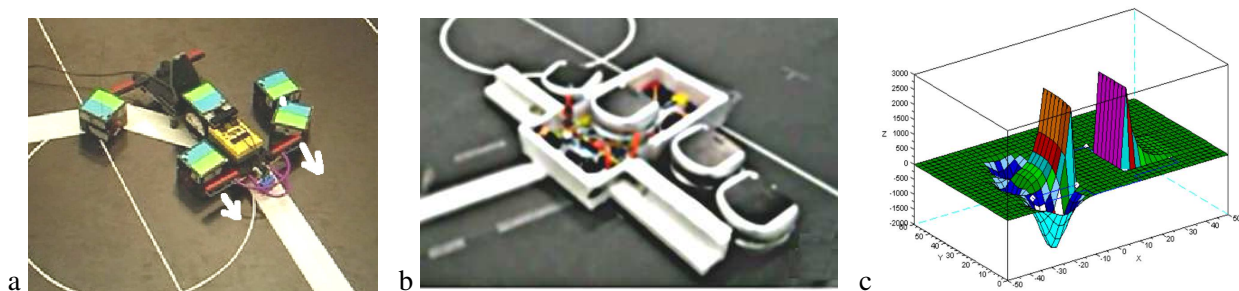


FIG. 3.4 – Expérimentations avec robots Mirosot (a), avec robots autonomes Kheperas III (b) et modélisation des signaux infra-rouge (c)

En définissant le problème du robot-pushing, nous avons montré que le principe du transport collectif à base de perception pouvait être étendu pour diriger la poussée. Le robot, remplaçant la boîte du *box-pushing*, utilise cette poussée collective émergente comme un effecteur souple et adaptatif. La performance en précision et en vitesse de déplacement reste cependant frustrante, en premier lieu à cause de l'arrivée aléatoire et variable des robots pousseurs. L'amélioration d'un tel processus de coopération et sa généralisation à d'autres tâches seront tout l'enjeu de la poursuite de ce travail.

3.2 Coordination de véhicules

3.2.1 Platooning décentralisé

A mon arrivée au LORIA, je me suis investi dans plusieurs études et projets ayant trait au problème du contrôle de convois de véhicules autonomes, appelés aussi *platoons* de véhicules ou robots. Cette problématique s’inscrit dans le cadre général de la navigation multi-robots et de la coordination réactive.

Le problème du platooning correspond bien au sens que lui donne la traduction française, à savoir celui du déplacement en formation⁴. Ainsi le déplacement en convoi n’est pas la seule forme envisageable, cf. Balch et Arkin [9], mais il est assimilé à ce déplacement en colonne tant les applications sont nombreuses dans le contexte du transport. Le projet américain PATH [118], lancé dans les années 90, est représentatif des ambitions de conduite automatique de véhicules en file sur les autoroutes. Toutefois, les verrous technologiques et de sécurité sont venus freiner, voire anéantir, ces objectifs. Au milieu des années 2000, l’idée de platooning de véhicules a ressurgi en Europe dans le contexte du transport dans les centres-villes. Il s’agit d’envisager des véhicules électriques robotisés évoluant à faible vitesse et pouvant être utilisés individuellement ou en convois⁵.

Dans ce contexte, deux approches du platooning sont possibles. L’une dite centralisée ou globale, l’autre décentralisée ou de “proche en proche”. Dans le premier cas, un système de type GPS est embarqué sur les véhicules ainsi qu’un réseau de communication afin que le véhicule de tête transmette sa trajectoire pour que les suivants réalisent la même. La seconde approche nécessite moins de moyens, puisque le suivi repose seulement sur la perception des véhicules voisins (soit par caméra, soit par télémètre laser). Dans l’équipe Maia, nous nous intéressons plus naturellement à cette seconde approche, où chaque véhicule est une entité autonome, et où le convoi est le résultat d’un ensemble d’interactions locales entre véhicules/agents. Cependant, l’approche décentralisée présente à la fois des avantages et des difficultés à surmonter. Elle présente en effet une certaine robustesse, puisque le contrôle est décentralisé et ne nécessite pas de communications globales (ni de positionnement global). Par contre, il est plus délicat de faire suivre un véhicule par un autre sans connaissance de sa trajectoire, et d’assurer la non-collision et la stabilité de l’ensemble du convoi. L’étude du platooning décentralisé ouvre de nombreuses questions qui se situent à la jonction de l’IA et de l’automatique, les principales que nous avons abordées sont présentées ci-après.

Contrôle longitudinal Les travaux existant sur le platooning se sont intéressés davantage à la stabilité du convoi qu’à l’évitement des collisions (en centralisé [85] comme en décentralisé [27]). Les collisions étant souvent considérées comme possibles (puisque’il s’agit d’un système de transport!) et peu probables si la chaîne de véhicule est stable. Cette approche est mise à mal lorsque l’on considère des platoons décentralisés, ceux-ci présentant une plus grande liberté d’accélération/décélération individuelle. Il est d’ailleurs difficile de modéliser analytiquement un tel convoi de plus de 2 véhicules⁶. Pour aborder l’évitement des collisions longitudinales, nous avons d’une part développé des outils de simulation pour étudier le comportement des modèles cf. fig. 3.5, et d’autre part proposé un modèle de régulation des accélérations des véhicules. Ce travail a été mené en collaboration avec Alexis Scheuer et François Charpillet. Dans un premier temps, nous avons identifié des cas limites du modèle de référence de Daviet & Parent [27] entraînant des collisions. Puis, à l’image de la coordination réactive ou du flocking, nous avons con-

⁴au sens militaire

⁵avec un chauffeur professionnel pour le véhicule de tête et dans le cadre de la collecte de véhicules sans passagers

⁶Ce problème renvoie à celui des N corps en physique, où chaque corps subit l’influence des autres, et qui n’a pas de solution exacte dès 3 corps. De nombreux modèles de platooning décentralisés supposent que le mouvement d’un véhicule est déterminé par des forces induites par la perception des deux véhicules voisins, l’ensemble formant plusieurs problèmes à 3 corps en interactions..

sidéré le problème des collisions comme réduit à celui de l'interaction entre deux agents voisins. Nous avons modélisé le comportement admissible le plus dangereux, c'est-à-dire l'accélération maximale permettant à deux véhicules de se rapprocher tout en garantissant que le second peut encore freiner pour éviter la collision si le premier pile. Nous en avons déduit *une loi de contrôle en accélération empêchant tout véhicule d'entrer en collision avec son prédécesseur*. Nous parlons de méta-contrôleur car celui-ci se combine à tout autre modèle, puisqu'il donne la borne courante de l'accélération maximum admissible. Ce travail est présenté en détail dans [101].

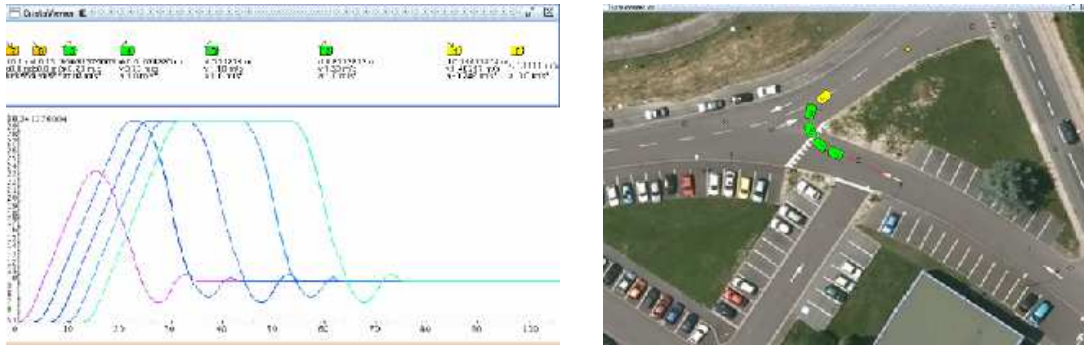


FIG. 3.5 – Illustration des simulateurs Cristal 1D et 2D

Ces travaux ont participé à notre activité dans les projets Cristal⁷ et Tacos⁸, en collaboration locale avec les équipes Trio et Dedale du LORIA. En particulier, avec l'équipe Dedale nous avons mené un travail de spécification formelle en B de modèles de platooning décentralisés longitudinaux. Ce travail permet d'animer une spécification et d'étudier la validité de certaines propriétés, cf. [112]. La collaboration avec l'équipe Trio est davantage centrée sur l'utilisation de robots Kheperas pour expérimenter les modèles de platoonings et mesurer leur robustesse.

Contrôle Latéral L'autre problème classique du platooning décentralisé est la difficulté à faire passer chaque véhicule exactement dans "les roues" de celui qu'il suit. En effet, chaque véhicule ne dispose pas de la trajectoire du véhicule de tête ou de son prédécesseur, il peut seulement percevoir sa position relative. Ainsi la plupart des modèles décentralisés "coupent" les virages puisque chaque véhicule vise la position courante de son prédécesseur, ou estime une courbure tentant d'approximer la trajectoire, e.g. [25]. Pour traiter ce problème de façon exacte, nous avons récemment lancé l'étude⁹ d'un modèle où chaque véhicule construit le chemin pris par son prédécesseur à partir de ses perceptions (celles d'un télémètre laser). Il s'agit de poursuivre une démarche fondée sur les perceptions individuelles, qui ne nécessite aucune information ou communication globale. Le modèle sera évalué expérimentalement avec des Kheperas III à l'été 2010.

3.2.2 Croisement sans arrêt de deux platoons

La coordination réactive s'est attachée jusqu'à présent à considérer la navigation d'un ensemble d'agents autonomes homogènes. Le développement de la navigation en formation, telle que le *platooning*, montre que

⁷Véhicule intra-urbain à usage public, Pôle de compétitivité "Véhicule du Futur", 07-09.

⁸Trustworthy Assembling of Components : frOm requirements to Specification, ANR Sécurité et Informatique, 07-10.

⁹Stage M2R de J. Yazbeck, co-encadrée par A. Scheuer et moi-même, mars à juillet 2010.

l'approche doit être étendue à la coordination de groupes ou d'organisations formées d'agents plus simples (on retrouve le principe des organisations hiérarchiques ou multi-niveaux évoquées au chapitre précédent).

Ainsi, dans le cadre du stage de Sébastien Albouze¹⁰, nous avons examiné ce problème du point de vue du croisement de deux *platoons* décentralisés. Il s'agissait de montrer qu'un contrôle décentralisé permet de réaliser une manoeuvre complexe à partir de comportements locaux simples. Ainsi le cas d'étude considéré est celui de deux *platoons* s'approchant d'un point de croisement, selon des directions perpendiculaires, cf. fig. 3.6. Dans un modèle classique, par exemple de planification, l'un des *platoons* va devoir s'arrêter pour laisser passer l'autre, afin d'éviter la collision. Or, il est assez clair que si les véhicules sont suffisamment espacés pour se croiser alternativement sans s'arrêter, un gain de temps et d'énergie peut être obtenu. Nous avons montré qu'un tel comportement de coordination pouvait être obtenu sans communication.

Le modèle repose sur la connaissance de l'inter-distance minimale entre deux véhicules pour assurer le passage d'un troisième perpendiculairement, et sur la synchronisation émergente des passages. Quand un véhicule détecte dans l'autre *platoon* un véhicule à une distance du croisement proche de la sienne, il peut déclencher un freinage pour réguler sa distance. Pour cela, nous transformons ce problème à deux dimensions en un problème à une dimension : nous "projetons" l'un des *platoons* sur l'autre, de sorte que les véhicules s'intercalent et arrivent synchronisés au croisement. Cette opération consiste à simuler un véhicule "fantôme" devant le véhicule courant pour l'obliger à freiner et réguler son inter-distance sur ce fantôme. En conséquence, les véhicules régulent leur vitesse et leur inter-distance à l'approche du croisement, ce qui a pour effet de se propager dans chaque *platoon* et de faciliter le croisement et la synchronisation globale, cf. fig. 3.6. Les premières mesures montrent que selon les paramètres d'inter-distance et de perception, le gain de temps et d'énergie peut être positif ou négatif, cf. détails dans [4].

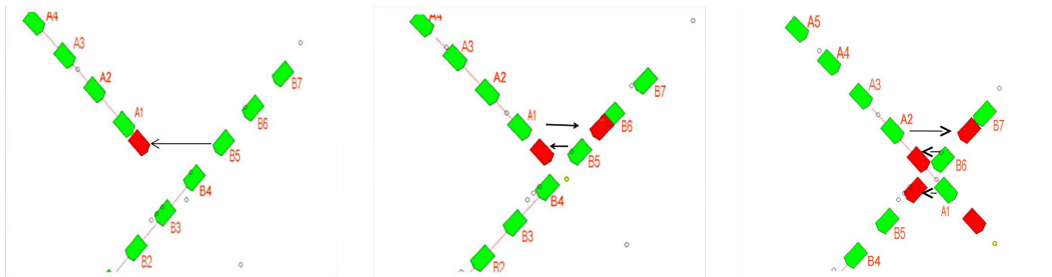


FIG. 3.6 – Illustration d'un croisement par coordination réactive de deux platoons décentralisés, par projection de véhicules fantômes (en rouge), voir [4].

Cette étude montre le potentiel des techniques réactives pour la navigation et la coordination de formations collectives. Cela ouvre un vaste champ de recherche qui vient en complément des techniques classiques de navigation et de planification de chemins [71]. C'est cette démarche que nous prévoyons d'employer dans le projet IntraDE¹¹ sur le problème du transport de containers par des véhicules automatiques dans les grands ports de marchandises maritimes.

¹⁰Stage d'initiation recherche, Ecole des Mines de Nancy, octobre 2009 - février 2010

¹¹Projet Européen Interreg IV, Intelligent Transportation for Dynamic Environment, 2010-2013

3.2.3 Phénomènes émergents dans les réseaux de transport

En 2004, à l'UTBM, nous avons débuté avec Abder Koukam une vaste étude concernant la modélisation et la simulation multi-agent des réseaux de transports. L'objectif étant la définition d'un outil permettant d'identifier et d'étudier les comportements émergents (non désirés) et les performances du réseau.

Ainsi, lors du stage de DEA de David Meignan que nous avons co-encadré en 2005, nous nous sommes focalisés sur le problème de la modélisation agent de ces réseaux, tout en explorant la problématique de leur articulation avec les modèles agrégés (ou macroscopiques).

En effet, un réseau de transport de type bus met en interaction plusieurs dynamiques, correspondant aux comportements des bus, des passagers et du trafic routier. Notre approche a été de modéliser les bus et les passagers au niveau microscopique par des agents et le trafic routier comme une donnée macroscopique. Cela dans le but d'évaluer la performance du réseau sur les contraintes des passagers et des bus. L'originalité de notre travail étant la micro-simulation des comportements journaliers d'une population, générés à partir de données statistiques réelles, où chaque individu choisit de faire son déplacement en bus, en voiture ou à pied, cf. [76].

Ce modèle a été évalué en comparant les mesures de simulation aux données réelles mesurées dans la ville de Belfort. Les valeurs obtenues par simulation produisent un profil de charge du réseau semblable à la réalité (pics aux heures de pointes, retards des bus comparables à la réalité), cf. fig. 3.7b. Ainsi nous avons pu étudier comment le nombre de bus impacte l'attente moyenne des passagers. Le modèle permet également de reproduire et d'étudier des comportements émergents néfastes connus dans la réalité, tels que la formation de files de bus sur une ligne. Ce processus résulte de l'interaction avec les usagers (ramassage) et de l'interdistance initiale entre bus. L'ensemble de ce travail est synthétisé dans un article publié dans le journal SIMPAT [76].

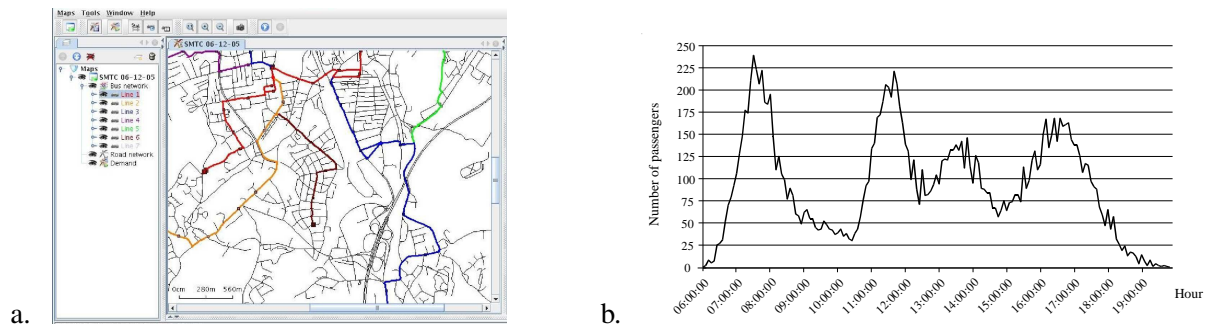


FIG. 3.7 – Illustration du simulateur SeTRTC (a) et de la charge du réseau obtenu sur une journée (b).

Ce travail a donné lieu à plusieurs développements :

- Production du logiciel SeT-RTC¹², cf. fig. 3.7a. Il s'agit d'une simulation discrète synchrone à pas de temps constant, augmentée d'un processus de synchronisation des interactions entre agents dans un pas de temps. Après 2006, le SeT a continué à développer ce logiciel pour en faire un outil d'aide à la décision complet, utilisé en particulier par la communauté urbaine de la ville de Belfort.
- Dans le cadre de ce logiciel j'ai également développé un algorithme d'allocation automatique de la position des arrêts de bus, ainsi que la simulation de la circulation des bus sur les lignes.

¹²Simulateur de Réseau de Transport en Commun du SeT, dont j'ai coordonné les développements jusqu'en juin 2006

Cette étude a permis d'aborder une vaste problématique, qui est celle de la mise en interaction de plusieurs dynamiques, éventuellement de niveaux de granularité différents. Le développement du logiciel SeT-RTC et son utilisation actuelle par les autorités de la ville de Belfort montre que la simulation multi-agents hybride est une approche riche et efficace pour la simulation des réseaux de transports, mais aussi pour l'étude des phénomènes émergents dans les systèmes complexes naturels.

