

Systèmes multi-agents réactifs d'inspiration physique pour la prise de décision et la résolution de problèmes

Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Université de Franche Comté

présentée et soutenue publiquement par

Franck GECHTER

le 4 décembre 2013

devant le jury composé de:

Giovanna Di Marzo-Serungendo	Rapporteur	Professeur à l'Université de Genève
Arnaud de La Fortelle	Rapporteur	Professeur à l'Ecole des Mines de Paris
René Mandiau	Rapporteur	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
François Charpillet	Examinateur	Directeur de Recherche INRIA-Nancy
Sidi Mohammed Senouci	Examinateur	Professeur à l'Université de Bourgogne
Jean-Pierre Derutin	Examinateur	Professeur à l'Institut Pascal
Abderrafiaa Koukam	Examinateur	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Juan-Pablo Gruer	Examinateur	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis, tout au long de ces années, à réaliser le travail qui est présenté dans ce manuscrit. Tout d'abord, je voudrais adresser un grand merci aux membres du Jury de cette Habilitation à Diriger des Recherches : Sidi Mohammed Senouci pourvoir avoir porté un regard pertinent sur ce travail, pour avoir officié en tant que président et pour les projets que nous sommes en train de construire, Giovanna Di Marzo-Serungendo, Arnaud De La Fortelle et René Mandiau, mes rapporteurs, pour leur relecture, leur analyse de mes travaux et leurs commentaires précis et pertinents, Jean-Pierre Derutin pour son soutien, ses questions et pour avoir bien voulu refaire encore une fois le trajet vers Belfort, François Charpillet pour m'avoir accepté dans son équipe en tant que stagiaire lorsque j'étais étudiant en école d'ingénieur, pour m'avoir donner gout à la recherche et pour m'avoir encadré au cours de ma thèse, et enfin Pablo Gruer et Abder Koukam pour m'avoir soutenu et encouragé dans mes démarches et dans mes travaux depuis mon arrivée à Belfort.

Je tiens à remercier également Jean-Paul Haton et Didier Fass, deux personnes importantes à mes yeux, qui n'ont malheureusement pas pu assister à cette soutenance, mais qui m'ont toujours conseillé de manière judicieuse tout au long de ma carrière et avec qui je partage la volonté et le plaisir de creuser les connexions entre les différentes disciplines scientifiques.

Je voudrais également remercier tous les chercheurs que j'ai eu l'opportunité de croiser au cours des mes travaux de recherches : Massimo Cossentino, Sebastian Rodriguez, Andrew Rice, Vincent Hilaire, Fabrice Lauri, Stéphane Galland, Nicolas Gaud, Abdeljalil Abbas-Turki, Olivier Lamotte, Majhoub Dridi, Amir Hajjam, Abellatif Miraoui, Fei Gao, Arnaud Gaillard, Damien Paire, David Bouquain, Daniel Hissel, Vincent Chevrier, Olivier Simonin, Vincent Thomas, Olivier Buffet, Drago Matko ainsi que tous les membres de l'équipe MAIA, du laboratoire SeT.

Je voudrais donner un remerciement spécial à Benjamin Blunier malheureusement parti trop tôt.

Je remercie également les étudiants dont j'ai eu l'opportunité d'encadrer en thèse : Jean-Michel Contet, Madeleine El-Zaher, Baudouin Dafflon, Bofei Chen et Feng Yang.

Mes derniers remerciements iront à ma famille, mes parents et plus particulièrement à ma femme Céline pour son amour, son soutien de tous les jours et son courage et à mes merveilleux enfants Isaline, Livie et Octavien.

Résumé

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches présente les principales activités de recherche que j'ai mené depuis 1999 en tant que doctorant au sein de l'équipe MAIA (LORIA-INRIA Lorraine) puis depuis 2004 en tant que maître de conférences au sein du laboratoire SeT de L'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Ce mémoire synthétise une partie de mes contributions dans le cadre de la résolution de problèmes et de la prise de décision s'appuyant sur des systèmes multi-agents réactifs d'inspiration physique.