Deuxième partie

Résolution par marquage de l'environnement

Chapitre 4

Construction collective

Dans ce chapitre, nous présentons le domaine et les enjeux de la stigmergie digitale. Nous examinons alors un modèle utilisant un marquage *passif* permettant de construire collectivement un champ de potentiel discret, qui est une version distribuée et asynchrone de l’algorithme de la Vague [10]. Nous étendons alors ce modèle au traitement du problème du foraging et le comparons au modèle fourni standard. Le chapitre suivant sera consacré aux modèles exploitant des marquages *dynamiques*, c’est-à-dire de type phéromones digitales.

4.1 Enjeux de la stigmergie digitale

Comme dans la première partie du mémoire nous abordons ici la résolution distribuée de problème, mais avec la particularité d’utiliser l’environnement comme élément central de la mise en oeuvre des interactions entre agents. Ainsi l’environnement sur lequel évoluent les agents est généralement discret, ce qui différencie encore ces modèles de ceux présentés auparavant.

Calculer via l’environnement est un paradigme maintenant admis en informatique. Le succès de la méta-heuristique ACO (optimisation par colonies de fourmis) [31], basée sur le marquage des arêtes d’un graphe par des valeurs de phéromones, y est pour beaucoup. C’est une des approches inspirées de l’étude des processus de stigmergie¹ menée au début des années 90 sur les sociétés d’insectes auto-organisées [16]. Ce travail fondateur s’est subdivisé en deux problématiques, d’une part reproduire en simulation le comportement de ces insectes pour comprendre les mécanismes locaux menant à leur auto-organisation [28, 29, 11, 117], et d’autre part, transférer ces mécanismes dans le contexte de la résolution de problème en informatique [33, 12, 91]. Ainsi, ces travaux s’inscrivent à la fois dans l’étude des systèmes auto-organisés et dans la résolution collective de problème. Les travaux présentés ci-après s’attachent à viser cette double problématique consistant à étudier des mécanismes d’auto-organisation inspirés du vivant pour établir des modèles de résolution de problème que l’on peut qualifier de bio-inspirés.

Ce qui est remarquable dans la stigmergie, c’est la capacité du système à organiser le travail d’un très grand nombre d’agents, sans aucune planification, tout en s’adaptant aux variations du système. Ces capacités d’auto-organisation et de robustesse ont donc suscité un grand intérêt en informatique, qui requiert plus que jamais le traitement de grandes quantités de données, souvent distribuées.

La stigmergie repose sur l’utilisation que font les agents situés de leur environnement, à savoir celle d’une mémoire commune, éventuellement active. Ce principe vient équilibrer le défaut des agents réactifs, qui est leur absence de mémoire et de capacité délibérative. Ainsi, le système collectif se dote d’une mémoire

¹Le terme provient des mots grecs *stigma* “marque, signe” et *ergon* “travail, action”.

et de moyens de communications, qualifiés d'indirects, car réalisés à travers le marquage et la lecture d'informations dans l'environnement. Dans la nature, ce marquage prend la forme de dépôts de phéromones ou d'une modification de la structure de l'environnement. Dans un cadre informatique, elle prend plus facilement la forme d'inscriptions de symboles dans un graphe (une matrice) couvrant l'environnement.

Dans les années 2000, l'étude du modèle par marquage de phéromones se développe sous divers angles. En particulier, par la généralisation des processus de diffusion/évaporation de phéromones sur des environnements grilles, nommés phéromones digitales (Parunak et al. [99, 86, 100]); mais aussi par le travail de formalisation mathématique et d'analyse des performances en terme d'exploration, de couverture et de patrouille d'un graphe inconnu par I. Wagner [119, 124] et S. Koenig [60].

Ces travaux entrouvrent un champ de recherche, que l'on pourrait qualifier de résolution de problème par marquage de l'environnement. Dans ce cadre, il me semble intéressant de ne pas limiter les marques à des phéromones digitales, ni nécessairement de vouloir exploiter un marquage actif. Ainsi, dès 2005, j'engage des travaux pour approfondir et explorer ce paradigme. Les problématiques sont nombreuses, elles peuvent se résumer par l'analyse des comportements ou des structures émergents selon la nature des marques, la preuve formelle des processus d'auto-organisation, l'étude des performances de résolution, la création d'outils adaptés à leur étude et enfin leur passage au réel, c'est-à-dire leur implémentation avec des robots.

Les trois chapitres de cette deuxième partie du mémoire présentent des éléments de réponse à ces questions.

4.2 Champs de potentiels et foraging collectif

La question centrale abordée dans cette étude est l'examen de la construction d'un champ de potentiel dans l'environnement de façon distribuée et asynchrone, c'est-à-dire par l'activité de marquage d'un ensemble d'agents réactifs. Nous nous sommes ainsi intéressés à la validité du champ en cours de construction, à la convergence du processus et à son exploitation pour la résolution d'un problème tel que le *foraging*. Ce travail a été mené en collaboration avec François Charpillet et Eric Thierry².

Retour sur le foraging La résolution collective de problème, pour ne pas dire les systèmes multi-agents, doivent beaucoup à l'analyse des techniques de foraging chez les insectes sociaux, tâche qui consiste à rechercher des ressources et à construire des chemins vers le nid pour les ramener. Un des résultats les plus remarquables est la capacité de certaines colonies de fourmis à construire des chemins de phéromones entre les ressources et le nid, qui soient optimaux en distance mais aussi capables d'évoluer si l'environnement subit des changements. Ce problème, utilisant des phéromones ou non, est rapidement devenu un benchmark du domaine, en particulier sous la forme proposée par Luc Steels [115], dite des robots explorateurs³. J'ai d'ailleurs souvent utilisé cet énoncé comme un problème de référence, et ce dès mon DEA [102, 109], pour élaborer ou évaluer de nouvelles techniques ou heuristiques de résolution collective.

Dans le travail engagé en 2005, il s'agissait de reconsidérer l'utilisation des phéromones digitales pour proposer une alternative potentiellement plus performante au foraging. Quelles sont les caractéristiques de cette approche qui peuvent être améliorées/critiquées ? En premier lieu, le temps nécessaire à l'émergence de

²MCF. LIP ENS Lyon

³The objective is to explore a distant planet, more concretely, to collect samples of a particular type of precious rock. The location of the rock samples is not known in advance, but they are typically clustered in certain spots. A number of autonomous vehicles are available that can drive around the planet collecting samples and later reenter the a mothership spacecraft to go back to earth. There is no detailed map of the planet available, although it is known that the terrain is full of obstacles-hills, valleys, etc.-which prevent the vehicles from exchanging any communication. L. Steels adapté par M. Wooldridge, cité dans [122].

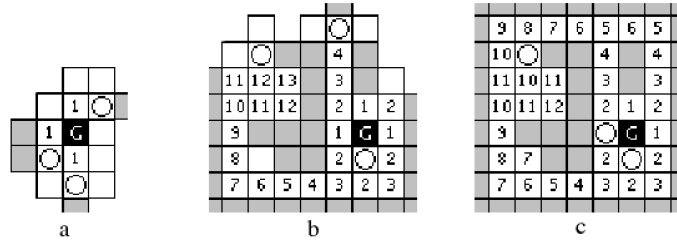


FIG. 4.1 – Construction collective du champ de potentiel avec 3 agents (pas 2, 17 et 65)

chemins, qui plus est optimaux, est relativement long comparé aux algorithmes classiques de planification. D'autre part, le dépôt de phéromones et sa diffusion peuvent facilement générer des minima locaux qui, si le comportement des agents n'est pas adapté, peuvent dégrader fortement les performances. Enfin, le coût computationnel de la diffusion/évaporation de la phéromone n'est pas négligeable s'il n'est pas parallélisé dans un support adapté.

Ré-examen d'un algorithme classique De nombreux problèmes multi-agent définis dans l'espace euclidien peuvent être traités par construction de champs de potentiels artificiels (ou APF), en particulier des problèmes de navigation robotique. C'est le cas de la planification de chemins dans un environnement contraint. Dans ce cadre Barraquand, Langlois et Latombe ont proposé un algorithme devenu classique qui calcule un champ de potentiel optimal vers un but, aussi nommé "algorithme de la vague" [10]. Il s'agit d'une adaptation du parcours en largeur d'un graphe (ou BFS⁴) au cas d'un environnement grille. Le principe est de construire le champ depuis la cellule but, de valeur 0, en incrémentant itérativement la distance. La particularité du champ obtenu est de ne pas avoir de minima locaux et de donner en tout point de l'environnement le plus court chemin vers la cellule but (par une descente du gradient), cf. illustration fig. 4.1c. Il m'est apparu alors intéressant d'envisager la réécriture de cet algorithme centralisé à travers le comportement de marquage d'un ensemble d'agents réactifs, afin de l'exploiter pour des tâches de navigation et de foraging *en environnement inconnu*. C'est une approche différente de l'expression distribuée de l'algorithme qui consiste à mettre un processus/automate derrière chaque cellule de l'environnement.

Marquage minimal Avant de présenter le modèle et son étude, il est nécessaire de préciser que nous avons considéré des agents avec des capacités de marquage et de perception minimales. C'est-à-dire que chaque agent ne peut inscrire une marque que dans la cellule qu'il occupe et que cette marque est un entier positif. L'environnement est passif, les valeurs ne peuvent évoluer que par le marquage des agents. Les agents ont une perception des valeurs inscrites dans un voisinage de rayon 1 selon la distance de Manhattan.

Algorithme collectif et propriétés La réécriture de l'algorithme de la vague sous forme d'agents marquant l'environnement se limite à la définition d'un comportement individuel réactif consistant en deux étapes :

- mettre à jour la valeur de la cellule courante par l'opération $val = \min(val, 1 + \min(\text{valeurs } 4\text{-voisins}))$
- se déplacer aléatoirement vers une cellule voisine, prioritairement non encore visitée.

⁴Breath First Search, cf. [26]

Initialement, toutes les cellules de l'environnement contiennent la valeur $+\infty$ (un grand entier) sauf la cellule but qui vaut 0.

Cette écriture à l'avantage d'être plus simple que l'algorithme centralisé, car elle ne nécessite aucune gestion de listes de cellules. Les agents n'ont pas de mémoire, c'est l'environnement qui stocke les valeurs calculées. Les agents inscrivent ainsi de façon asynchrone des parties de la vague jusqu'à converger à l'inscription du champ complet optimal. Leur préférence pour les cellules non encore visitées engendre un marquage pseudo-circulaire autour de la cellule but⁵, cf. fig. 4.1a. Toutefois, il est important de noter que pendant la construction, une valeur inscrite dans une cellule n'est pas nécessairement sa valeur optimale, c'est-à-dire minimale. Plusieurs visites peuvent être nécessaires pour converger à la valeur finale, ceci étant dû à l'exploration pseudo-aléatoire de l'environnement, cf. fig. 4.1b.

Ces remarques ont appelé la nécessité de démontrer cette convergence. Ainsi nous avons établi la preuve que, pour un environnement de taille bornée, la construction converge vers l'APF optimal (la preuve repose sur la propriété d'exploration exhaustive répétée de l'environnement due à la marche aléatoire). Les détails du modèle et de la preuve sont présentés dans l'article [105] (ACM TAAS).

Ce modèle montre que des algorithmes exacts ou optimaux peuvent être réinterprétés dans le cadre des SMA réactifs et de la stigmergie en conservant certaines de leur propriétés. Nous montrons ci-après comment ce comportement peut être couplé au traitement d'une tâche comme le foraging.

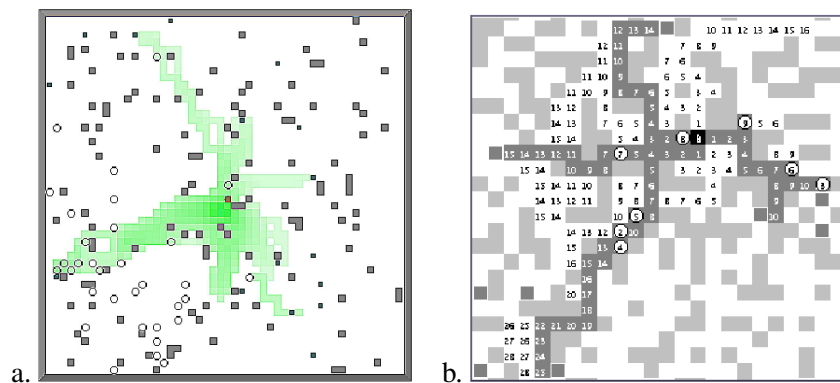


FIG. 4.2 – Foraging avec (a) le modèle fourmis standard (b) le modèle c-marking agents

Extension au foraging et comparaison au modèle fourmis Dans le problème du foraging les agents doivent être capables de rentrer à leur nid/base, quelque soit la forme des obstacles, et de retrouver/communiquer les sources de nourriture découvertes. Dans le modèle des fourmis, ceci est fait par l'intermédiaire des chemins de phéromones formés entre les sources et la base (cf. fig. 4.2a). Dans le cadre des agents construisant le champ de potentiel, ces capacités sont définies plus simplement :

- Les agents disposent par définition d'un chemin vers la base, il leur suffit de descendre le gradient du champ qu'ils ont construit (déplacement vers la cellule voisine de plus basse valeur). Nous avons montré que cette propriété était vraie également pendant la construction du champ, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de minima locaux qui se formaient [105].
- La construction de chemin entre sources et base se fait simplement en laissant la trace de la descente

⁵ à noter que l'algorithme fonctionne quelque soit la position initiale des agents, dans les expériences présentées ils partent tous de la cellule but.

effectuée. Il s'agit de marquer les valeurs du champ avec une "couleur" pour que les agents puissent détecter la trace et la remonter, cf. fig. 4.2b cellules avec valeur sur fond noir.

Nous avons enfin mené des mesures statistiques sur les performances de ce modèle, que nous avons nommé *c-marking agents* :

- Le temps moyen pour le foraging complet⁶ décroît naturellement avec le nombre d'agents déployés, et ce de façon asymptotique vers un minimum. Cependant nous avons montré que le coût global était optimal lorsque le nombre d'agents était égal au nombre de sources disséminées dans l'environnement. Enfin, la nature pseudo-aléatoire de l'exploration suppose que les temps soient exponentiels dans la taille de l'environnement, toutefois cette tendance est très amortie en pratique.
- La comparaison au modèle fourmis a été particulièrement intéressante car elle a révélé des atouts et des défauts de notre modèle. Lorsque les scénarios sont statiques, c'est-à-dire que l'environnement est stable, notre approche se révèle plus efficace en temps. La différence provient du temps de constitution des chemins vers la base qui est nul dans notre cas, puisque le champ utilisé est construit pendant l'exploration, et non *a posteriori*. Ce champ permet aussi de disposer de chemins quelque soit la forme des obstacles, là où le modèle fourmis s'est révélé très handicapé dès que des formes concaves apparaissent. Par contre, notre modèle s'adapte moins bien à certains scénarios dynamiques. C'est le cas avec l'apparition d'obstacles qui peut générer des minima locaux temporaires et mener au marquage de chemins vers ces minima. Toutefois, des revisites des cellules concernées mettront à jour le champ (on retrouve une équivalence avec le processus d'évaporation/dépôt des phéromones). Par ailleurs, le modèle reste valide et efficace à l'apparition/disparition de ressources.

En conclusion Cette étude a montré que le principe de stigmergie peut être combiné à des algorithmes exacts (centralisés) existants (sur les graphes) pour être déployés dans des environnements inconnus. Ceci nécessite de les réinterpréter et d'analyser/prouver les propriétés conservées. Il s'agit pour nous d'une véritable démarche d'étude et de conception des SMA fondés sur la stigmergie. L'étude de cette approche s'inscrit d'ailleurs dans mes perspectives de recherche, comme présenté en Section 7.2.

Le fait de transposer l'algorithme de la vague dans le comportement de marquage d'agents réactifs donne un aspect dynamique et auto-adaptatif à l'algorithme. En effet, l'application au problème du foraging dynamique montre la capacité des agents à réparer le champ lorsque l'environnement est modifié en ligne, et ce, sans changer le modèle de marquage. C'est un des aspects les plus intéressants à explorer dans l'avenir et qui montre tout le potentiel de la stigmergie digitale.

L'extension de cette construction au traitement du foraging a permis d'établir un modèle multi-agent plus efficace que le modèle fourmis classique dans le cas d'environnements stables ou contenant des obstacles complexes. Les scénarios dynamiques montrent toutefois que ce marquage numérique est moins adaptatif que le marquage volatile d'une phéromone digitale. Il faudra d'ailleurs poursuivre ce travail en approfondissant l'étude de l'adaptation du marquage numérique aux perturbations et mesurer les performances du modèle relativement à celui des phéromones.

Enfin, ce modèle de construction collective devra être généralisé à la construction d'autres champs, en particulier ceux définis par des fonctions harmoniques, car ne présentant pas de minima locaux. Il s'agira aussi d'étudier la construction de champs destinés à d'autres tâches que la navigation vers un but. Dans le chapitre qui suit nous aborderons d'ailleurs la construction d'un champ dynamique permettant de traiter le problème de la patrouille multi-agent.

⁶temps pour découvrir toutes les ressources et les transporter à la base

Chapitre 5

Phéromones et auto-organisation

Dans la prolongement du chapitre précédent sur la résolution par marquage de l'environnement, nous examinons maintenant des modèles reposant, non plus sur des marques passives, mais *actives*. Il s'agit d'informations dynamiques, aussi nommées phéromones digitales, évoluant selon les processus de diffusion et d'évaporation induits par l'environnement. Le premier modèle aborde la question de l'émergence de structures multi-niveau en exploitant le processus de diffusion. Le second, développé dans la thèse d'Arnaud Glad, montre comment une organisation dynamique peut émerger sous l'effet du processus d'évaporation et traiter efficacement les problèmes d'exploration et de patrouille multi-agent.

5.1 Diffusion et émergence multi-niveaux

La notion d'émergence est capitale dans l'étude des systèmes complexes, qu'ils soient biologiques, physiques, informationnels, logiciels, etc [84]. Dans la nature, ces systèmes sont majoritairement caractérisés par une structure multi-échelle issue d'émergences multi-niveaux (ou multiples) [50]. Cela se traduit par l'apparition d'une émergence au sein d'un système dont les parties sont elles-mêmes le produit d'émergences passées.

La question de fond est de savoir si l'on peut établir un modèle multi-agent minimal permettant d'étudier ce type d'émergence avec des entités en mouvement, plutôt qu'à partir d'un réseau cellulaire (ou automate cellulaire). Au LIRMM, durant le DEA de Grégory Beurier, que nous avons co-encadré avec Jacques Ferber en 2001/02, nous avons mené une étude sur l'émergence de structures circulaires multi-niveaux. Il s'agit d'un modèle de formation de membranes par agrégation d'agents réactifs diffusant des signaux attractifs/répulsifs. Ce travail a permis de mettre en évidence l'émergence de structures multi-niveaux récursives et leurs propriétés biologiques (robustesse face aux perturbations, autopoïèse), cf. [15].

Nous avons employé une approche Vie Artificielle pour la gestion de l'information, basée sur des échanges de phéromones favorisant le caractère auto-organisateur et émergent du système [89]. Les agents se déplacent sous l'influence des phéromones d'attraction, de répulsion et de présence qu'ils diffusent. Ils disposent d'un niveau d'organisation initialement nul, qui peut évoluer selon la concentration d'agents de même niveau se trouvant dans leur voisinage.

Principe. Les phéromones émises sont marquées par le niveau d'organisation de l'agent. Les agents de niveau i influencent ceux du niveau $i - 1$, et eux-même sont influencés par ceux du niveau $i + 1$. La diffusion forme dans l'environnement des attracteurs circulaires, donc des structures émergentes circulaires. La figure 5.1 illustre la formation d'agents-structures de niveau 1 (composé d'agents notés 0-agents) et de niveau 2 elle-même composée d'agents-structures de niveau 1.

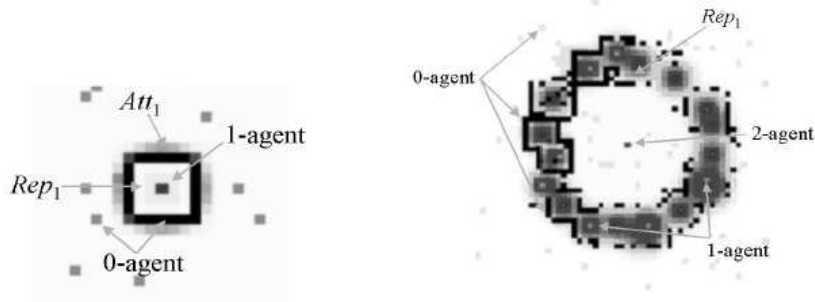


FIG. 5.1 – Illustration de structures émergentes de niveaux 1 et 2

Les principaux résultats issus de l'étude de ce modèle peuvent se résumer par :

- Formalisation d'un système multi-agent réactif discret *récuratif*. Il s'agit de l'expression mathématique du comportement des agents et de la sémantique des phéromones, permettant de démontrer le caractère récuratif de ce comportement (qui ne dépend que du niveau d'organisation i).
- Mesure de complexité. Nous avons formulé le niveau maximum d'émergence d'un tel système en fonction du nombre d'agents, ainsi que son coût en temps de calcul qui est exponentiel, cf. [15].
- Etude de la robustesse. Nous avons observé et mesuré le comportement autopoïétique du système. C'est-à-dire sa capacité à maintenir son organisation lorsqu'il est perturbé/agressé. Des expérimentations ont montré la capacité de résistance des structures et leur reformation dès qu'elles ne sont plus perturbées, cf. [15].

Ce travail montre l'importance de coupler expérimentation et formalisation dans les SMA réactifs. Il nous permet de quantifier les limites des processus d'auto-organisation et de relier les mécanismes locaux aux formes globales résultantes. Il s'agit d'un modèle à base de diffusion de phéromones qui montre le pouvoir organisateur et structurant de ce mécanisme. Je reviendrai dans les perspectives de recherche sur le projet que constitue l'élaboration d'une typologie des formes et des processus que peuvent engendrer les mécanismes de marquage, de diffusion et d'évaporation.

Dans le cadre de sa thèse, Gregory Beurier a poursuivi ce travail en proposant un modèle focalisant sur le codage indirect de formes, c'est-à-dire sur la production de formes par des agents dont le comportement est obtenu par un algorithme évolutionniste [14].

5.2 Le modèle EVAP : évaporation et auto-organisation

5.2.1 Un modèle pour la patrouille multi-agent

Introduction Dans le chapitre précédent nous avons vu comment des agents pouvaient inscrire un champ de potentiel "statique" dans l'environnement pour établir un attracteur vers leur(s) base(s) et l'exploiter pour la recherche et le transport de ressources/objets. Se pose alors la question du traitement de problèmes dynamiques, c'est-à-dire lorsque les buts/objectifs des agents ne sont pas fixes dans l'environnement. Les attracteurs n'étant plus statiques, la notion de champ dynamique apparaît alors naturelle pour "suivre" les évolutions de l'environnement/du problème. Sur un environnement discret, un tel champ peut être produit par des marques actives, c'est-à-dire évoluant dans le temps. Les phéromones digitales présentent deux

processus actifs, que sont la diffusion et l'évaporation. L'évaporation est particulièrement utile pour la mise-à-jour de l'information. Dans le cadre de la thèse d'Arnaud Glad¹, nous avons réalisé une étude approfondie de ce processus d'évaporation et de son utilisation pour le problème de la patrouille multi-agent, en montrant en particulier sa capacité d'auto-organisation spatiale des agents.

Patrouille multi-agent en environnement inconnu Dans sa formulation générale, la patrouille consiste, pour un ensemble d'agents, à visiter le plus régulièrement possible certains noeuds sensibles d'un graphe (pouvant représenter un réseau, un environnement physique, etc.). Ce problème, posé en général sur un graphe ou une carte connue de l'environnement, est NP-difficile [5]. Différentes techniques issues de la planification classique ont été élaborées au cours des années 2000 et comparées, on pourra se référer à [67, 5]. Le problème de la patrouille d'un environnement inconnu, c'est-à-dire intégrant simultanément la tâche d'exploration, a lui été peu abordé. Le développement actuel des applications de surveillance et de *robot rescue* multi-robots montre l'intérêt (croissant) de ce type d'énoncé. A noter, que très récemment, une version intégrant la présence d'un ou plusieurs intrus est venue enrichir la problématique de la patrouille multi-agent [6].

Le modèle EVAP Le modèle EVAP vise à attaquer ce problème de la patrouille multi-agent en environnement inconnu selon une approche par marquage de l'environnement. Plus précisément, il définit le comportement d'exploration et de patrouille d'un ensemble d'agents réactifs évoluant dans un environnement discrétisé et inconnu. Le principe est simple, chaque agent marque sa cellule/noeud d'une quantité fixe (maximum) de phéromone et descend le gradient de celle-ci. Seul le processus d'évaporation est à l'œuvre dans l'environnement, il diminue la phéromone des lieux non revisités et y attire localement les agents (cf. illustration du principe en 3D avec un agent Fig. 5.2). L'établissement et l'étude de ce modèle étant motivés par l'évaluation d'une approche réactive bio-inspirée sur un tel problème (devenu un benchmark du multi-agent) et par l'étude d'éventuelles propriétés émergentes ou auto-adaptatives pouvant apparaître avec une telle démarche.

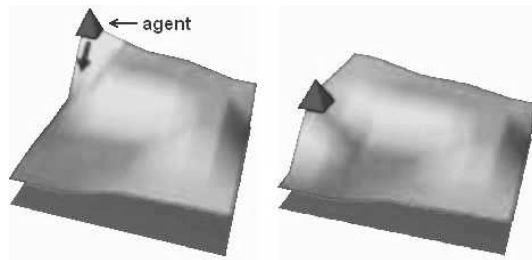


FIG. 5.2 – Illustration d'EVAP avec 1 agent

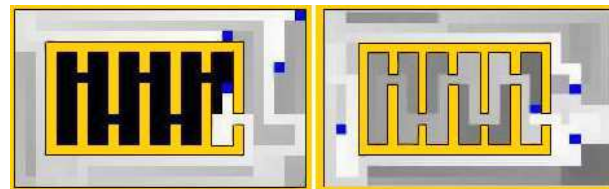


FIG. 5.3 – Phases d'exploration et de patrouille d'EVAP sur un environnement composé de pièces imbriquées

L'algorithme 1 détaille le comportement que chaque agent répète indéfiniment, où $N(x)$ représente les cellules voisines de la cellule x et $q(x)$ la quantité de phéromone présente. L'algorithme 2 décrit l'activité de l'environnement, avec ρ le taux d'évaporation. Les composants du système, agents et environnement, sont des processus autonomes et asynchrones. Nous reviendrons dans le prochain chapitre sur l'importance des hypothèses d'exécution du modèle. Notons que cet algorithme fonctionne sur un graphe quelconque, en considérant que toutes les arêtes ont une distance unitaire. Les expérimentations ont été menées sur des espaces grilles avec un voisinage de 4 cellules, mais les résultats théoriques présentés sont plus génériques.

¹Thèse co-encadrée avec François Charpillet, et avec la participation d'Olivier Buffet (équipe Maia), 2007-2010

Algorithme 1 Agent EVAP (situé sur la cellule x)

- A) Choisir une cellule y dans $N(x)$ t.q. $q(y) = \min_{w \in N(x)} q(w)$
en cas de choix multiple faire un tirage aléatoire
- B) Se déplacer sur la cellule y
- C) $q(x) \leftarrow Q_{max}$ (dépôt de la quantité Max de phéromone)
-

Algorithme 2 Environment EVAP ($\rho \in]0, 1[$)

- Pour chaque cellule x de l'environnement
- Si $q(x) \neq 0$ alors $q(x) \leftarrow \rho \cdot q(x)$
-

Ce type de modèle est qualifié dans la littérature l'algorithme "fourmi" car le comportement des agents est fondé sur la perception locale des quantités de phéromone déposées par les agents. Notre proposition est proche du modèle expérimenté par I. Wagner en 2000 dans l'article [119] Annexe II, sur le problème de la couverture² et par extension de la patrouille. Le modèle de Wagner *et al.*, sur lequel nous revenons dans la prochaine section, présente un marquage différent de la phéromone mais équivalent. En effet, il consiste à inscrire dans une cellule sa date de visite, ce qui permet de remplacer le processus d'évaporation par une simple comparaison à la date courante. Nous avons montré dans [43] l'équivalence entre les deux marquages. Toutefois cette variante suppose une synchronisation des horloges des agents.

Nous présentons ci-après l'étude des performances de patrouille du modèle, avant de nous intéresser au comportement d'auto-organisation des agents.

Etude expérimentale L'évaluation de l'algorithme a été réalisée lors des stages de master 2 recherche d'Arnaud Glad et de Nam Chu que j'ai encadrés conjointement en 2006. Nous avons considéré des environnements avec des obstacles de topologies variées (vide, spirale, aléatoire, couloir-pièces et pièces imbriquées cf. fig. 5.3) et mesuré les valeurs d'oisiveté (idleness) moyenne (IGI) et pire (WGI)³. Nous avons également considéré les bornes théoriques optimales pour ces valeurs. Les principaux résultats de ces évaluations sont résumés par les points suivants :

- D'une manière générale, les patrouilles obtenues génèrent rapidement une oisiveté moyenne proche de l'optimal (cf. figure 5.4a). La performance en pire oisiveté est elle moins convaincante, mais ce n'est pas une surprise vu le comportement local des agents. Toutefois, ce critère peut à long terme converger à l'optimal sur certaines configurations, nous y revenons plus loin.
- Comme tout processus collectif, la performance du système s'améliore quand le nombre d'agents augmente, et ce, de façon asymptotique, cf. illustration figure 5.4b. Les simulations montrent qu'une forme d'organisation émerge, où les agents repoussés par les phéromones qu'ils déposent se partagent l'environnement à patrouiller. Notons également que le modèle EVAP fonctionne avec un seul agent. L'ensemble des mesures et leur analyse est présenté en détail dans [24].
- Les mesures de performances sur des topologies aléatoires ou complexes ont fait apparaître deux phases dans le comportement global du système. La première correspond à l'exploration initiale de l'environnement, qui se caractérise par un pic dans le profil d'oisiveté. Une fois passée cette première

²Il s'agit de visiter une fois tous les noeuds/cellules de l'environnement, ce qui est un problème différent de la patrouille, qui consiste à revisiter le plus souvent possible l'ensemble des noeuds/cellules.

³On définit l'oisiveté instantanée d'une cellule comme le temps écoulé depuis sa dernière visite. L'oisiveté moyenne à un instant est la moyenne des oisivetés instantanées sur l'ensemble des cellules de l'environnement (IGI), et la pire oisiveté est la moins bonne oisiveté instantanée dans l'environnement (WGI).

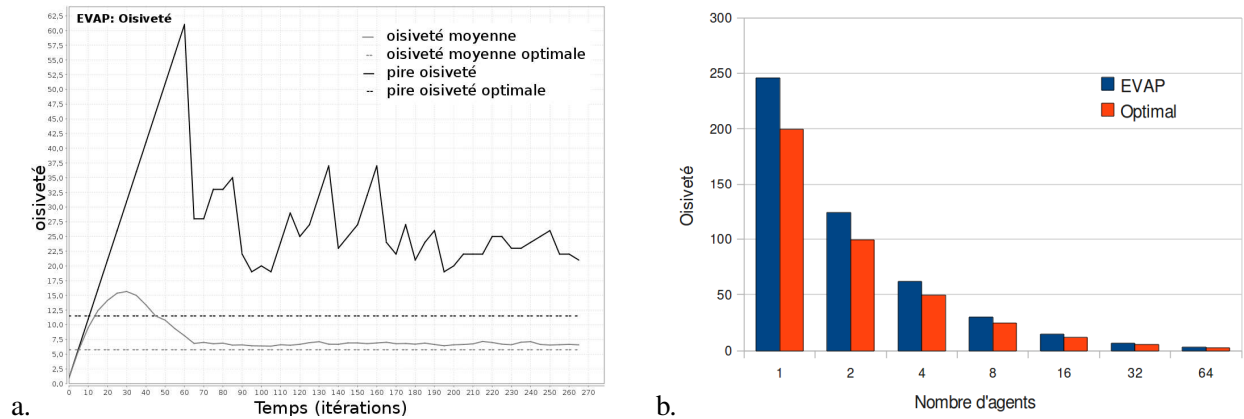


FIG. 5.4 – Modèle EVAP : a. Illustration de l'évolution de l'oisiveté moyenne et en pire valeur avec 32 agents sur une grille 20x20 b. Evolution de la performance moyenne pour un nombre croissant d'agents (1 à 64) sur un environnement 20x20.

couverture, la performance moyenne s'améliore et se stabilise autour d'une valeur souvent proche de l'optimal. La figure 5.4a illustre cette variation de performance entre les deux phases, mesurée sur l'environnement composé de pièces imbriquées de la figure 5.3. Cette amélioration s'explique par la présence de gradients dans l'environnement qui permettent aux agents de le re-parcourir plus rapidement que lors de l'exploration initiale pseudo-aléatoire.

- Le résultat qui a cependant le plus attiré notre attention est la convergence du système, pour certaines configurations, à une solution optimale. En effet, l'oisiveté moyenne et la pire oisiveté convergent alors aux valeurs théoriques optimales et y restent. Nous avons observé ce résultat sur des configurations avec peu d'agents et des topologies simples (vide, spirale). Les agents réalisent alors des parcours cycliques, correspondant à un ou plusieurs cycles hamiltoniens⁴ couvrant l'environnement (cf. illustration 5.5a). La compréhension de cette auto-organisation et la question de son caractère systématique ont motivé la suite des travaux menés dans la thèse d'Arnaud Glad, qui sont présentés dans la prochaine section.

De façon plus générale, ce travail expérimental a mis en évidence l'efficacité du modèle EVAP à patrouiller des environnements inconnus et complexes, mais aussi sa capacité d'auto-organisation spatiale, que nous nous sommes alors attaché à étudier.

5.2.2 Auto-organisation en cycles

Convergence et problèmes ouverts La simulation nous a permis de comprendre que les agents pouvaient converger vers une organisation en cycle(s), correspondant à un attracteur périodique du système⁵, ou sur le plan mathématique à un cycle limite. Ce résultat avait déjà été remarqué par Wagner *et al.* dans [119] pour des environnements admettant un cycle hamiltonien. Cependant Wagner et Yanovski délaissent rapidement le modèle EVAP, d'abord pour une variante introduisant un compteur de visites dans les marques (VAW [120, 119]), puis pour des agents-fourmis évoluant sur les arêtes d'un graphe eulérien⁶ (EAW [124]). Dans

⁴il s'agit d'un cycle passant une et une seule fois par chaque noeud d'un graphe, c'est donc une solution optimale à sa patrouille

⁵au sens des systèmes dynamiques, cf. [13]

⁶graphe admettant un chemin passant une et une seule fois par chaque arête

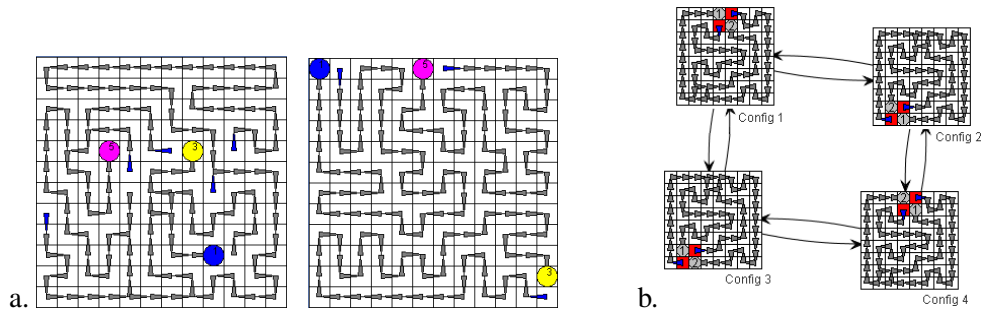


FIG. 5.5 – a. Convergence de 3 agents EVAP vers 3 cycles de même longueur, b. Illustration d’un graphe récurrent.

les deux cas, les auteurs enrichissent le marquage pour établir un modèle sur lequel il est plus facile d’établir des résultats théoriques, en particulier des bornes de temps sur la convergence. Toutefois nous avons formulé deux critiques sur ces variantes. D’une part VAW n’est pas nécessairement plus efficace qu’EVAP pour la phase d’exploration, ni pour converger vers des cycles. D’autre part, les résultats sur EAW ne sont vrais que sur des graphes eulériens.