La prise de décision et la résolution de problème sont deux problématiques étroitement liées. La résolution de problème peut être considérée comme le processus permettant, à partir d'un ensemble de données interdépendantes constituant un problème, de trouver une solution satisfaisant un certain nombre de contraintes. La prise de décision, quant à elle, peut être considérée comme un processus cognitif permettant de choisir la solution la plus pertinente, relativement à des critères, parmi un ensemble de solutions possibles répondant à un problème donné dans le but de réaliser une action. En intelligence artificielle, les approches utilisées pour la résolution de problème sont très variées et dépendent à la fois du point de vue adopté pour le mécanisme de prise de décision et du cadre applicatif abordé. Bien évidemment, les systèmes multi-agents possèdent une place de choix pour traiter ces problématiques. Notre travail, présenté dans ce mémoire, se place dans le cadre théorique des systèmes multi-agents réactifs d'inspiration physique appliqués à des problèmes concrets réels. Le principal objectif de ces travaux est la construction de tels systèmes en s'appuyant sur la définition d'architectures basées sur la notion d'environnement et sur la notion d'interaction. Ces travaux peuvent être répartis en trois thématiques : l'étude du rôle de l'environnement dans les systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problème, la conception d'architectures multi-agents basées sur des modèles spécifiques d'interaction et l'évaluation des phénomènes émergents en utilisant des indicateurs globaux prenant en compte les mécanismes locaux d'interaction.

Étant donné que nous nous sommes attachés à appliquer les modèles conçus à des problèmes concrets réels, nous avons également adopté, en parallèle à ces travaux de conception, une démarche de validation et de vérification des modèles proposés. La validation a été réalisée à la fois en simulation et à travers des expérimentations lorsque cela a été possible. La démarche de vérification, quant à elle, s'appuie sur des outils tels que des "model checkers".

Table des matières

1	Introduction	13
1.1	Historique	14
1.2	Contexte	14
1.3	Contributions	16
1.4	Organisation du mémoire	17
2	Le rôle de l'environnement dans les systèmes multi-agents réactifs	19
2.1	Introduction	20
2.2	Retour sur la localisation et le suivi de cibles	21
2.2.1	Contexte	21
2.2.2	Principe	21
2.2.3	Résultats	24
2.3	Vers une approche de conception de SMA fondée sur l'environnement	25
2.4	Évitement d'obstacles et aide à la conduite	27
2.4.1	Contexte	27
2.4.2	Vers un modèle de décision multi-agent pour l'évitement d'obstacle et le suivi de trajectoires	27
2.4.3	Résultats	30
2.4.4	De l'évitement d'obstacle à l'aide à la conduite	30
2.5	Stationnement automatique	31
2.5.1	Contexte	31
2.5.2	Principe	32
2.5.3	Résultats	32
2.6	Comparaison avec les approches de type filtrage particulaire	32
2.7	Conclusion	35
3	Modèles spécifiques d'interaction et modèles d'interaction inspirés de la physique	37
3.1	Introduction	38
3.2	Modèles d'interaction pour la navigation multi-véhicules	39
3.2.1	Contexte	39
3.2.2	La conduite en convoi	40
3.2.3	Approche locale contre approche globale	41
3.2.4	Formalisation du problème	41
3.2.5	La configuration colonne	42
3.2.6	Passage de la configuration colonne à d'autres types de configuration : une altération de la perception	45
3.2.7	Simulations et expérimentations	47

3.3	Interactions entre l'Art et la Technologie	48
3.3.1	Vers des agents pilotés par la musique, les gestes et la voix	48
3.3.2	Sphericall : une expérience interactive couplant deux systèmes multi-agents	51
3.4	Modèle d'interaction pour la gestion de carrefours	53
3.4.1	Contexte	53
3.4.2	Comportement des Véhicules	54
3.4.3	Comportement des feux du carrefour	54
3.4.4	Résultats et apports	54
3.5	Modèle d'interaction pour la coopération entre Tableaux Blanc Interactifs	56
3.5.1	Contexte	56
3.5.2	Principe	57
3.6	Conclusion	57
4	Évaluation et mesure des phénomènes émergents	59
4.1	Introduction	60
4.2	Systèmes complexes, émergence et évaluation des propriétés d'un système	60
4.2.1	Systèmes complexes et systèmes multi-agents	60
4.2.2	Émergence et auto-organisation	61
4.2.3	Évaluation des propriétés émergentes d'un système	61
4.3	Construction d'indicateurs globaux basés sur l'énergie pour la simulation de piétons	63
4.3.1	Contexte	63
4.3.2	Un modèle de simulation holarchique	63
4.3.3	Définition des grandeurs énergétiques utilisées	64
4.3.4	Application à la simulation de piétons	65
4.3.5	Résultats	66
4.4	Construction d'indicateurs globaux basés sur la fonction de partition	68
4.4.1	Principes théoriques	68
4.4.2	Première application : les Boids	70
4.4.3	Deuxième application : Évitement d'obstacles	72
4.5	Conclusion	73
5	Vérification et model checking	75
5.1	Introduction	76
5.2	Cadre théorique	76
5.2.1	Les systèmes formels	76
5.2.2	La vérification	76
5.2.3	Les différents approches de vérifications	77
5.3	Vérification de propriétés de sûreté pour la conduite en convoi	80
5.3.1	Propriétés de sûreté	80
5.3.2	Application à l'approche locale	81
5.4	Conclusion	84
6	Conclusion	85
6.1	Bilan	86
6.2	Perspectives	86
6.2.1	Point de vue théorique	87
6.2.2	Point de vue applicatif	88
7	Bibliographie	91