Ainsi nous avons décidé d’approfondir l’étude du modèle EVAP et plus généralement le processus d’auto-organisation en cycles de cette famille d’algorithmes. Nous avons considéré le modèle équivalent à EVAP utilisant le marquage de la date plutôt que l’évaporation de la phéromone, car la manipulation d’entiers simplifie l’écriture des raisonnements. Avant de préciser les résultats théoriques que nous avons établis, rappelons l’intérêt des parcours cycliques dans le problème de la patrouille. Si ces cycles constituent un parcours hamiltonien de l’environnement (s’il en admet un) alors c’est une solution optimale au problème.

Nouveaux résultats théoriques

- Dans un premier temps nous avons établi un résultat sur la stabilité des cycles qui émergent dans le cas multi-agent. Des cycles séparés peuvent constituer un point fixe seulement s’ils sont de même longueur, autrement ils se disloquent après une période de temps finie (publié dans [43]). Par séparé, on entend qu’un cycle n’est parcouru que par un seul agent, autrement il s’agit de cycles partagés.
- Nous nous sommes intéressés de façon plus générale à la convergence du système vers une organisation cyclique stable. Pour cela nous avons formalisé la notion d’état du système et d’équivalence entre états (un état étant le marquage des cellules et la position des agents). Le système cycle⁷ dès lors qu’il décrit une séquence récurrente déterministe d’états. La preuve que le système converge vers une telle séquence après la phase d’exploration évoquée plus haut est assez facile avec un agent. Dans le cas multi-agent, elle dépend de l’indéterminisme du système, cf. ci-dessous.
- Nous avons identifié deux sources d’indéterminisme dans le système :
 - le choix aléatoire d’un agent entre deux cellules d’égale attraction,
 - la tentative d’accès simultané à une cellule par au moins deux agents, si le conflit est résolu par un tirage aléatoire (aspects détaillés dans la publication AAMAS’10 [44]).

Si le système est rendu déterministe, la preuve de convergence précédente se généralise au cas multi-agents. Sinon le système transite entre plusieurs phases cycliques, au gré de l’indéterminisme. Nous

⁷nous parlons de cycles du système et non plus de cycle décrit par un agent

avons modélisé cette évolution stochastique du système par une chaîne de Markov, définissant des sous-graphes récurrents, c'est-à-dire un ensemble de cycles transitoires connectés par des probabilités de transitions (cf. [42]). La figure 5.5b illustre un sous-graphe récurrent constitué de 4 noeuds, parmi lesquels le système évolue.

La preuve étant établie que le système converge vers un cycle ou vers un sous graphe composé de cycles transitoires, qu'en est-il des temps de convergence et de la nature de ces cycles? Les mesures en simulation ont rapidement montré que les temps de convergence étaient prohibitifs dès lors que l'environnement dépassait une dizaine de cellules et que le nombre d'agents augmentait. La détection des cycles s'est avérée également un problème délicat. Ce constat nous a mené à développer deux modèles. D'une part, l'introduction d'une heuristique dans le comportement des agents pour accélérer la convergence. Et d'autre part, la définition d'un algorithme de détection automatique des cycles. Nous synthétisons ces résultats avant de résumer les résultats statistiques.

Nouvelle heuristique Les simulations ont montré que lorsqu'un agent entre dans un chemin hamiltonien partiel il ne cassait pas cette organisation (chemins visibles en figure 5.5a). Ainsi nous avons permis aux agents de détecter les "entrées" de ces chemins pour les suivrent prioritairement. Cela nécessite d'augmenter leur rayon de perception à 2 cellules. Les résultats expérimentaux sont spectaculaires, les temps de convergence sont fortement réduits (divisés par 10 ou plus) sur des environnements avec des topologies simples, même si le processus reste de nature exponentielle. Nous avons montré que cette heuristique ne remet pas en cause les précédents résultats théoriques (cf. [42]).

Détection des cycles Nous avons proposé une solution efficace à ce problème en adaptant l'algorithme "du Lièvre et de la Tortue" introduit par Floyd [38]. Elle consiste à exécuter deux simulations en parallèle, l'une avançant deux fois plus vite que l'autre, et à comparer leurs états jusqu'à l'égalité. Toutefois, cette approche n'est valide que pour les systèmes déterministes. Nous avons proposé une extension de l'algorithme qui explore et construit le sous-graphe récurrent engendré par des agents indéterministes, cf. illustration figure 5.5b et [42]. Cette approche nous a permis de détecter des cycles ou sous-graphes récurrents sur des instances de grandes tailles⁸ (environnements jusqu'à 28x28 cellules avec un agent et jusqu'à 10 agents sur des environnements 10x10). *Plus généralement cet algorithme est un nouvel outil générique qui s'applique à tout SMA discret dans lequel on souhaite détecter une organisation cyclique sur l'information inscrite dans l'environnement et/ou la position des agents.*

Résultats statistiques La simulation a été un outil important dans ce travail pour comprendre les mécanismes d'auto-organisation et mesurer les temps de convergence, ainsi que la nature des cycles.

- Il nous a été possible de détecter systématiquement la convergence d'EVAP sur des grilles au plus de 8x8 cellules avec 3 agents, et jusqu'à 8 agents avec l'heuristique. Au delà, soit les temps de convergence sont trop importants pour faire des statistiques, soit les sous-graphes récurrents sont trop grands pour être construits (en mémoire). Ce dernier point montre que l'indéterminisme génère des organisations complexes (cycles de période très longue), qu'il est impossible de détecter visuellement mais seulement à l'aide de l'algorithme.
- L'augmentation du temps de convergence avec le nombre d'agents se fait de manière irrégulière. Ces irrégularités coïncident clairement avec les situations où la taille de la grille n'est pas divisible

⁸L'espace d'état d'un processus tel qu'EVAP avec A agents sur un environnement de C cellules est exponentiel. Un majorant est $A! \times (T_{vis} + 1)^C$ où T_{vis} est une borne supérieure du temps de couverture de l'environnement.

par le nombre d'agents, c'est-à-dire des situations dans lesquelles l'environnement ne peut pas être facilement divisé en cycles de longueurs égales. Même pour les environnements qui admettent un cycle hamiltonien, les cycles obtenus ne le sont pas nécessairement.

- Dans tous les cas, les cycles ou graphes récurrents générés produisent une oisiveté moyenne optimale ou quasi-optimale. Il est tout aussi important de souligner que ces bonnes performances sont obtenues bien avant la convergence, en pratique dès que la phase d'exploration évoquée plus haut est passée.
- L'exécution d'EVAP, avec ou sans l'heuristique, sur des environnements ayant une topologie irrégulière comme *crosswords* [24] (fig. 5.6a) ou *island* [5] (fig 5.6.b) montre que cette complexité influence fortement les temps de convergence. Par exemple, sur l'environnement *island* qui est un graphe de 50 noeuds, 162 arêtes, et de degré 5, la détection de la convergence n'a pu être possible que jusqu'à 3 agents (en moyenne en 300.000 itérations). Au delà, la combinaison de la complexité de l'environnement et du nombre d'agents rend l'horizon de la convergence difficilement atteignable dans des temps raisonnables.

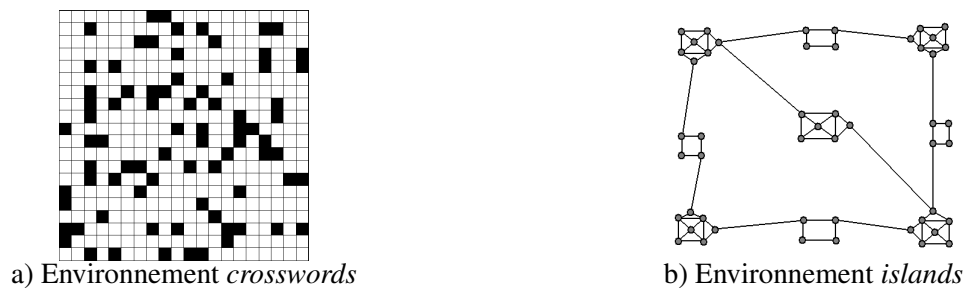


FIG. 5.6 – Deux environnements irréguliers

Ces nouveaux résultats théoriques et expérimentaux sur cette famille d'algorithmes fournis nous ont permis de progresser dans la compréhension des mécanismes d'auto-organisation par marquage, mais aussi dans l'appréhension de la complexité de leur convergence. Ils ouvrent également de nouvelles questions. Peut-on améliorer le modèle EVAP pour qu'il converge plus vite, sans perdre sa nature réactive ? Peut-on, à partir des processus d'évaporation et de diffusion, générer d'autres organisations dynamiques que des parcours cycliques ? Peut-on envisager de traiter d'autres problèmes que ceux de la couverture et de la patrouille multi-agent ?

5.2.3 Applications

Le projet Smart Le modèle EVAP a participé et s'est nourri du projet Smart⁹. Il consistait à étudier la faisabilité d'une approche par intelligence en essaim pour la surveillance d'une zone par des drones semi-autonomes. Nous revenons de façon synthétique sur ces travaux que j'ai coordonnés pour Maia de 2006 à 2009. Les principaux enseignements de cette étude sont :

- Le modèle EVAP s'est avéré transposable dans un simulateur "continu" (granularité des cellules fine comparée à la taille des agents). Pour un rayon de perception de r cellules, l'inscription de la phéromone se fait dans un disque de rayon $r - 1$. La recherche de la plus forte pente de phéromone se fait sur les cellules situées sur le cercle de rayon r . La figure 5.7a illustre ce modèle à travers le simulateur réalisé lors du projet, qui est détaillé dans [64].

⁹Study of MultiAgent Systems for Observation of Theaters and Self-Organisation, projet DGA mené conjointement avec l'ENST Brest, PY Automation et CRIL Technologie.

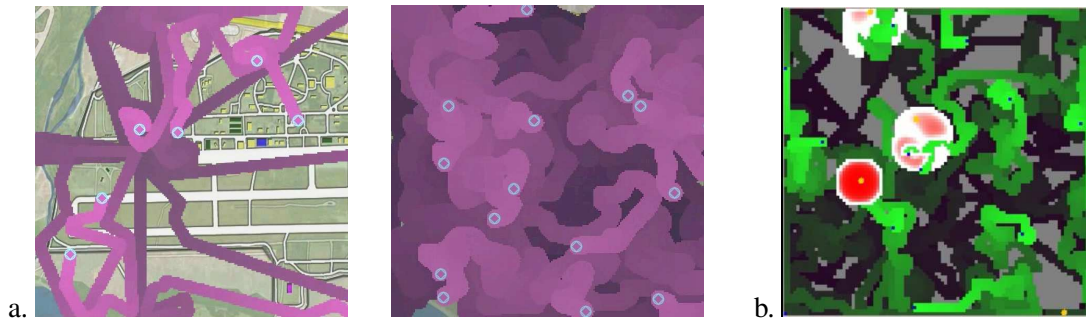


FIG. 5.7 – a. Illustrations de la patrouille dans le simulateur SMAART b. Ajout de la diffusion d’alarme pour la poursuite d’intrus.

- Un important travail de mesure des performances a été réalisé, qui corrobore celles réalisées sur EVAP. On retrouve également une phase initiale d’exploration, sous-optimale, avant d’obtenir une patrouille qui présente d’excellentes performances en oisiveté moyenne. Toutefois l’intégration de perturbations telles que le réapprovisionnement empêche toute convergence vers des cycles stables.
- Nous avons intégré une deuxième phéromone permettant de diffuser des signaux d’alarme, lorsqu’un intrus est détecté. Cela a permis d’étudier des comportements de consommation de la phéromone pour retrouver un intrus (cf. figure 5.7b).
- Cette étude nous a permis d’aborder le problème de l’interaction homme-intelligence en essaim. Il s’agit d’une question clé de la robotique et de l’IA d’aujourd’hui. Comment intervenir dans un système multi-agent auto-organisé, comment lui donner des ordres ? Nous avons focalisé sur la possibilité d’intervenir sur le comportement de chaque drone individuellement (pilotage jusqu’à un lieu). Les mesures de performances et les interviews des opérateurs montrent que tout reste à faire en terme de compréhension et d’interaction avec un système à base de phéromones digitales, cf. [64].

Depuis fin 2009, le projet Smaart et l’étude du modèle EVAP se poursuivent au delà de la thèse d’Arnaud Glad, par le projet Susie¹⁰ (projet DGA co-réalisé avec l’ENST Brest). Celui-ci vise à approfondir l’étude et la mise en œuvre de modalités d’interactions entre intelligence en essaim et opérateurs, mais aussi à progresser dans l’étude et la maîtrise des formes émergentes issues de l’interaction entre agents et phéromones déposées dans l’environnement. Ce travail a débuté par l’établissement d’outils de représentation 2D et 3D des formes générées dans le champ de phéromone dynamique, et par l’implémentation des opérations d’évaporation et de transparence sur carte graphique. L’étude systématique des comportements émergents est au coeur de mes perspectives de recherche, comme cela est détaillé au chapitre 7.

¹⁰Supervision de Systèmes d’Intelligence en Essaim

Chapitre 6

Implémentation et déploiement des modèles

Ce chapitre revient sur le problème de l'implémentation des SMA réactifs sur différents supports. En effet, tout au long de cette deuxième partie nous avons présenté des modèles supposant l'existence d'un environnement actif sur lequel les agents inscrivent et lisent des informations. Se pose alors la question de l'implémentation distribuée et réelle de ces modèles. Nous examinons dans un premier temps leur implémentation sur des supports massivement distribués (en considérant leur écriture sous forme d'automates cellulaires). Puis nous examinons le problème du plongement des modèles dans un environnement réel où les agents sont des robots. Nous terminons en présentant le concept de dalles intelligentes.

6.1 Problématique

Les modèles multi-agents (discrets) sont généralement définis sans donner les hypothèses d'exécution de leurs différents composants (ordonnancement des agents, activation de l'environnement). Si l'on considère les algorithmes 1 et 2 du modèle EVAP présentés au chapitre précédent, leur implémentation par deux programmeurs donnera-t-elle le même résultat ? Il est clair que non. Nous avons identifié trois sources de différenciation : la gestion de l'indéterminisme dans les comportements agents (abordé en section 5.2.2), les hypothèses sur l'activation synchrone ou non des agents et enfin celles du support d'exécution. Si elles ne sont pas maîtrisées, chacune de ces hypothèses peut biaiser l'exécution du modèle, et donc notre compréhension ou notre attente de son exécution.

Nous avons vu au chapitre précédent comment l'indéterminisme peut influencer l'auto-organisation du modèle EVAP. La version déterministe converge systématiquement vers un cycle stable, autrement le système peut converger vers un graphe récurrent composé de cycles transitoires.

La gestion des conflits et du synchronisme dans la simulation des SMA a été abordé par J. Ferber, J.P. Muller et F. Michel autour du modèle Influence-Réaction [36, 77]. Il montre qu'une exécution synchrone permet de clarifier la gestion des conflits et peut mener à la reproductibilité des simulations. Toutefois, tous les supports ne permettent pas nécessairement de se placer dans un tel cadre. C'est ce que nous avons montré dans [44], avec l'étude de diverses implémentations du modèle EVAP, et en particulier avec des robots. En effet, par définition, des robots autonomes ne vont pas agir de façon synchrone (sauf à les avoir synchronisés auparavant) et l'exécution de leur actions élémentaires ne va pas être homogène. Ainsi la propriété de stabilité d'EVAP pour des cycles de même longueur n'est plus vérifiée, due à l'hétérogénéité des transitions.

Nous revenons sur ces divers points en considérant d'abord la question de l'implémentation des SMA réactifs dans le contexte d'exécution synchrone des automates cellulaires (section 6.2), puis nous détaillons

les travaux menés autour de l’implémentation robotique et physique des modèles informatiques inspirés de la stigmergie (section 6.3). D’un point de vue plus général, c’est cette problématique de la reproductibilité des propriétés d’un modèle avec des supports physiques que nous appelons le problème du “passage au réel”.

6.2 Implémentation des SMA réactifs par automates cellulaires

Dans le cadre du post-doc d’Antoine Spicher, que nous avons encadré avec Nazim Fates (INRIA/Maia) en 2008, nous avons abordé la question de la comparaison des systèmes multi-agents réactifs (SMAR) avec les automates cellulaires (AC) dans leur dimensions de modélisation et d’implémentation. Il est clair que l’avènement des supports de calculs massivement parallèles, comme les cartes graphiques, les GPU¹ ou les FPGA², a renforcé ces dernières années l’intérêt des modèles de calcul cellulaires (disons les AC). Or se posent plusieurs questions d’ordre informatique : les AC sont-ils adaptés à la simulation/implémentation de tous les systèmes complexes ? Le sont-ils plus que les SMA réactifs ?

Ainsi, dans un premier temps nous avons établi les avantages de ces deux modèles de calcul/simulation et leur différences. Ces différences s’établissent d’une part en tant qu’outil de modélisation :

- Le modèle des automates cellulaires repose sur une fonction de transition unique exécutée par chaque cellule. Ainsi il se prête bien à la modélisation de systèmes ou d’espaces homogènes (d’où leur emploi pour la simulation de systèmes physiques ou biologiques en particulier).
- Les SMA réactifs sont préférés pour représenter des populations d’entités hétérogènes. Contrairement aux AC ils nécessitent de faire la distinction entre environnement et agents. Ainsi ils permettent de focaliser sur la notion d’action des agents, et donc peuvent couvrir un large panel d’applications.

D’autre part, ils se différencient comme outil de simulation :

- L’approche agent a l’avantage d’être intuitive et naturelle pour modéliser un système du point de vue des entités. Toutefois, l’implémentation de tels systèmes est sujette à de nombreux biais de programmation, comme la question du synchronisme des actions.
- Le modèle des automates cellulaires oblige à considérer le système du point de vue de l’environnement. Toutefois cela force le programmeur à traiter les cas de conflits à l’implémentation, et donne directement une expression massivement distribuée du système.

La force d’expression individu-centrée des SMA d’un côté et l’écriture formelle et distribuée des AC de l’autre, ont motivé la proposition d’un modèle permettant l’implémentation des SMA réactifs discrets dans un automate cellulaire.

Les SMA réactifs et les AC ont en commun d’être fondés sur des entités élémentaires agents/cellules qui agissent/évoluent en fonction de l’état perçu de leur voisinage et de leur état courant. Cependant, dans un automate cellulaire, les cellules ne se déplacent pas comme le font les agents, elles peuvent seulement changer d’état. Notre objectif a été alors de *ré-exprimer les actions des agents sous forme de changements d’états des cellules*. Ces changements étant définis par des règles déclenchées par des conditions sur l’état du voisinage.

Ainsi, nous nous sommes focalisés sur le déplacement d’un agent dans une grille et son écriture sous forme d’un automate cellulaire. Un agent étant modélisé dans l’AC par une cellule dans l’état *agent*. Pour exprimer son “déplacement” sur une cellule voisine, il faut faire passer simultanément l’état de la cellule *agent* à l’état *libre* et l’état de la cellule cible à l’état *agent*. Pour réaliser cette transition, tout en évitant un

¹Graphics Processing Unit

²field-programmable gate array

conflit d'accès avec le reste du voisinage, nous avons établi un "dialogue" entre cellules voisines s'exprimant en 3 phases : *request*, *approval-rejection*, *transaction*.

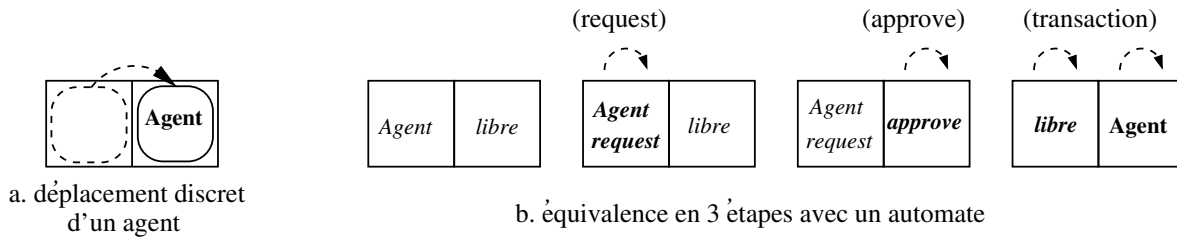


FIG. 6.1 – (a) Déplacement d'un agent dans un modèle discret classique, (b) équivalence dans un automate cellulaire par évolution des états des deux cellules voisines (modèle transactional-CA)

Principe. Toute cellule *agent* souhaitant se déplacer vers une cellule cible passe dans un état de demande *request(cible)*. Cet état, perçu par les cellules voisines peut provoquer dans la cellule cible un changement d'état pour l'acceptation (*approve*) ou le rejet du déplacement (*reject*). Finalement, au pas suivant, si la demande a été approuvée, les deux cellules changent d'état simultanément : la cellule *approve* percevant *request(cible)* devient *agent* et la cellule *request(cible)* percevant *approve* passe dans l'état *libre* (c'est la phase de *transaction*). Ce modèle, que nous avons nommé *transactional-CA* est illustré en figure 6.1b. Les conflits d'accès simultanés à une même cellule sont gérés par un principe d'exclusion, nous n'avons autorisé le déplacement vers une cellule que si elle n'a qu'une demande.

Application. Nous avons appliqué cette approche au modèle DLA (Diffusion-Limited Aggregation³) qui décrit le comportement d'une population d'agents-particules pouvant être fixes ou mobiles et qui s'aggrègent au contact de celles qui sont fixes. Le résultat de sa réécriture est un automate à 20 états. Ce qui est encore raisonnable et donc programmable sur un support massivement parallèle. Une implémentation sur le simulateur d'automates cellulaires Fiatlux⁴ a permis de valider cette écriture et d'étudier les biais induits par l'asynchronisme des mises-à-jour, cf.[114].

Généralisation. Dans l'objectif de généraliser notre démarche de réécriture aux SMAs discrets, nous avons fait le rapprochement entre les 3 phases *request*, *approval-rejection*, *transaction* et le modèle générique multi-agent *influence-réaction* [36]. Il s'agit d'un modèle de simulation à pas de temps constant, où une itération est décomposée en 3 étapes :

- la production d'influences (ou d'intentions) par les agents,
- la résolution des conflits et la combinaison des influences,
- la mise-à-jour de l'état de l'environnement et des agents.

Cette décomposition nous a permis d'étendre notre approche de traduction à tout SMA discret réactif exprimé dans le modèle influence-réaction. Chaque étape du modèle influence-réaction est ré-exprimée et formalisée du point de vue des cellules d'un automate. Ce qui suppose une décomposition des influences et de leur combinaison au niveau de chaque cellule⁵. Ainsi nous définissons un ensemble d'états possibles pour une cellule, composés de la présence/état d'un agent, d'une influence ou de la combinaison d'influences.

³Ce modèle simule la formation fractale de dendrites sur des électrodes lors d'une électrolyse.

⁴Fiatlux, simulateur d'automates cellulaires en Java. <http://webloria.loria.fr/~fates/fiatlux.html>

⁵ce qui consitute la limite actuelle de notre approche, dans la mesure où des modèles agents peuvent présenter des combinaisons d'influences qui ne sont pas calculables localement à chaque cellule.

Puis nous définissons les transitions entre ces états. Les détails de cette méthode formelle de réécriture sont donnés dans l'article [114].

L'analyse de la méthode proposée laisse entrevoir un problème de complexité sur le nombre d'états potentiellement générés par la traduction. Face à ce problème nous envisageons de développer un programme de traduction automatique d'un SMA discret vers un AC. En attendant un tel outil, ce travail montre que la transposition de certains SMA en AC est réalisable. Mais nombre de modèles agents, de part leur nature continue ou leur complexité (richesse des actions, des perceptions, des combinaisons d'actions) semblent difficilement accessibles à l'écriture et l'étude par un automate cellulaire. Cela nous renvoie au besoin de définir des formalismes, voire des langages, pour représenter et exécuter les modèles multi-agents.

Dans la section qui suit, nous envisageons l'exécution de ces modèles, non plus dans un modèle de calcul, mais dans l'environnement réel. Il s'agit d'étudier comment les modèles bio-inspirés présentés au précédent chapitre peuvent s'implémenter avec des robots et des environnements réels. Il s'agit de revenir à la question initiale énoncée par Brooks, pouvons-nous concevoir des robots-fourmis ?

6.3 Vers des environnements actifs réels

6.3.1 Enjeux et verrous

Sur le plan scientifique, la problématique est de savoir si les modèles discrets inspirés de la stigmergie sont implémentables avec des robots dans un environnement réel tout en conservant leurs propriétés. Sur le plan technologique, il s'agit de concevoir ou d'augmenter des environnements réels pour permettre leur marquage et leur lecture par des robots mobiles et les rendre actifs. Si nous parvenons à définir de tels dispositifs alors un grand nombre de modèles, jusqu'à présent seulement simulés, pourront être déployés, et de nouveaux algorithmes pour la robotique et l'intelligence ambiante pourront être envisagés. *Il s'agit de passer d'une intelligence située dans un monde virtuel à une intelligence située dans le monde.*

Depuis dix ans, ces questions ont été abordées par étapes en robotique et en IA. Tout d'abord à travers le déploiement de réseaux de capteurs sans fils ou de tags RFID placés dans l'environnement, cf. [63, 68]. La technologie RFID, qui par définition est passive⁶, ne permet toutefois pas d'élaborer des environnements actifs. Puis au milieu de la décennie les équipes de T. Watanabe [57] et de G. Theraulaz [39] ont proposé des dispositifs permettant l'affichage de phéromones digitales au sol ou sur des robots par un projecteur surplombant l'environnement. Ce type de dispositif *centralisé* permet d'étudier des comportements de suivi de champs ou de marques sur de petits environnements. L' "écriture" d'informations dans l'environnement par les agents requiert un moyen de tracking des robots (en général une caméra) ou de réception des signaux qu'ils émettent. L'écriture se fait donc de façon indirecte et centralisée.

Ainsi nous avons engagé, dès 2007, l'étude d'un modèle générique d'environnement actif distribué capable d'interactions directes et locales avec des robots mobiles autonomes. Ce modèle, nommé dalles intelligentes (ou i-Tiles), et les premières expérimentations réalisées avec un des robots mobiles et un émulateur sont présentées ci-après. Très récemment, on constate que l'idée de grille/réseau de capteurs installés dans le sol est en pleine émergence. Dans ces travaux, des tags RFID passifs sont utilisés pour faciliter des tâches de navigation robotique [87], pouvant utiliser un marquage de phéromones artificielles [49].

⁶un tag ne s'active que sous l'effet d'un signal émis par une source d'énergie

6.3.2 Dalles intelligentes

Ce modèle repose sur un réseau régulier de noeuds interconnectés qui couvrent le sol d'un environnement que l'on souhaite rendre actif. Chaque noeud prend la forme d'une dalle munie d'un processeur et de capteurs pour interagir avec ses 4-voisines et avec un éventuel agent situé sur elle (cf. fig. 6.2a). Les dalles ne sont pas nécessairement synchronisées, elles fonctionnent comme des processus réactifs autonomes.

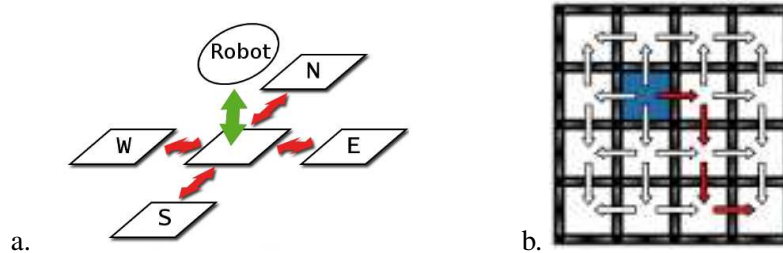


FIG. 6.2 – a. Principe d'une dalle intelligente b. Principe de diffusion dans un réseau de dalles

- En 2008, dans le cadre du stage de Master 2 Recherche de Nicolas Pepin, nous avons proposé un protocole de communication et d'exécution de chaque dalle. Nous avons alors développé un simulateur discret de dalles et de robots ayant permis une première validation du modèle en transposant les modèles EVAP et Satisfaction-Altruisme dans ce paradigme. Ces travaux ont été publiés dans [94].
- Puis en 2009, lors du stage de Master 2 de Romain Mauffray, nous avons conçu un émulateur de dalles permettant de faire évoluer des robots mobiles sur une grille de dalles fictives (cf. ci-après). Ceci nous a permis de réaliser un certain nombre d'expérimentations et d'établir des algorithmes de communications par diffusion (cf. principe fig. 6.2b), présentés dans [104].

L'ultime étape de cette conception, consistant à créer un véritable réseau de dalles physiques et électroniques est en cours. En effet nous venons d'obtenir le soutien financier de la région Lorraine et de l'INRIA pour mener cette étude dans le cadre du CPER, et le premier réseau de dalles devrait être installé et testé en fin d'année 2010.

L'émulateur permet d'exécuter sur une machine les N processus de N dalles. Chaque processus consomme les messages arrivant sur sa file de réception et déclenche des comportements simples non bloquants (diffusion d'un message au voisinage, stockage/lecture d'une donnée dans la dalle, etc. cf. [94]). Chaque dalle possède également un processus auxiliaire qui gère la partie active de l'environnement, c'est-à-dire les opérations récurrentes (par exemple l'évaporation d'une phéromone toutes les k ms). L'interaction entre un robot mobile et les dalles se fait à la fois par la perception du quadrillage au sol et par la communication sans fil avec la machine émulant les dalles, cf. illustrations figure 6.3. Les principaux résultats et travaux réalisés avec cet émulateur sont résumés ci-dessous :

- Passage d'un modèle de déplacement discret sur une grille à un déplacement avec des robots réels. Pour cela, les robots se déplacent depuis et vers le centre des dalles, en intégrant une correction de la dérive. Nous avons proposé un modèle original qui mesure la dérive latérale et angulaire du robot à chaque franchissement (par lecture d'un gradient inscrit sur la frontière) et les corrige, cf. [104].
- Gestion des accès simultanés à une dalle par un système de réservation. Chaque robot demande à la dalle cible de lui réserver sa venue avant tout déplacement, cf. [94].

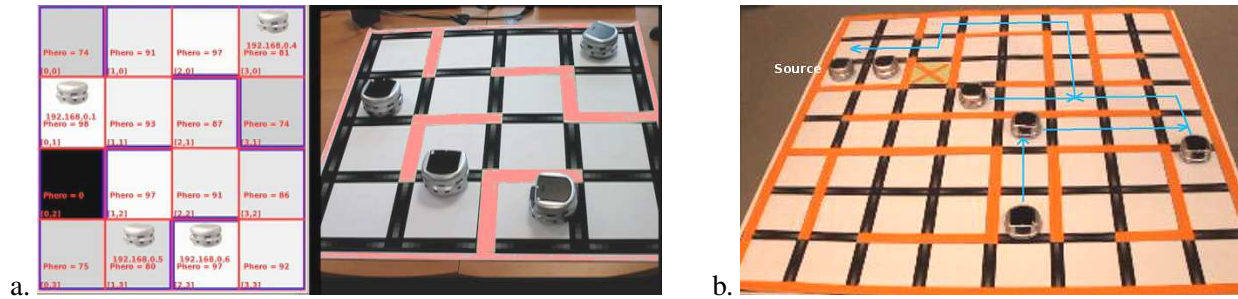


FIG. 6.3 – (a) Exécution du modèle EVAP avec des robots Kheperas III et l’émulateur de dalles (b) Planification dynamique de chemins par diffusion de messages dans les dalles.

- Implémentation et validation robotique du modèle EVAP avec les deux types de marquage : phéromone (les dalles stockent et évaporent la phéromone) et date courante. La figure 6.3a illustre le fonctionnement d’EVAP avec dépôt de phéromone (à gauche copie d’écran de l’émulateur, la quantité de phéromone décroît du blanc au noir). La propriété de patrouille est vérifiée, par contre celle de convergence du système vers un cycle stable ne l’est plus (propriété présentée en Section 5.2.2). En effet, les transitions d’une dalle à une autre par les robots n’étant pas homogènes (vitesses, rotations), un robot peut réaliser un parcours cyclique plus long qu’un autre dans le même temps et donc rompre un équilibre acquis, cf. détails dans [44].
- Algorithmes décentralisés de diffusion (broadcast) de signaux/messages. Le principe est que chaque dalle redistribue tout nouveau message vers ses voisines. L’intégration d’un compteur de “sauts” de dalles permet de borner le rayon de diffusion. La mémorisation très limitée dans le temps des messages permet une mise à jour des diffusions, donc des chemins suivis, et par conséquent fournit un algorithme de replanification dynamique. La figure 6.3b montre des robots remontant le gradient diffusé depuis une source, où la topologie a été changée online (dalle avec croix condamnée), cf. [104].

6.3.3 Conclusion

En conclusion, nous pensons qu’instrumenter le sol d’un réseau de dalles actives et communicantes ouvre une nouvelle forme de robotique, basée sur la coopération indirecte entre robots. Nos premiers travaux montrent que cette démarche est à la fois robuste (les dalles forment un réseau dense et redondant) et ouverte à de nouveaux algorithmes de communication et de perception pour les robots et les agents situés. Il s’agit aussi de pouvoir réécrire et implémenter de nombreux modèles centralisés ou cantonnés jusqu’à présent à la simulation. Nous revenons sur les perspectives de ce projet dans le prochain chapitre.

Troisième partie

Perspectives

Chapitre 7

Perspectives de recherche

Mon projet de recherche vise à progresser dans la compréhension, la définition et l'implémentation de l'intelligence collective (IC), au travers d'une démarche pluridisciplinaire reposant sur l'étude de modèles informatiques et robotiques s'inspirant des mécanismes d'auto-organisation présents dans la nature.

L'objectif central, à long terme, est de développer des comportements permettant à un grand nombre d'agents situés de coopérer et de s'auto-organiser en temps réel dans des environnements dynamiques et incertains.

Avant d'exposer des pistes de recherches, nous positionnons cette problématique dans le cadre des travaux menés en informatique et en robotique au plan national et international.

7.1 Positionnement scientifique

La compréhension et la définition des systèmes collectifs est un enjeu central en informatique mais aussi dans d'autres disciplines. Les systèmes multi-agents réactifs bio-inspirés constituent une approche récente en IA et robotique, et le nombre d'équipes engagées sur cette voie reste limité. Ainsi je positionne mes travaux dans un cadre plus large, celui des systèmes complexes et autonomes, car la problématique est par définition pluridisciplinaire et hérite d'une histoire aux parentés multiples.

Systèmes complexes L'étude des processus d'auto-organisation, et plus généralement des systèmes complexes, est essentiellement présente aux Etats-Unis et en Europe. Ceci s'explique par l'origine américaine des deux courants fondateurs : d'un côté celui des physiciens de l'Université de Santa Fé, qui dans les années 70 observent et étudient le comportement des systèmes non linéaires continus (cf. [45]), et de l'autre, celui de la vie artificielle qui émerge des travaux de mathématiciens, de biologistes et d'informaticiens autour des automates cellulaires (systèmes de forme discrète). Je ne développe pas de présentation des laboratoires de physique qui aujourd'hui poursuivent des recherches sur la modélisation des systèmes complexes (ou non linéaires). Notons toutefois que les travaux d'Ilya Prigogine sur les systèmes chaotiques [95, 96] ont fortement influencé ce domaine de recherche. Je présente ci-après un positionnement de mes travaux dans une perspective plus centrée sur l'informatique, la robotique et la vie artificielle.