8 Curriculum Vitae	103
8.1 Curriculum Vitae	103
8.1.1 Etat civil	103
8.1.2 Parcours académique	103
8.1.3 Parcours Professionnel	103
8.1.4 Eléments Remarquables	104
8.2 Insertion dans l'équipe de recherche	105
8.2.1 Participation et responsabilités dans le cadre de projets de recherche . . .	105
8.2.2 Valorisation	105
8.2.3 Expertise, participation à des comités de programme et de lecture . . .	105
8.2.4 Prix et conférences invitée	106
8.3 Encadrement et co-encadrement d'étudiants	107
8.3.1 Thèse soutenue	107
8.3.2 Thèses en cours	107
8.3.3 Encadrement de stagiaire de Master et de projet de fin d'études	107
8.3.4 Encadrement d'ingénieurs sur des projets de recherche au laboratoire . .	108
8.4 Participation à des tâches administratives d'intérêt collectif et activités d'enseignement	109
8.4.1 Tâches administratives d'intérêt collectif	109
8.4.2 Activités d'enseignement	109
8.5 Liste des publications	111

Table des figures

2.1	Principe Général du processus de localisation et de suivi de Cibles s'appuyant sur les systèmes multi-agents réactifs	22
2.2	(A) Un plot apparaît dans l'environnement. (B) Sous l'effet de l'atténuation, le plot commence à disparaître. (C) La cible réel se déplace créant ainsi un nouveau plot. L'altitude du plot précédent continue à décroître. (D) Le premier plot a disparu et le second commence à s'atténuer.	23
2.3	Principe de résolution basé sur l'environnement (GECHTER et al. 2005)	26
2.4	Vue d'ensemble du système	28
2.5	Comportement d'attraction Agent-point de passage (Gauche) point de passage dans la zone de perception, (Droite) point de passage en dehors de la zone de perception	29
2.6	Détermination du vecteur décision	30
2.7	Principe de fonctionnement du système de stationnement automatique	32
2.8	Trajectoires de stationnement automatique avec une méthode classique (en haut) et avec la méthode à base d'agents réactifs (en bas)	33
3.1	Mécanisme de décision	40
3.2	Les configurations usuelles de la conduite en convoi : colonne (à gauche), ligne (au centre) et échelon (à droite)	40
3.3	Diagramme RIO pour la conduite en convoi	42
3.4	Représentation d'un train de véhicules dans le cas du modèle à simple ressort	43
3.5	Comportement du modèle ressort sans (à gauche) et avec (à droite) le mécanisme de torsion	44
3.6	Modèle à double ressort	45
3.7	Exemple de détermination de la position de leader virtuel dans le cadre d'une configuration échelon.	46
3.8	Placement du point de pivot dans le cadre d'une configuration colonne	46
3.9	Modèles de transformation de la perception pour les configurations spatiales usuelles	47
3.10	Exemples de décomposition d'une configuration spatiale en un ensemble de configurations usuelles	48
3.11	Architecture globale du simulateur VIVUS	49
3.12	Exemple d'affichage du simulateur VIVUS (Projets CATS : Modèle 3D réalisé par Tecnomade, Modèles de comportement de piétons réalisés par Voxelia)	49
3.13	Modèle RIO de l'architecture proposés pour les agents peintres CONTEL et al. 2013a	50
3.14	Le dispositif expérimental (gauche) et un exemple de résultat obtenu (droite)	51
3.15	L'interface tactile du dispositif Sphericall. Les barres blanches verticales correspondent aux fader de la table de mixage. Les grands cercles gris foncé correspondent aux groupes d'instruments et les petits cercles correspondent chacun à un instrument de la piste son.	52