Vie artificielle La vie artificielle a pour origine les automates cellulaires (AC), créés par John von Neumann dans les années 40¹. Sur ces bases, John Conway propose en 1970 le jeu de la vie, qui est le premier système artificiel qualifié de système complexe organisé. Dans les années 80, la vie artificielle prend diverses formes, dont en particulier celles du connexionnisme et du calcul parallèle sous l'influence des travaux de Marvin Minsky au MIT [78] et de biologistes comme Francisco Varela². De nombreuses équipes aux Etats-Unis et en Europe poursuivent aujourd'hui l'étude des phénomènes d'auto-organisation dans les automates cellulaires mais aussi de leurs propriétés liées au parallélisme (comme par exemple au LIP de l'ENS Lyon et à l'institut des systèmes complexes qui en émane). Notons aussi le développement récent des cartes multi-processeurs massivement parallèle, qui fait émerger la notion de calcul spatial (ou d'amorphous computing) qui se situe à la rencontre des AC, des réseaux de neurones et de la biologie moléculaire.

Systèmes collectifs A la fin des années 80, Luc Steels et Jean-Louis Deneubourg en Belgique, Jacques Ferber, Eric Bonabeau et Guy Theraulaz en France, reproduisent le comportement collectif des sociétés d'insectes par des simulations individus-centrées. Ils montrent qu'un comportement individuel très simple (réactif) peut engendrer dans un collectif, sous l'effet d'une multitude d'interactions, un comportement global intelligent résolvant un problème complexe [16, 35]. Ce sont les bases des systèmes multi-agent réactifs (SMAR), qui font le lien entre automates cellulaires et entités incarnées. En effet les agents sont des entités, et non des cellules, qui évoluent spatialement et interagissent dans un environnement physique (continu ou discret) selon leur perceptions locales. Depuis, L. Steels et J.L. Deneubourg animent à l'Université Libre de Bruxelles des équipes focalisées sur l'étude et la modélisation des phénomènes émergents dans les systèmes collectifs naturels et hybrides. A l'Université Paris 6, Jacques Ferber a contribué avec Alexis Drogoul au développement de la résolution collective de problèmes. Aujourd'hui ils animent des équipes respectivement au LIRMM³ et à l'IRD⁴ centrées sur la simulation multi-agent, la robotique mobile et les sciences cognitives. Plus généralement une "école française" de modélisation et simulation multi-agent des systèmes complexes est apparue dans les années 90. Mentionnons les équipes SMAC à Toulouse, MAGMA à Grenoble, GREEN à Montpellier (CIRAD), MAIA à Nancy (INRIA) et le groupe SMA du LIESP à Lyon. Cette démarche de simulation des systèmes collectifs est également menée aux Etats-Unis, sous l'influence des travaux de Reynolds⁵, mais aussi dans les années 90 par les travaux de Van Parunak. Ce dernier analyse les mécanismes d'auto-organisation fondés sur les phéromones digitales [91] pour définir le principe d'un modèle de calcul distribué [90]. Au début des années 2000, I. Wagner⁶ propose et formalise un ensemble d'algorithmes fournis pour la couverture et la patrouille d'un graphe [119]. Plus récemment, en Italie Marco Zambonelli adapte ce type d'approche à des réseaux de communications pervasifs. Notons qu'en Europe ce courant de l'IA collective s'inscrit dans le domaine de l'informatique, alors qu'aux Etats-Unis il se positionne tout autant en robotique et fait émerger le domaine de la robotique collective.

Robotique collective Les travaux en robotique collective naissent avec les recherches de Rodney Brooks au début des années 90. Pour lui, il est évident que le problème est de passer des fourmis aux robots-fourmis. Ce sont deux types d'entités évoluant dans un environnement physique, et de ce fait, leur dimension physique ne peut être ignorée (c'est la notion d'*embodiment* [21]). Le défi de la robotique collective est vaste, il

¹Il découvre entre autre le principe d'autoréplication

²co-inventeur avec H. Maturana du principe d'autopoïèse. Le terme autopoïèse vient du grec auto (soi-même) et poièsis (production, création). Il définit la propriété d'un système à se produire lui-même et à se maintenir.

³Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier, CNRS / Université Montpellier 2

⁴Institut de Recherche pour le Développement, Hanoi (Vietnam) et Paris

⁵ Il s'agit de la simulation du vol en essaim, inspiré de celui des oiseaux, modélisé par les boïds de Reynolds [97]

⁶Center for Intelligent Systems, Technion et IBM Haifa Research Laboratory, Israel

nécessite l'étude des mécanismes d'auto-organisation sous-jacents et leur modélisation informatique, leur intégration "mécatronique", et leur évaluation sur des problèmes de robotique concrets et large échelle. C'est dans ce défi que s'inscrit mon projet. Avant de présenter le positionnement de mes perspectives, il convient de considérer les avancées du domaine à ce jour. Les années 90 ont été marquées par l'identification et la reproduction sur robots de comportements assez simples basés sur leurs perceptions et des architectures réactives [20, 7] ou apprenantes [72] (regroupement [73], navigation en groupe [9], flocking⁵, box-pushing, exploration, etc.). Plus généralement, la démarche de la reproduction du comportement animal donne lieu à l'étude des *animats* (cf. séries *From animals to animats*⁷, 1990 à 2010). Dans les années 2000, le défi a été de définir des interactions plus évoluées et directes entre robots pour leur permettre de s'assembler, s'auto-reconfigurer, se synchroniser (cf. e.g. [37], [34]). Ces comportements pouvant être obtenus par des approches évolutionnaires ou d'apprentissage, cf. [18]. Ils réalisent alors des fonctions de locomotion ou de construction de structures, mais traitent rarement les problèmes classiques de la robotique.

Positionnement de mon projet de recherche Le défi de la robotique collective, et plus généralement de l'intelligence collective, est aujourd'hui de parvenir à coordonner un nombre important d'agents/robots pour réaliser une tâche et s'adapter aux conditions variables d'un environnement dynamique et inconnu (ou partiellement connu). L'approche que je souhaite poursuivre repose sur la notion de coordination par champs (de forces, de potentiels, de phéromones, etc.). C'est une approche bio-inspirée⁸ qui réfère aux champs d'information dynamiques inscrit dans l'environnement (phéromones digitales) et aux signaux émis/perçus directement par les agents. Ils définissent de façon générale deux moyens d'interaction entre agents, qui sont soit directs (signaux), soit indirects via l'environnement (marques).

Mon hypothèse est que ces interactions doivent être le composant central définissant un système en essaim, présentant des capacités d'auto-organisation, de communication et de coopération. Ces fonctionnalités permettent alors l'émergence de comportements globaux complexes, bénéficiant de propriétés de robustesse et d'adaptation face aux variations de l'environnement.

Le projet vise à relever principalement deux verrous. Le premier est d'étendre le paradigme des phéromones digitales, reproduisant les processus observés chez les insectes sociaux, à une approche plus générique et maîtrisée des champs dynamiques dédiés à l'organisation des agents et à la résolution de problèmes spatiaux. En focalisant sur des modèles de champs discrets, où l'espace est une grille, cette démarche vient en complément des modèles reposant sur des fonctions continues et/ou globales (e.g. [55, 48]).

Le second verrou visé est le problème du passage au réel de ces modèles, c'est-à-dire de leur déploiement robotique et large échelle. Il s'agit par exemple de rendre possible le marquage de l'environnement par un robot comme peut le faire un insecte avec une phéromone. Le domaine reste encore cantonné à des modèles théoriques ou simulés, qu'il est impossible d'instancier dans un contexte réel. Ainsi nous proposons de nouveaux outils et de nouveaux modèles permettant de les plonger dans un environnement physique réel, et de progresser vers l'idée des robots-fourmis de Brooks. L'avènement de l'intelligence ambiante, basée sur les réseaux de capteurs/noeuds [69] d'un côté, et de l'amorphous computing (calcul massivement parallèle) de l'autre, ouvre de nouvelles voies à ces problèmes.

Enfin, le projet vise à proposer des solutions innovantes et robustes au déploiement de flottilles (ou essaims) de robots dans le cadre de problèmes spatialisés complexes mettant en jeux des interactions entre de nombreux agents, robots et éventuellement individus. Nous mentionnerons dans ce qui suit différentes applications visées.

⁷Co-édité en particulier par Jean-Arcady Meyer, qui a dirigé en France l'Animat Lab du LIP6 et a été moteur dans l'approche connexioniste

⁸inspirée également de la physique

Ce projet de développement de la robotique collective rejoint les objectifs affichés par le DISAL⁹ de l'EPFL, le Bristol Robotics Laboratory, le Distributed Robotics Laboratory au MIT, l'équipe de W. et D. Spears à l'Université du Wyoming, le projet Pheromone Robotics du HRL Lab.¹⁰, le projet FlockBots du GMU¹¹, l'équipe de G. Théraulaz au CNRS à Toulouse et celles de J.L. Deneubourg et M. Dorigo à l'ULB.

Nous détaillons maintenant le projet envisagé. Celui-ci s'organise en trois parties :

- Modèles d'organisation et de résolution par champs dynamiques
- Problème du passage au réel : contrôle d'essaims de robots
- Vers une informatique située

7.2 Modèles d'organisation et de résolution par champs dynamiques

Objectifs. Une question centrale aujourd'hui de l'intelligence collective est de définir des briques élémentaires de résolution de problème s'inspirant des processus stigmergiques du vivant, qui sont le marquage, la diffusion et l'évaporation d'informations dans l'environnement. Ces processus, utilisés par les fourmis pour établir des chemins, ont inspiré pour l'essentiel des algorithmes d'optimisation de chemins dans un graphe (ACO [31]), de patrouille/exploration multi-agent [124] et de diffusion d'information [100]. Je souhaite examiner la possibilité de traiter d'autres problèmes par ces mécanismes, en particulier, en étendant l'expression et la sémantique de ces mécanismes standards. Il s'agit d'établir une véritable typologie des patterns d'organisation qu'ils peuvent générer, et d'étudier leur utilisation dans le cadre de la résolution de problème.

Pistes pour la définition de nouveaux patterns. Le travail que nous avons mené sur le marquage d'environnements discrets, avec des marques numériques ou des phéromones digitales (Partie 2), revient à constituer des champs stables ou dynamiques dans l'environnement. Ces champs, construits par les agents, leur permettent d'évoluer et de s'organiser dans l'environnement, à partir des comportements réactifs de montée/descente du gradient, de suivi d'isolignes, etc. Par exemple, le pattern de patrouille EVAP (Section 5.2) est défini par la combinaison *<évaporation, descente du gradient>*.

La dynamique des champs, c'est-à-dire leur évolution propre, repose sur les processus de diffusion et d'évaporation, calculés régulièrement en chaque cellule de l'environnement. En supposant une grille de connectivité 4, où la quantité de phéromone dans une cellule (x, y) est notée $q(x, y)$ et la quantité à l'itération suivante q' , on définit :

- l'évaporation :

$$q'(x, y) = \rho \cdot q(x, y) \quad (7.1)$$

- la diffusion :

$$q'(x, y) = (1 - \alpha) \cdot q(x, y) + \frac{\alpha}{4} \cdot (q(x - 1, y) + q(x + 1, y) + q(x, y - 1) + q(x, y + 1)) \quad (7.2)$$

avec ρ et $\alpha \in [0, 1]$

⁹Le Distributed Intelligent Systems and Algorithms Laboratory, EPFL (Suisse), intègre le Swarm-Intelligent Systems Group (SWIS) fondé en 2003 à l'EPFL et le Collective Robotics Group (CORO) fondé en 2000 au California Institute of Technology USA

¹⁰HRL, Information and systems sciences Lab (ISSL), Malibu CA, USA (D. Payton)

¹¹George Mason University, Eclab, USA (L. Panait, S. Luke)

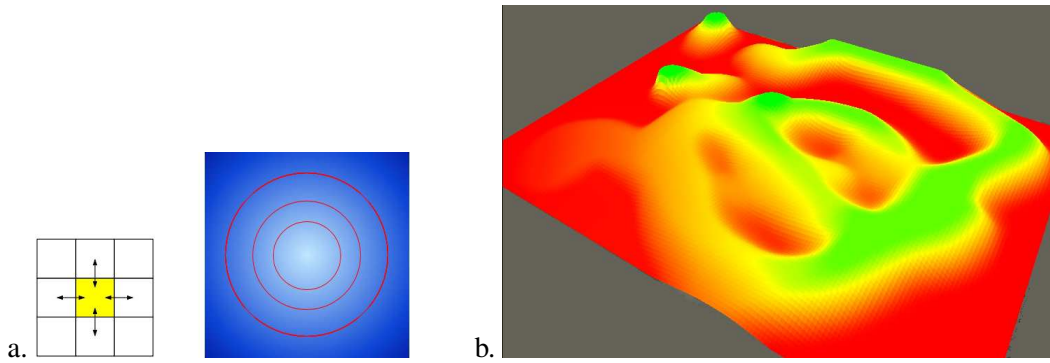


FIG. 7.1 – a. Principe de diffusion b. Illustration 3D d'un champ de phéromones évoluant par évaporation

L'opération d'évaporation est simple, c'est une suite qui calcule la fonction exponentielle $q_t = \rho^t \cdot q_0$, qui converge vers 0 pour $\rho < 1$. Son rôle est d'effacer progressivement l'information inscrite dans l'environnement (cf. fig. 7.1b). La diffusion est plus complexe à appréhender, elle s'apparente à l'expression discrète de la diffusion de la chaleur, elle tend à étaler l'information de façon uniforme (cf. fig. 7.1a). Il me semble alors pertinent d'étendre cette sémantique, en explorant d'autres formes de dynamiques d'évolution des champs.

Ainsi, il sera intéressant de remplacer le coefficient du processus d'évaporation par une fonction du temps, de l'espace ou d'une commande. Ceci permettant d'accélérer/ralentir l'évaporation dans le temps (t), en certaines cellules (x, y), ou encore par l'action d'un opérateur (commande notée u). En généralisant, la formule 7.1 devient $q'(x, y) = F(t, u, x, y) \cdot q(x, y)$. Par exemple, dans le modèle EVAP, certaines zones pourraient devenir plus attractives en élevant leur coefficient d'évaporation (ces zones s'évaporant plus rapidement).

De façon plus générale, on étudiera des fonctions complémentaires de l'évaporation pour générer de l'information dans les cellules. On s'intéressera en particulier aux suites périodiques, qui semblent de bons candidats pour définir des *générateurs d'informations* selon un rythme donné.

Concernant la diffusion, une piste est de propager l'information de manière non nécessairement circulaire, pour générer des champs de formes variées. Pour cela, dans la formule de diffusion 7.2, il sera intéressant de considérer un coefficient indépendant pour chacune des 4 directions, au lieu d'une diffusion homogène de coefficient $\frac{\alpha}{4}$. Ainsi nous devrions pouvoir générer des "couloirs" dans une direction donnée. Il s'agira alors d'étudier les comportements réactifs permettant aux agents de les suivre, pour être orientés ou guidés dans l'espace.

Au delà de l'extension de ces deux processus de référence, l'objectif sera d'étudier de nouvelles fonctions d'évolution des champs, qui soient basées sur des opérations locales aux cellules. On s'intéressera également à identifier et définir les comportements réactifs permettant aux agents d'interagir avec ces dynamiques spatiales ; afin d'établir des patterns organisationnels permettant de coordonner les agents à la réalisation de tâches spatialisées. A plus long terme, il s'agira de généraliser cette approche pour établir un langage de programmation des processus de résolution collectifs fondés sur le marquage de patterns spatiaux dynamiques. Cette démarche s'inscrit dans la recherche actuelle de langages de programmation de systèmes multi-agents ou cellulaires permettant la génération de formes ou d'organisations selon les principes du vivant (cf. [30, 14, 34]). Notre proposition étant de focaliser sur la génération de patterns orientés résolution de problème.

Vers la preuve d’algorithmes collectifs Nous avons montré dans la deuxième partie du mémoire que le paradigme de résolution de problème par marquage de l’environnement pouvait générer des solutions efficaces, voire optimales, tout en présentant des propriétés d’auto-organisation et de robustesse (à la variation du nombre d’agents, au bruit). Toutefois, l’absence de méthodologie de construction de tels algorithmes et la non maîtrise – par définition – des processus émergents en font un vaste champ de recherche.

En particulier, cela motive la question de la **validation formelle des algorithmes**. Il s’agit de s’intéresser à la preuve de résolution (convergence du processus) ou des propriétés du système (robustesse du système, des structures construites, ou des organisations). Le domaine propose peu d’outils méthodologiques ou formels pour les aborder. Je me suis attaché, depuis ma thèse, à explorer des solutions fondées en particulier sur les méthodes formelles (à l’UTBM et au LORIA [52, 53, 112]) et sur la preuve mathématique ou algorithmique (e.g. [43]). Les perspectives d’une telle démarche sont d’approfondir :

- La définition d’une méthodologie de preuve incrémentale, basée sur le raisonnement par récurrence. Il s’agit de considérer l’évolution progressive d’une propriété ou d’une structure du système, sous l’action répétée des agents (les actions étant interprétées comme des opérateurs mathématiques appliqués à des ensembles modélisant une propriété ou une structure). C’est une démarche qui a été fructueuse dans l’étude de la construction collective de champs de potentiels, cf. [105].
- Egalement, je souhaite poursuivre des collaborations sur la spécification formelle de ces systèmes, en particulier en développant des expressions formelles du modèle générique multi-agent Influence-Réaction [36, 77], qui permettrait d’étudier les propriétés de ces systèmes à l’aide des outils de preuve existants (prouveurs).

7.3 Problème du passage au réel : contrôle d’essaims de robots

Problématiques Nous avons souligné plusieurs fois dans le mémoire que l’intelligence collective se heurte actuellement au problème du ”passage au réel”. C’est-à-dire comment passer de travaux quasi exclusivement en simulation à des systèmes réels, robotisés, plongés dans un environnement bruité et imparfait ? Ce frein a plus précisément deux sources : les hypothèses faites sur les capacités des agents, et celles faites sur l’environnement dans lequel ils évoluent. En effet les modèles de SMA réactifs supposent généralement que les agents sont capables de communiquer entre eux localement ; de se déplacer sans dérive, souvent dans une grille et à la même vitesse ; enfin d’identifier un autre agent parmi les éléments de l’environnement (perceptions parfaites). Or toutes ces fonctionnalités ne sont pas triviales en robotique, elles font même pour la plupart l’objet de recherches (communication, perception et localisation parfaites). Le problème est encore plus profond avec le rôle de l’environnement. En effet, les agents sont supposés pouvoir écrire et lire des informations dessus, et éventuellement, si celui-ci est actif, il doit pouvoir réaliser des opérations. Là encore, ces fonctionnalités ne sont pas disponibles dans un environnement réel standard.

On le voit, implémenter l’intelligence collective dans un cadre réel est un défi important qui nécessite le développement de fonctionnalités nouvelles sur les robots et les environnements actuels. Nous présentons ci-après plusieurs pistes pour progresser sur cet objectif. Dans un premier temps, nous présentons dans cette section un dispositif expérimental générique permettant d’aborder les modèles de contrôle par champs continus ou discrets inscrits dans l’environnement. Dans la prochaine section, nous présenterons un modèle permettant de déployer à large échelle les modèles reposant sur un environnement discret actif.

Nouveau dispositif expérimental Le dispositif envisagé a pour vocation l’étude des interactions entre robots mobiles et modèles de marquage/lecture/calcul dans l’environnement. Il s’agit de faire évoluer

de véritable robots sur un environnement actif capable d’affichage et d’interaction. Cet environnement expérimental sera composé (cf. Fig. 7.2a) :

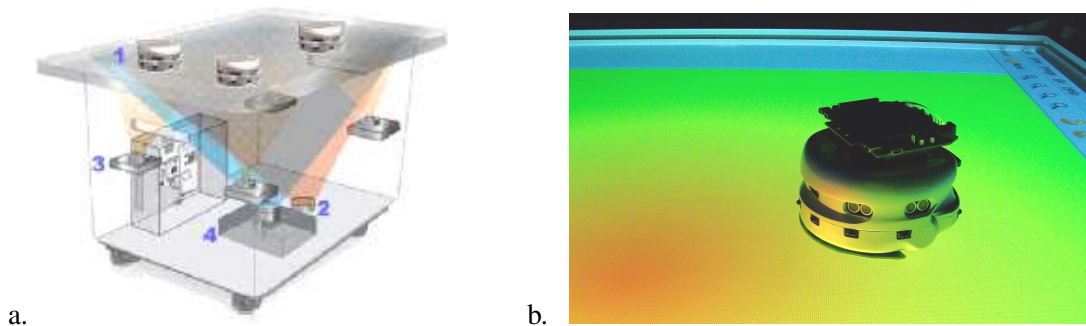


FIG. 7.2 – a. Principe du dispositif de table interactive pour robots b. Prototype de test

- d’une surface interactive permettant l’affichage d’informations/images et la perception (ou le tracking) d’objets placés à sa surface,
- de mini-robots mobiles évoluant à sa surface et capables de lire et écrire dans cet environnement.

L’écriture d’informations par les robots pourra se faire par émission active de signaux vers des caméras infrarouges placées sous la surface.

Un tel dispositif permettra ainsi de mettre en interaction des robots réels avec un environnement actif physique et reprogrammable. Il sera dédié à l’étude *in situ* des processus stigmergiques, et plus généralement aux modèles de coopération et de communication via l’environnement, avec des robots.

Ce dispositif nous permettra d’aborder des questions originales en robotique, en particulier celle de la *perception* d’un champ de phéromone, ou de potentiel, par un robot évoluant sur une telle surface/image. Il s’agira de mettre en relation la dynamique d’évolution des champs avec le déplacement continu des robots (vitesse, fréquence de perception). La mesure des couleurs affichées sous le robot, par des capteurs colorimétriques, constituera la première forme d’acquisition d’informations étudiée. Au niveau de la table, nous étudierons le codage et la représentation de signaux (infrarouges, chimiques), de champs de potentiels, de forces, etc. Nous viserons aussi à établir des fonctionnalités permettant la détection, la mesure et l’optimisation des propriétés émergentes d’un essaim de robots.

Cette proposition se distingue des dispositifs expérimentaux de T. Kazama [57] et G. Theraulaz [39] qui utilisent une projection d’images par dessus les robots. Dans ces approches, l’information perceptible par les capteurs placés sur les robots est limitée (niveau d’intensité lumineuse) et bruitée par la lumière ambiante et les phénomènes d’ombre. Dans notre cas, les robots pourront lire précisément avec des capteurs colorimétriques les nuances affichées sur la surface. Un opérateur pourra de plus interagir avec le système en utilisant la surface tactile, mais également en ajoutant des objets ou des robots sans gêner leur perceptions.

Nous avons lancé l’étude d’un prototype fin 2009, dans le cadre d’une action de développement INRIA nommée ROMEA¹². Le dispositif réalisé par le SED¹³ sera opérationnel fin 2010, mais les premiers tests expérimentaux confirment déjà le potentiel scientifique de ce dispositif expérimental (cf. fig. 7.2b).

¹²Robotique Mobile et Environnements Actifs

¹³Service d’Expérimentation et de Développement de l’INRIA Nancy Grand Est

Etude et définition de comportements collectifs Ce dispositif nous permettra d'étudier et/ou d'implémenter différents comportements collectifs avec une flottille de robots, fondés sur différents modes de communication (diffusion de signaux continus/discrets, marques numériques, phéromones digitales, etc.). Les principales problématiques que nous aborderons à court terme sont :

- Navigation et coordination par signaux
 - L'étude de la coordination de robots par combinaison de signaux, abordée dans [111], sera poursuivie. En particulier on étudiera la combinaison d'attracteurs sur la table en remplaçant les signaux physiques par des représentations graphiques. Plus généralement, la table constituera un nouvel outil d'étude, individu centré, venant en complément d'approches centrées sur le vivant (e.g. [47]).
 - Les travaux que nous menons depuis 2008 sur le déplacement en convois décentralisés (platooning), cf. [101], constituent un cadre d'étude réaliste à la navigation inspirée du flocking. La table interactive va nous permettre de poursuivre la recherche de modèles sûrs et robustes, en élaborant en particulier des fonctions de mesures des erreurs latérales et longitudinales.
- Exploration d'environnements inconnus
 - Concernant les stratégies d'exploration, nous visons à poursuivre l'étude des techniques fondées sur la construction collective de gradients [105] et à examiner leur expression avec des robots réels.
 - La table nous permettra de générer facilement la représentation de nombreux environnements tests, voire de les faire évoluer pendant la mission pour simuler l'exploration d'un environnement de grande taille (ou infini !).
 - En déposant des objets sur la table, nous pourrions étudier simultanément l'utilisation d'autres capteurs (e.g. télémètres lasers), et comparer en temps réel, par exemple, la construction d'une carte avec l'environnement réel.

7.4 Vers une intelligence située

Objectifs. Cette partie du projet vise à établir des modèles de robotique collective, fondés sur un environnement actif, qui soit déployable en environnement réel sur une large échelle. Il s'agit d'aller vers une nouvelle forme de robotique, fondée sur l'interaction d'un grand nombre d'entités avec leur environnement, celui-ci proposant de nouvelles fonctionnalités.

Environnement distribué. L'objectif principal est de définir un support de calcul qui soit avant tout un modèle d'environnement *distribué*, déployé physiquement, capable de calcul et d'interactions avec des agents situés, c'est-à-dire avec des robots et des individus. Il s'agit d'établir un véritable modèle de calcul par l'environnement mettant en interaction deux dynamiques, celle d'un réseau de cellules inter-connectées (l'environnement) et celle des agents et des objets évoluant dessus (cf. illustration fig. 7.3).

L'idée centrale est de faire de chaque cellule de l'environnement un nœud de calcul, de communication et de perception locale, autrement dit, un agent réactif fixe. L'environnement constitue lui même un réseau cellulaire (ou automate cellulaire) intégrant une dimension supplémentaire (que je qualifierai de verticale) d'interaction avec des agents physiques mobiles sur le réseau. Ces agents pourront exploiter cette structure intelligente à partir de n'importe quelle cellule, *sans avoir besoin d'être localisés globalement dans le réseau* (même si cela pourra être programmé).

Sur ces bases, l'objectif sera de faire de cet environnement actif une véritable structure autonome et intelligente, capable d'interagir avec les robots et de réagir à des événements (perçus). Elle constituera également pour les robots :

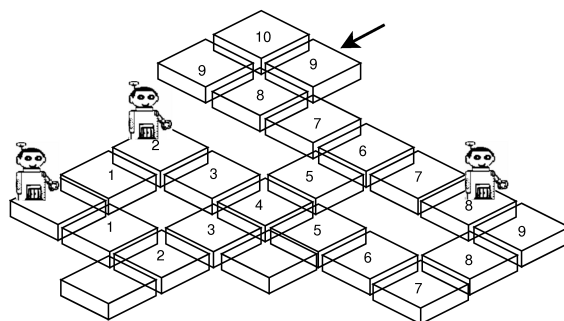


FIG. 7.3 – Principe d’un environnement distribué (cellulaire) interagissant avec des robots autonomes

- une mémoire commune, permettant d’étudier le déploiement et la validation robotique des modèles stigmergiques,
- un moyen de perception, à travers la définition de fonctions de prises d’informations par l’environnement
- et un modèle de calcul spatial et distribué, qui permettra de progresser en particulier sur le verrou de contrôle et de la coordination d’un nombre quelconque de robots.

Nous avons présenté en Section 6.3.2 un premier modèle de dalles pouvant servir de base à l’élaboration des objectifs que nous venons d’exposer. Cette préétude a permis de mettre en avant un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques qu’il faudra lever pour proposer un modèle d’environnement intelligent. En particulier, il s’agira de définir des algorithmes distribués qui passent à l’échelle (par exemple éviter l’explosion combinatoire des formes récursives). Pour cela, on s’appuiera sur les algorithmes de diffusions d’informations dans les réseaux de capteurs et de robots. On réexaminera en particulier le modèle TOTA de Mamei *et al.* [70] et celui des phéromones digitales sur robots de Payton [92].

La définition d’une intelligence collective située, fondée sur la dynamique d’interaction entre agents et environnement actif, se positionne à la fois dans le domaine de la robotique multi-agent et dans celui de l’intelligence ambiante [121, 70]. Le domaine applicatif d’une telle démarche est ainsi très vaste (allant du contrôle multi-robot à la perception intelligente - ou *active sensing* -). Nous viserons en particulier, à court terme, à appliquer nos travaux au domaine de l’habitat intelligent et de la robotique d’assistance. L’idée sera d’exploiter le réseau de dalles pour l’assistance et le suivi des activités d’une personne chez elle (actimétrie). En particulier, les dalles pourraient réaliser de façon non intrusive la perception et l’apprentissage des habitudes d’un individu afin de détecter tout comportement pathologique (immobilité, chute, etc.). L’étude portera aussi sur la réalisation de tâches d’assistance, où des robots pourront être guidés/aidés par les dalles, par exemple pour la recherche ou la saisie d’un objet.

Nous avons inscrit en 2010 l’étude des dalles intelligentes dans le projet d’appartement intelligent du LORIA, ainsi que dans les projets Informatique Située du CPER INRIA/Lorraine et dans l’AEN¹⁴ PAL (Personnaly Assisted Living) de l’INRIA, qui vont être menés dans les trois prochaines années.

¹⁴Action d’Envergure Nationale

7.5 Résumé des objectifs

La démarche générale du projet est de progresser dans la définition et le déploiement des systèmes collectifs situés, reposant sur les principes de coordination réactive et de calcul par champs. Ces champs peuvent être des signaux communiqués directement ou bien des informations inscrites et lues dans l'environnement.

Le premier objectif sera d'établir une véritable approche de résolution de problème par les techniques de champs et de marquage de l'environnement. On s'intéressera à définir une typologie des comportements collectifs émergents de l'interaction entre agents et environnement, lorsque ceux-ci évoluent et marquent l'environnement avec des informations actives de type phéromones digitales.

Le second objectif concernera le passage au réel des modèles multi-agents reposant sur ces principes de coordination et de calcul par champs dans l'environnement. Il s'agira de proposer des outils (table interactive pour la stigmergie digitale) et des modèles permettant leur implémentation et leur validation. En particulier, dans le cadre du déploiement de cette approche en environnement réel, on étudiera un modèle de calcul spatial distribué capable d'interactions avec les robots.

Quelque soient les supports d'implémentation ou d'expérimentation envisagés, l'objectif sera d'avancer vers une IA située, où l'environnement joue un rôle majeur dans les processus de calcul et de contrôle, et où les agents sont des entités incarnées capables d'interactions avec des systèmes autonomes et des hommes.

Chapitre 8

Bibliographie

- [1] *Springer Handbook of Robotics*. Siciliano and Khatib Ed., 2008.
- [2] S. Abras. *Système Domotique Multi-Agents pour la gestion de l'énergie dans l'habitat*. Thèse de l'institut polytechnique de Grenoble, 2009.
- [3] L. Adouane. *Architecture de contrôle comportementales et réactives pour la coopération d'un groupe de robots mobiles*. PhD Thesis Université de Franche-Comté, Laboratoire d'automatique de Besançon, 2005.
- [4] S. Albouze. Stratégie réactive pour le croisement sans arrêt de deux platoons de véhicules décentralisés. In *Rapport de stage, Ecole des Mines/LORIA, Nancy*, 2010.
- [5] A. Almeida, G. Ramalho, H. Santana, P. Tedesco, T. Menezes, V. Corruble, and Y. Chevaleyre. Recent advances on multi-agent patrolling. In *Advances in Artificial Intelligence — Seventeenth Brazilian Symposium on Artificial Intelligence (SBIA'04)*, pages 474–483. Springer-Verlag, 2004.
- [6] Francesco Amigoni, Nicola Basilico, and Nicola Gatti. Finding the optimal strategies in robotic patrolling with adversaries in topologically-represented environments. In *ICRA 2009, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 819–824, 2009.
- [7] R.C. Arkin. *Behavior Based Robotics*. The MIT Press, 1998.
- [8] M. Asada, P. Stone, H. Kitano, B. Werger, Y. Kuniyoshi, A Drogoul, D. Duhaut, M. Veloso, H. Asama, and S. Suzuki. The robocup physical agent challenge : Phase I. *Applied Artificial Intelligence*, 12, 2-3 :251–264, 1998.
- [9] T. Balch and R.C. Arkin. Motor schema-based formation control for multiagent robot teams. *Autonomous Robots*, pages 10–16, 1995.
- [10] J. Barraquand, B. Langlois, and J.C. Latombe. Numerical potential field techniques for robot path planning. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 22(2) :224–241, 1992.
- [11] R. Beckers, J.L. Deneubourg, S. Goss, and J.M. Pasteels. Collectively decision making through food recruitment. *Ins. Soc.*, 37 :258–267, 1990.
- [12] R. Beckers, O.E. Holland, and J.-L. Deneubourg. From local actions to global tasks : stigmergy and collective robotics. In *Artificial Life IV : Proc. of the 4th Int. Workshop on the synthesis and the simulation of living systems, third edition, MIT Press*, 1994.
- [13] P. Benoist-Guental. *Mathématiques pour la Physique, introduction à la théorie qualitative des systèmes dynamiques*. Edt. De Boeck Université, 2005.

- [14] G. Beurier. *Codage indirect de la forme dans les systèmes multi-agents : émergence multi-niveaux, morphogénèse et évolution*. Thèse de l'université de Montpellier 2, 2007.
- [15] G. Beurier, O. Simonin, and J. Ferber. Model and simulation of multi-level emergence. In *2nd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, in proceedings IEEE ISSPIT 2002*, pages 231–236, 2002.
- [16] E. Bonabeau and G. Theraulaz. *Intelligence Collective*. Editions Hermes., 1994.
- [17] K. Bouzouita. Champs de potentiels artificiels : modèle pour le contrôle de systèmes multi-robots. In *Rapport de stage de Master de Recherche, équipe MAIA LORIA/ENSI Tunis*, 2009.
- [18] N. Bredeche. *Contributions to Evolutionary Design of Embodied Agents : from autonomous artificial creatures to self-organizing, self-adaptive swarm of embodied agents*. Habilitation à diriger les recherches de l'Université Paris-Sud 11, 2009.
- [19] J. Brimberg, P. Hansen, N. Mladenovic, and E. Taillard. Improvements and comparison of heuristics for solving the uncapacitated multisource weber problem. *Operations Research*, 48 :444–460, 2000.
- [20] R. A. Brooks. Intelligence without reason. In Ray Myopoulos, John ; Reiter, editor, *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 569–595, Sydney, Australia, 1991. Morgan Kaufmann.
- [21] R.A. Brooks. Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, 6(1-2) :3–15, 1990.
- [22] J. Chapelle. *Une architecture multi-agents pour un apprentissage autonome guidé par les émotions*. Thèse de l'université de Montpellier 2, 2006.
- [23] J. Chapelle, O. Simonin, and J. Ferber. How situated agents can learn to cooperate by monitoring their neighbors' satisfaction. In *15th European Conference on Artificial Intelligence ECAI'02*, pages 68–72, Lyon, France, 2002.
- [24] H. Chu, A. Glad, O. Simonin, F. Sempe, A. Drogoul, and F. Charpillet. Swarm approaches for the patrolling problem, information propagation vs. pheromone evaporation. In *IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI*, pages 442–449, 2007.
- [25] J.M. Contet. *Modèles multi-agents réactifs pour la navigation multi-véhicules : spécification formelle et vérification*. Thèse de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, 2009.
- [26] T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. MIT Press and McGraw-Hill, 1990.
- [27] P. Daviet and M. Parent. Longitudinal and lateral servoing of vehicles in a platoon. In *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Intelligent Vehicles*, pages 41–46, Tokyo (JP), September 1996.
- [28] J.L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, J. M. Pasteels, and G. Duerinck. Random behaviour, amplification processes and number of participants : How they contribute to the foraging properties of ants. *Physica*, 22(D) :176–186, 1986.
- [29] J.L. Deneubourg and S. Goss. Collective patterns and decision-making. *Ecology, Ethology and Evolution*, 1 :295–311, 1989.
- [30] A. Devert, N. Bredeche, and M. Schoenauer. Robust multi-cellular developmental design. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 982–989, 2007.
- [31] M. Dorifo and T. Stutzle. *Ant Colony Optimization Metaheuristic : Algorithms, Applications and Advances*. Handbook of Metaheuristics, 2002.