3.16	Modèle RIO du monde sphérique de Sphericall	52
3.17	Le dispositif utilisé pour la démonstration du festival OFFF (gauche) et un exemple de résultat obtenu pour le monde sphérique (droite)	53
3.18	Table de correspondance permettant de construire la signature d'un feu en fonction du flux de véhicules entrant.	54
3.19	Table de correspondance permettant la prise de décision de chacun des feux	55
3.20	Exemple de configuration de test.	55
3.21	Interface du logiciel de tableau blanc interactif	56
4.1	Evaluation par rapports aux objectifs globaux et au cadre applicatif	62
4.2	Évaluation globale basée sur la mesure globale de l'organisation émergente	62
4.3	Evaluation des phénomènes émergents globaux en prenant en compte les mécanismes locaux	63
4.4	Evaluation des phénomènes émergents globaux en prenant en compte les mécanismes locaux (GAUD et al. 2008a), (GAUD et al. 2007a).	64
4.5	Evolution de l'énergie d'un piéton sur un parcours donné (GAUD et al. 2008a).	67
4.6	Comparaison du niveau d'énergie de plusieurs piétons suivant un parcours similaire (GAUD et al. 2008a).	67
4.7	Comparaison du temps de calcul nécessaire pour des simulations au niveau macroscopique et au niveau microscopique pour un nombre variable d'agents (GAUD et al. 2007a).	68
4.8	Les différents potentiels thermodynamiques	69
4.9	Résultat du calcul du potentiel de Helmholtz dans le cadre des boids.	71
4.10	Profil de la vitesse du véhicule lors du passage entre deux obstacles (CONTET et al. 2009c)	72
5.1	Schéma de principe d'un model-checker	78
5.2	Processus de vérification par la méthode compositionnelle	80
5.3	Comportements d'un véhicule du convoi (EL ZAHER et al. 2012a)	81
5.4	Interactions entre les trois sous comportements d'un véhicule	82
5.5	Ecriture SAL du modèle comportemental d'un véhicule	82
5.6	Les cas de vérification étudiés dans le cadre du projet SafePlatoon pour l'approche locale	83
5.7	Les résultats de vérification étudiés dans le cadre du projet SafePlatoon pour l'approche locale (vitesse maximale)	83

Chapitre 1

Introduction

"Un problème sans solution est un problème mal posé"

A. Einstein

1.1 Historique

Après une formation d'ingénieur à l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg et un DEA en Photonique et Traitement d'Image à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg obtenu en 1999, je me suis orienté vers le monde de la recherche en préparant une thèse de doctorat au sein de l'Université Henri Poincaré Nancy 1. Cette thèse s'est déroulée au sein de l'équipe MAIA (MACHINES INTELLIGENTES ET AUTONOMES) du laboratoire LORIA (Laboratoire l'Orrain de Recherche en Informatique et ses Applications) sous la direction conjointe de François Charpillet et de Vincent Chevrier. Le travail effectué, au cours de cette thèse, s'inscrit dans le paradigme des systèmes multi-agents réactifs. Il a consisté en la proposition d'un modèle, inspiré des systèmes de particules, permettant de fusionner des données issues d'un ensemble hétérogène de capteurs. Ce modèle a été appliqué en particulier à la localisation et au suivi de cibles multiples.

Une fois cette thèse soutenue en 2003, la suite de mes activités de recherche s'est déroulée au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). L'UTBM est née de la fusion de l'IPSé et de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Belfort en 1999. Cette création a donné lieu à une restructuration de la recherche dans le nord de la Franche Comté et à la création du laboratoire Systèmes et Transports (SeT) qui m'a accueilli en 2004 en qualité de Maître de Conférences. En 2012, l'ensemble des laboratoires de l'UTBM se sont fédérés pour constituer l'Institut de Recherche sur le Transport, l'Énergie et la Société (IRTES). Cette fédération a permis, en particulier, la mise en œuvre de projets transversaux pluridisciplinaires stratégiques pour l'établissement. Dans cette nouvelle structure, la thématique des Systèmes Multi-Agents est toujours présente avec des orientations applicatives privilégiées tels que l'énergie (Réseaux électriques intelligents, modélisation de systèmes pile à combustible,...) et les transports (Véhicules intelligents, gestion de trafic,...).

1.2 Contexte

La prise de décision et la résolution de problèmes sont deux thématiques étroitement liées. La résolution de problèmes peut être considérée comme le processus permettant, à partir d'un problème donné, de trouver une solution satisfaisante. La résolution de problème n'est pas uniquement liée à l'informatique puisqu'on la retrouve dans de nombreuses disciplines telles que les sciences cognitives, la psychologie, l'ingénierie,... Les différents travaux menés dans ce cadre ont permis d'expliciter plusieurs stratégies de résolution de problèmes parmi lesquelles nous pouvons citer l'abstraction, le raisonnement par analogie, ou encore la réduction.

La prise de décision, quant à elle, peut être considérée comme un processus permettant de choisir une action (ou une séquence d'actions) pertinente relativement à des critères parmi un ensemble d'actions possibles dans le but de résoudre un problème donné. Les critères de sélection de l'action la plus adaptée prennent en compte à la fois les contraintes du problème à résoudre et le but que le système doit atteindre. Dans certains cas, le processus décisionnel peut se décomposer de la manière suivante (SCHNEIDER 1994) : (1) Définition du problème, (2) Définition des buts, (3) Résolution du problème, (4) Évaluation des solutions obtenues, (5) Sélection d'une solution. Ainsi, dans ce contexte, la résolution de problème peut être considérée comme une étape particulière du processus de décision.

En intelligence artificielle, les approches utilisées pour la résolution de problèmes sont très variées et dépendent à la fois du point de vue adopté pour le mécanisme de prise de décision et du cadre applicatif abordé. Parmi les approches les plus courantes, nous pouvons citer les réseaux de neurones (MATSUDA 2006), (MUKHOPADHYAY et al. 1999), la logique floue (PARASURAMAN et

al. 2003), (NAIM et al. 2012), ou les approches probabilistes de type Markoviennes (THARAKUN-NEL et al. 2007), (ZHOU et al. 2010) ou Bayesiennes (HASSINI et al. 2011), (WANG 2012). Bien évidemment, la littérature présente également des approches utilisant les Systèmes Multi-Agents pour traiter les problématiques de la résolution de problèmes et de la prise de décision (STIRLING 1991), (ZHAO et al. 2010), (FAN et al. 2009). En effet, depuis plusieurs années, les Systèmes Multi-Agents sont devenus une partie importante de la recherche en informatique et plus spécifiquement en intelligence artificielle. Un système multi-agents peut être défini comme étant un ensemble d'entités en interaction entre elles et avec leur lieu d'évolution, appelé communément environnement, et produisant collectivement une organisation spatio-temporelle. La principale difficulté réside dans la prédiction et la vérification des propriétés globales en ne connaissant que les définitions locales des comportements et des interactions mis en œuvre. Il existe dans la littérature deux principales tendances dans la conception de tel systèmes : l'approche cognitive et l'approche réactive. L'approche cognitive s'appuie sur la mise en relation de plusieurs entités ayant des capacités de raisonnement, de comportement et/ou de perception de haut niveau pouvant être qualifiées d'intelligentes. L'approche réactive, quant à elle, ne se focalise pas sur les capacités intrinsèques des agents mais sur leurs interactions. Le principal intérêt de ce type d'approche est sa capacité à s'adapter à de nombreux types de domaines tout en conservant une simplicité tant fonctionnelle que conceptuelle des entités mise en œuvre. Les systèmes multi-agent réactifs se révèlent notamment parfaitement adaptés à la modélisation/simulation de systèmes complexes (HONGQIAO et al. 2009), (CARDON et al. 2009) et la résolution de problèmes dynamiques (BAUTIN et al. 2012a). Ils sont utilisés dans de nombreux cadres applicatifs tels que la simulation de vie artificielle (GALLAND et al. 2009), la navigation multi-véhicules ou multi-robots (CONTET et al. 2011a), (LOZENGUEZ et al. 2011)... En ce qui concerne les modèles d'interaction, plusieurs tendances sont présentes dans la littérature. Parmi celles-ci, les approches d'inspiration biologique, s'appuyant par exemple sur des phéromones artificielles (BRUECKNER 2000), (PARUNAK 1997) ou sur l'adaptation de comportements issus de la biologie comportementale (BOURJOT et al. 2002), et les approches d'inspirations physiques à base de forces (ZEGHAL et al. 1994), (REYNOLDS 1987) ou de champs de potentiel (BAUTIN et al. 2012b), sont les plus courantes.