- [32] A. Drogoul. *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de l'université Paris 6, 1993.
- [33] A. Drogoul and J. Ferber. From tom thumb to the dockers : Some experiments with foraging robots. In *2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior (SAB)*, pages 451–459, Honolulu, 1992.
- [34] M. Dubois. *MASL, langage de contrôle multi-agents robotiques*. Thèse de l'université de Bretagne-Sud, 2008.
- [35] J. Ferber. *Les Systèmes Multi-Agents, Vers une intelligence collective, InterEditions, or Multi-Agent Systems, an introduction to Distributed Artificial Intelligence, Addison-Wesley, 1999*. 1995.
- [36] J. Ferber and J.P. Muller. Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-agent Systems*, pages 72–79, 1996.
- [37] D. Floreano and C. Mattiussi. *Bio-inspired Artificial Intelligence, Theories, Methods, and Technologies*. The MIT Press, 2008.
- [38] R.W. Floyd. Non-deterministic algorithms. *Journal of the ACM*, 14(4) :636–644, 1967.
- [39] S. Garnier, F. Tache, M. Combe, A. Grimal, and G. Theraulaz. Alice in pheromone land : An experimental setup for the study of ant-like robots. In *Proc. 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pages 37–44, 2007.
- [40] S. Garrido, L. Moreno, D. Blanco, and F. Martín Monar. Robotic motion using harmonic functions and finite elements. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, DOI 10.1007/s10846-009-9381-3, 2009.
- [41] B. Girau. *Du parallélisme connexionniste à une pratique de calcul distribué numérique bio-inspiré*. Habilitation à diriger les recherche de l'Université Nancy 2, 2007.
- [42] A. Glad, O. Buffet, O. Simonin, and F. Charpillet. Self-organization of patrolling-ant algorithms. In *Third IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems SASO'09*, pages 61–70. ACM SIG on Artificial Intelligence, 2009.
- [43] A. Glad, O. Simonin, O. Buffet, and F. Charpillet. Theoretical study of ant-based algorithms for multi-agent patrolling. In *18th European Conference on Artificial Intelligence ECAI'08*, pages 626–630, 2008.
- [44] A. Glad, O. Simonin, O. Buffet, and F. Charpillet. Influence of different execution models on patrolling ants behavior : from agents to robots. In *Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, pages 1173–1180, 2010.
- [45] J. Gleick. *La théorie du chaos (Chaos 1987)*. Edition revue et corrigée, 2008.
- [46] M-P. Gleizes. *Vers la résolution de problèmes par émergence*. Habilitation à diriger les recherche de l'Université Paul Sabatier, 2004.
- [47] J. Halloy, G. Sempo, G. Caprari, C. Rivault, M. Asadpour, F. Tâche, I. Saïd, V. Durier, S. Canonge, J-M. Amé, C. Detrain, N. Correll, A. Martinoli, F. Mondada, R. Siegwart, and JL. Deneubourg. Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices. *Science* 318, pages 1155–1158, 2007.
- [48] K. Hengster-Movric, S. Bogdan, and I. Draganjac. Multi-agent formation control based on bell-shaped potential functions. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 58 :165–189, 2010.

- [49] Herianto and D. Kurabayashi. Realization of an artificial pheromone system in random data carriers using RFID tags for autonomous navigation. In *2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2288–2293, 2009.
- [50] F. Heylighen. Self-organization, emergence and the architecture of complexity. In *First European Conference on System Science, AFCET*, pages 23–32, 1989.
- [51] V. Hilaire. *Vers une approche de spécification, de prototypage et de vérification de Systèmes Multi-Agents*. Thèse de l’université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l’Université de Franche-Comté, 2000.
- [52] V. Hilaire, P. Gruer, A. Koukam, and O. Simonin. Formal specification approach of role dynamics in agent organisations : application to the Satisfaction-Altruism model. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, World Scientific Pub.*, 17(15) :615–641, 2007.
- [53] V. Hilaire, P. Gruer, A. Koukam, and O. Simonin. Formal driven prototyping approach for multiagent systems. *JAOSE International Journal Agent-Oriented Software Engineering*, 2(2), 2008.
- [54] V. Hilaire, O. Simonin, A. Koukam, and J. Ferber. A formal framework to design and reuse agent and multiagent models. In *LNCS 3382 Lecture Notes in Computer Science, extended and selected paper from AOSE’04 (Agent-Oriented Software Engineering V, 5th International Workshop) (sel. 16%) Publisher : Springer-Verlag*, pages 142–157, 2005.
- [55] Saing Paul Hou and Chien Chern Cheah. Multiplicative potential energy function for swarm control. In *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15, 2009 St. Louis, USA*, pages 4363–4368, 2009.
- [56] C. Hull. *Principles of Behavior*. New York : Appleton-Century-Crofts, 1943.
- [57] T. Kazama, K. Sugawara, and T. Watanabe. Traffic-like movement on a trail of interacting robots with virtual pheromone. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMiRE 2005)*, pages 383–388. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [58] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV*, pages 1942–1948, 1995.
- [59] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 500–505, St. Louis, 1985.
- [60] S. Koenig and Y. Liu B. Szymanski. Efficient and inefficient ant coverage methods. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001.
- [61] C. R. Kube and E. Bonabeau. Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 30, Issue 1-2 :85–101, 2000.
- [62] C. R. Kube and H. Zhang. Collective robotic intelligence. In *2d International Conference On the Simulation Of Adaptive Behavior (SAB 92)*, pages 460–68, Honolulu, HI, 1992. MIT Press, Cambridge, MA.
- [63] D. Kurabayashi and H. Asama. Knowledge sharing and cooperation of autonomous robots by intelligent data carrier systems. In *2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 464–468, 2000.
- [64] F. Legras, A. Glad, O. Simonin, and F. Charpillat. Authority sharing in a swarm of UAVs : simulation and experiments with operators. In *in SIMPAR’08 International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots LNAI 5325 Springer-Verlag*, pages 293–304, 2008.

- [65] P. Lucidarme and O. Simonin. Le robot mobile Type 1. In *proceedings Journées des Démonstrateurs en Automatique à vocation recherche, 28-29 mars, Angers, 2006*.
- [66] P. Lucidarme, O. Simonin, and A. Liégeois. Implementation and evaluation of a satisfaction/altruism based architecture for multi-robot systems. In *International Conference of Robotics and Automation ICRA'02*, pages 1007–1012, Washington, 2002.
- [67] A. Machado, G. Ramalho, J-D. Zucker, and A. Drogoul. Multi-agent patrolling : an empirical analysis of alternative architectures. In *Third International Workshop on Multi-Agent Based Simulation*, pages 155–170, 2002.
- [68] M. Mamei and F. Zambonelli. Augmenting the Physical Environment Through Embedded Wireless Technologies. In *E4MAS workshop 2005, LNAI 3830*, pages 187–204, 2006.
- [69] M. Mamei and F. Zambonelli. *Field-Based Coordination for Pervasive Multiagent Systems*. Springer, 2006.
- [70] M. Mamei and F. Zambonelli. Programming pervasive and mobile computing applications : the tota approach. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM)*, 18(4), 2009.
- [71] R. Mandiau, A. Champion, J.M. Auberlet, S. Espié, and C. Kolski. Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation. *Appl. Intell.*, 28(2) :121–138, 2008.
- [72] M. J. Mataric. Reward functions for accelerated learning. In W.W. Cohen and H. Hirsh, editors, *Machine Learning Proc. of the Eleventh International Conference*, pages 181–189. Morgan Kaufmann, 1994.
- [73] M. J. Mataric. Issues and approaches in the design of collective autonomous agents. *Robotics and Autonomous Systems*, 16 n 2-4 :321–331, 1995.
- [74] D. Matko, G. Klancar, S. Blazic, O. Simonin, F. Gechter, JM. Contet, and P. Gruer. The application of reference-path control to vehicle platoons. In *5th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, in proceedings ICINCO'08*, pages 145–150, 2008.
- [75] D. McFarland. *The Oxford Companion to Animal Behaviour*. Oxford University Press, 1987.
- [76] D. Meignan, O. Simonin, and A. Koukam. Simulation and evaluation of urban bus networks using a multiagent approach. *International Journal of Simulation, Modelling, Practice and Theory (SIMPAT)*, 15 :659–671, 2007.
- [77] F. Michel. The IRM4S model : the influence/reaction principle for multiagent based simulation. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 908–910, 2007.
- [78] M. Minsky. *The Society of Mind*. New York : Simon and Schuster, 1986.
- [79] S. Moujahed. *Approche multi-agent auto-organisée pour la résolution de contraintes spatiales dans les problèmes de positionnement mono et multi-niveaux*. Thèse de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, 2007.
- [80] S. Moujahed, O. Simonin, and A. Koukam and. K. Ghédira. A reactive agent based approach to facility location : application to transport. In *4th Workshop on Agents in Traffic and Transportation, located at Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2006)*, pages 63–69, 2006.
- [81] S. Moujahed, O. Simonin, and A. Koukam and. K. Ghédira. Self-organizing multiagent approach to optimization in positioning problems. In *17th European Conference on Artificial Intelligence ECAI'06 (select. 26%)*, pages 275–279, 2006.

- [82] S. Moujahed, O. Simonin, and A. Koukam. Location problems optimization by a self-organizing multiagent approach. *International Journal on Multagent & Grid Systems (MAGS), special issue on Engineering Environments for Multiagent Systems*, 5(1) :59–74, 2009.
- [83] J-P. Muller. Vers une methodologie de conception de systemes multi-agents de resolution de probleme par emergence. In *JFIADSMA'98*, pages 355–371, 1998.
- [84] Jean M.R. (nom collectif). Emergence et SMA. In *JFIADSMA'97, Hermès, Nice*, 1997.
- [85] J. Bom P. Martinet, B. Thuilot. Autonomous navigation and platooning using a sensory memory. In *invited session in Workshop Safe Navigation in Open and Dynamic Environments : Autonomous Systems versus Driving Assistance Systems at International IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'06*. IEEE, 2006.
- [86] L. Panait and S. Luke. A pheromone-based utility model for collaborative foraging. In *Proc AA-MAS'04*, pages 36–43. ACM, 2004.
- [87] S. Park and S. Hashimoto. Autonomous mobile robot navigation using passive rfid in indoor environment. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 56(7) :2366–2373, 2009.
- [88] C. A. C. Parker, H. Zhang, and C. R. Kube. Blind bulldozing : Multiple robot nest construction. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Intelligent Systems (IROS)*, 2003.
- [89] H. Van D. Parunak and S. Brueckner. Artificial life. In *Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, 1989.
- [90] H. Van D. Parunak, M. Purcell, and R. O'Connell. Digital pheromones for autonomous coordination of swarming UAV's. In *Proc. of AIAA First Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, and Operations*, 2002.
- [91] H. Van D. Parunak. Go to the ant : Engineering principles from natural agent systems. *Annals of Operations Research*, 1997.
- [92] D. Payton, R. Estowski, and M. Howard. Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones. 3342 :45–57, 2005.
- [93] N. Pepin. Environnements intelligents pour la coordination réactive de robots mobiles. In *Rapport de Master 2 Recherche, Nancy 2/LORIA*, 2008.
- [94] N. Pepin, O. Simonin, and F. Charpillet. Intelligence tiles : Putting situated multi-agents models in real world. In *International Conference on Agents and Artificial Intelligence, in Proceedings ICAART'09, AAAI, ACM, Springer*, pages 513–519, 2009.
- [95] I. Prigogine. *Les lois du chaos*. Champs Flammarion, 1993.
- [96] I. Prigogine. *La Fin des Certitudes*. Odile Jacob, 1999.
- [97] C. Reynolds. Flocks, herd and schools : A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, Vol. 21, No 4 :25–24, 1987.
- [98] S. Rodriguez. *From analysis to design of holonic multi-agent systems : a framework, methodological guidelines and applications*. PhD Thesis, UTBM Belfort, 2005.
- [99] J. A. Sauter, R. Matthews, H. V. D. Parunak, and S. Brueckner. Evolving adaptive pheromone path planning mechanisms. In *Proc. of AAMAS'02*, pages 434–440, 2002.
- [100] J. A. Sauter, R. Matthews, H. V. D. Parunak, and S. Brueckner. Performance of digital pheromones for swarming vehicle control. In *Proc. of AAMAS'05*, pages 903–910, 2005.

- [101] A. Scheuer, O. Simonin, and F. Charpillet. Safe longitudinal platoons of vehicles without communication. In *26th IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'09, in Proceedings ICRA2009 IEEE Robotics and Automation Society, Kobe, Japan, May 12-17*, pages 70–75, 2009.
- [102] O. Simonin. *Regroupement et travail en équipe dans les systèmes multi-agents réactifs*. DEA (Master 2 Recherche) de l'université Montpellier II, laboratoire LIRMM, 1997.
- [103] O. Simonin. *Le modèle satisfaction-altruisme : coopération et résolution de conflits entre agents situés réactifs, application à la robotique*. Thèse de l'université Montpellier II, également disponible en Livre aux Editions Universitaires Européennes (2010), 2001.
- [104] O. Simonin and F. Charpillet. Indirect cooperation between mobile robots through an active environment. In *CAR'10 5th National Conference on Control Architecture of Robots, Douai*, 2010.
- [105] O. Simonin, F. Charpillet, and E. Thierry. Collective construction of numerical potential fields for the foraging problem. *ACM TAAS, Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, In Press (25 pages)*, 2010.
- [106] O. Simonin and J. Ferber. Modeling self satisfaction and altruism to handle action selection and reactive cooperation. *6th International Conference On the Simulation Of Adaptive Behavior (SAB 2000 volume 2)*, pages 314–323, 2000.
- [107] O. Simonin and J. Ferber. Modélisation des satisfactions personnelle et interactive d'agents situés coopératifs. In *JFIADSMA'2001, 9eme journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents, Best Paper Award*, Montreal, 2001.
- [108] O. Simonin and J. Ferber. Un modèle multi-agents de résolution collective de problèmes situés multi-échelles. In *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - hors série/JFSMA'03*, pages 317–329, 2003.
- [109] O. Simonin, J. Ferber, and V. Decugis. Performances analysis in collective systems. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Multi-Agent Systems*, pages 469–470, Paris, 1998.
- [110] O. Simonin and F. Gechter. An environment-based principle to design reactive multi-agent systems for problem solving. In *LNAI 3830 Environments for Multiagent Systems II, extended and selected paper from E4MAS'05 workshop Publisher : Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pages 32–49, 2006.
- [111] O. Simonin and O. Grunder. A cooperative multi-robot architecture for moving a paralyzed robot. *International Journal Mechatronics (Elsevier)*, 19(4) :463–470, 2009.
- [112] O. Simonin, A. Lanoix, S. Colin, and A. Scheuer and F. Charpillet. Generic expression in B of the influence/reaction model : Specifying and verifying situated multi-agent systems, rapport de recherche INRIA Hal 6304, 2007.
- [113] O. Simonin, A. Liegois, and P. Rongier. An architecture for reactive cooperation of mobile distributed robots. In *DARS 4 Distributed Autonomous Robotic Systems 4*, pages 35–44, Knoxville, TN, 2000. Springer.
- [114] A. Spicher, N. Fates, and O. Simonin. Translating discrete multi-agents systems into cellular automata, application to diffusion-limited aggregation. In *Springer book Selection of the best ICAART'09 papers (From reactive multi-agents models to cellular automata, pp. 422-429, ICAART'09 proceedings), Communications in Computer and Information Science series, CCIS 67, Springer*, 2010.
- [115] L. Steels. Cooperation between distributed agents through self-organization. In *Decentralized AI-Proc. of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agelist World (MAAMAW-89)*, pages 175–196. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1989.

- [116] F. Tolba, O. Simonin, and V. Hilaire. A reactive macro control for mirosot robot soccers. In *FIRA Robot World Congress, Austria, Vienne, in proceedings*, 2003.
- [117] J-P. Treuil, A. Drogoul, and J-D. Zucker. *Modélisation et Simulation à base d'agents*. Dunod Paris, 2008.
- [118] P. Varaiya. Smart cars on smart roads : problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 32, 1993.
- [119] I. Wagner, M. Lindenbaum, and A. Bruckstein. Distributed covering by ant-robots using evaporating traces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15 :918–933, 1999.
- [120] I. Wagner, M. Lindenbaum, and A. M. Bruckstein. Efficiently searching a graph by a smell-oriented vertex process. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 24 :211–223, 1998.
- [121] W. Weber, JM. Rabaey, and E. Aaarts. *Ambiant Intelligence*. Springer book, 2005.
- [122] G. Weiss, editor. *Multiagent Systems, a modern approach to distributed artificial intelligence*. G. Weiss (eds), the MIT Press, 2000.
- [123] D. Weyns, V. Parunak, F. Michel, T. Holvoet, and J. Ferber. Environments for multiagent systems, state of the art and research challenges. In *Post-proceedings of the first International Workshop on Environments for Multiagent Systems, LNAI vol 3374*, 2005.
- [124] V. Yanovski, I. Wagner, and A. M. Bruckstein. A distributed ant algorithm for efficiently patrolling a network. *Algorithmica*, 37(3) :165–186, 2003.
- [125] K. Zeghal and J. Ferber. Craash : A coordinated collision avoidance system. In *European Simulation Multiconference*, Lyon, France, 1993.