Utiliser un système multi-agent pour la résolution d'un problème ou pour la construction d'un mécanisme de prise de décision est dans certains cas naturel notamment lorsque le problème à résoudre est distribué fonctionnellement ou topologiquement, ou lorsque certains couplages élémentaires entre les entités du problème sont déjà connus. D'autre part, il existe dans la littérature un certain nombre de méthodologies de conception de système multi-agent parmi lesquelles nous pouvons citer (BURRAFATO et al. 2002), (BERNON et al. 2003), (COSSENTINO et al. 2010),... Bien que certaines méthodologies soient assez peu généralisables, il est possible d'en extraire des grandes lignes de conception. Pour les systèmes réactifs, la tâche est assez délicate car la complexité du système est en grande partie liée au caractère émergent des phénomènes mis en œuvre. Ainsi, la conception de tels systèmes ne se focalise pas sur les agents mais sur les relations les liant (interactions) et la façon dont ces liens sont réalisés (directement ou indirectement via l'environnement). En outre, il s'agit d'étudier comment réaliser le lien entre le système à modéliser ou le problème à résoudre et le système multi-agent.

1.3 Contributions

Nos travaux réalisés au cours de ces années post-doctorales se placent dans le cadre des systèmes multi-agents réactifs d'inspiration physique appliqués à des problèmes concrets réels. Le principal objectif de ces travaux est la construction de systèmes multi-agents réactifs en s'appuyant sur la définition d'architectures basées sur les notions d'environnement et d'interaction pour la résolution de problème et la prise de décision. Ces travaux peuvent être répartis en trois thématiques : L'étude du rôle de l'environnement dans les systèmes multi agents réactifs pour la résolution de problème, la conception d'architectures multi-agents basées sur des modèles spécifiques d'interaction et l'évaluation des phénomènes émergents en utilisant des indicateurs globaux prenant en compte les mécanismes locaux d'interaction.

Étant donné que nous nous sommes attachés à appliquer les modèles conçus à des problèmes réels, nous avons également adopté, en parallèle à ces travaux de conception, une démarche de validation et de vérification des modèles proposés. La validation a été réalisée à la fois en simulation et à travers des expérimentations lorsque cela a été possible. La démarche de vérification, quant à elle, s'appuie sur des outils tels que des "model checkers".

Le rôle de l'environnement dans les SMA réactifs

Le rôle de l'environnement est central dans les Systèmes Multi-Agents réactifs en particulier dans le cadre de la résolution de problèmes. Au cours de ces dernières années, une évolution du rôle de l'environnement dans les SMAR a pu être observée dans la littérature. Initialement, l'environnement était relégué à un rôle de second plan, en tant que lieu d'évolution des agents. Depuis quelques temps, les travaux menés sur la résolution de problèmes attribuent à l'environnement un rôle de plus en plus important. C'est dans ce contexte que se placent nos travaux. Nous avons tout d'abord défini une approche de construction de SMA réactifs pour la résolution de problème s'appuyant sur la notion d'environnement. Cette méthode est très proche des méthodes utilisées en automatique pour définir des systèmes à base de boucle de régulation. Cette contribution s'inscrit dans la continuité des travaux développés au cours de ma thèse et sont issus de l'analyse de la démarche que nous avions utilisée pour la fusion de percepts. Ensuite, nous avons utilisé les principes énoncés dans cette approche dans plusieurs applications telles que l'évitement d'obstacle ou le stationnement automatique de véhicules.

Architectures basées sur un modèle spécifique d'interaction.

Dans le cadre des agents réactifs, il est naturel de considérer que l'intelligence n'est pas contenue dans les agents mais dans l'environnement et les interactions. Il est alors naturel, après s'être intéressé à l'environnement, de se concentrer sur la notion d'interaction. Au cours de nos travaux, nous nous sommes principalement focalisés sur les interactions d'inspiration physique. Ces travaux se sont concentrés sur la définition, l'élaboration et la mise au point de mécanismes d'interaction permettant d'obtenir un état d'équilibre stable ou métastable au niveau du système. Les thématiques abordées, dans ce cadre, sont principalement liées à la navigation multi-véhicules et à la conduite en convoi. Nous avons également abordé des projets liés à l'art et à l'enseignement.

Évaluation des phénomènes émergents en utilisant des indicateurs globaux prenant en compte les interactions.

Dans le cadre de l'utilisation de SMA réactifs pour la résolution de problèmes, l'interprétation du résultat émergent se fait généralement par observation. Celle-ci, si elle peut être satisfaisante

dans certaines applications, s'avère insuffisante pour des applications plus complexes en particulier pour la construction de mécanismes de prise de décision. Dans ce cadre, nos travaux ont porté sur la construction d'indicateurs globaux basés sur la prise en compte des mécanismes locaux d'interaction. Dans un premier temps, nous avons introduit la notion d'énergie (potentielle et cinétique) dans le cadre de la simulation de piétons. Ensuite, nous avons utilisé la fonction de partition appliquée aux boids de Reynolds et aux algorithmes d'évitement d'obstacle et d'assistance que nous avons développés.

Vérification

Dans le prolongement de nos travaux de recherche, j'ai également travaillé sur ces aspects en relation avec des modèles d'interaction d'inspiration physique appliqués à la conduite en convoi. L'utilisation des outils de vérification dans le cadre de nos approches s'inscrit dans une démarche d'évaluation qualitative des modèles que nous avons développés. La vérification est particulièrement intéressante dans le cadre d'approches pour la conduite en convoi car elle permet de faire une exploration exhaustive, relativement à un modèle, de l'espace d'états d'un problème donné. Elle constitue un complément essentiel aux validations que nous avons réalisées tant en simulation qu'en expérimentation avec des véhicules réels.

Dans ce cadre, nous nous sommes concentrés sur l'approche compositionnelle qui est particulièrement adaptée à l'approche locale de conduite en convoi. Nous avons appliqué cette méthode à la vérification de la non-collision entre véhicules constituant un convoi de configuration géométrique colonne et échelon.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en chapitre de la manière suivante.

Le **chapitre 2** présente nos travaux liés à l'étude du rôle de l'environnement dans le cadre des SMA réactifs. Après un retour sur les travaux réalisés antérieurement à ces années post-doctorales sur la localisation et le suivi de cibles, nous présentons des principes méthodologiques pour la conception de tels systèmes en s'appuyant sur la notion d'environnement. Celui-ci peut être considéré comme le lien entre le problème à résoudre et le mécanisme agent de résolution. Ensuite, nous présentons l'application de ces principes de conception à des problématiques liées à la mise en œuvre de véhicules autonomes.

Le **chapitre 3** se focalise sur le rôle et la définition de modèles d'interaction d'inspiration physique appliqués à des problèmes concrets tels que la conduite en convoi de véhicules ou la gestion de trafic.

Le **chapitre 4** traite de l'évaluation et de la mesure des phénomènes émergents. Après une mise en contexte de la problématique de l'émergence et de son évaluation dans le cadre de systèmes complexes, nous présentons deux types d'indicateurs globaux s'appuyant sur la prise en compte des mécanismes locaux d'interaction et leur application à des cas concrets.

Le **chapitre 5** présente nos contributions dans le cadre de l'utilisation de l'approche compositionnelle pour la vérification de propriétés de sûreté pour la conduite en convoi.

Enfin, le **chapitre 6** conclut et présente quelques perspectives de recherche.

Pour chacun de ces chapitres, nous donnerons les références de deux articles illustrant de façon détaillée les travaux exposés. Ces articles sont fournis dans un document annexe à ce manuscrit.

Chapitre 2

Le rôle de l'environnement dans les systèmes multi-agents réactifs

2.1 Introduction

Le rôle de l'environnement est particulièrement critique dans les Systèmes Multi-Agents réactifs en particulier dans le cadre de la résolution de problèmes. Au cours de ces dernières années, une évolution du rôle de l'environnement dans les SMAR a pu être observée dans la littérature. Initialement, l'environnement possédait un rôle de second plan en étant défini soit comme le lieu d'évolution des agents soit comme l'ensemble des agents comme dans l'éco-résolution (FERBER et al. 1991), (DROGOUL et al. 1991). En effet, jusqu'à peu, l'environnement n'était que rarement considéré comme un élément principal et primordial dans la conception de SMA. Les principaux "framework" tels que Jade (BELLIFEMINE et al. 1999), Jack (BUSETTA et al. 1999) ou Zeus (NWANA et al. 1998) ou des méthodologies telles que Tropos (BRESCIANI et al. 2004) réduisent généralement l'environnement soit à un système de communication destiné à effectuer le transport de messages entre agents soit à un ensemble d'éléments primitifs ne permettant pas de le considérer comme élément principal du système. Depuis quelques années, les travaux menés sur les systèmes multi-agents attribuent à l'environnement un rôle de plus en plus actif. C'est particulièrement le cas dans le cadre de systèmes où les agents sont situés (WEYNS et al. 2004). Dans de tels systèmes, l'environnement est considéré comme une entité active ayant ses propres primitives comportementales indépendamment de celles des agents qui y sont associés. Ainsi, l'environnement peut avoir plusieurs rôles. En effet, il peut servir de mémoire partagée pour la population d'agents, être le catalyseur des interactions entre agents ou encore servir d'élément de coordination entre eux. C'est notamment le cas dans les approches d'inspiration biologique à base de phéromones (PARUNAK 1997) ou dans les modèles mettant en œuvre le principe de stigmergie (KANAMORI et al. 2012). Finalement, l'environnement devient peu à peu un élément à part entière dans le cadre des systèmes multi-agents et plus particulièrement dans le cadre de la résolution de problème.

Plusieurs modèles d'environnement sont présentés dans la littérature. Parmi ceux-ci nous pouvons citer les modèles proposés dans (RUSSELL et al. 2010) et qui introduisent une relation de type perception/action entre l'environnement et les agents, et celui proposé dans (FERBER 1995) qui explique que l'environnement peut à la fois être vu comme un élément monolithique commun à tous les agents (environnement centralisé) ou comme un ensemble de cellules, assemblées par l'intermédiaire d'un réseau par exemple (environnement décentralisé). Enfin, certains travaux se focalisent sur la modélisation de l'environnement en tant que système multi-agent (GALLAND et al. 2009).

Dans le cadre qui nous intéresse, à savoir les systèmes multi-agents réactifs pour la prise de décision et la résolution de problèmes, l'environnement a un rôle primordial. Le comportement des agents étant très simple, c'est dans et par l'environnement que le système calcule, construit et communique. Ainsi, l'évolution du système est obtenue par l'intermédiaire de nombreuses interactions agent-agent et agent-environnement. C'est dans ce contexte que se place mon travail de thèse qui s'est déroulé au sein de l'équipe MAIA du laboratoire LORIA-Nancy. L'objectif de ce travail était de développer un système à base d'agents réactifs permettant la localisation et le suivi de cibles en utilisant comme sources d'information un ensemble de capteurs hétérogènes. Ce travail a permis de mettre en évidence l'importance du rôle de l'environnement dans l'obtention du résultat global désiré. Ensuite, les travaux théoriques menés au cours de mes années post-doctorales ont également portés sur la notion d'environnement. Tout d'abord, ces travaux ont permis de définir une approche de conception de SMA réactifs pour la résolution de problèmes en s'appuyant sur la notion d'environnement. Ensuite, nous avons appliqué les principes élaborés dans cette approche dans différentes applications telles que l'assistance à la conduite, l'évitement

d'obstacles ou le stationnement automatique de véhicules intelligents.

Ce premier chapitre se focalise sur le rôle de l'environnement dans le cadre des systèmes multi-agents. Après un résumé des apports de ce travail de thèse, nous présenterons le principe de conception de SMA pour la résolution de problème développé au cours de ces années post-doctorales et reposant sur la formalisation d'un problème à résoudre dans le modèle de l'environnement. Enfin, nous examinerons les travaux développés ultérieurement.

2.2 Retour sur la localisation et le suivi de cibles

2.2.1 Contexte

Mon travail de thèse s'inscrit dans le paradigme des systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problèmes. La principale difficulté de ce type d'approche réside dans le paradoxe existant entre la complexité du problème à résoudre et la simplicité fonctionnelle et conceptuelle des entités en interaction. Au cours de ma thèse, j'ai utilisé une approche s'appuyant sur des agents réactifs d'inspiration physique appliquée à la **fusion de capteurs pour la localisation et le suivi de cibles**. Le principal objectif de ce travail est donc de construire un système multi-agent réactif adapté à cette problématique et pouvant apporter de nouvelles propriétés par rapport aux méthodes classiquement utilisées dans ce cadre.

La démarche utilisée s'inscrit dans une approche de type intelligence en essaim et s'inspire en particulier des systèmes de particules. De part ces caractéristiques, ce type de système peut être considéré comme un système multi-agent. Les agents se comportent alors comme des particules dans un champ de force. Dans ce type de système, les interactions et l'environnement jouent un rôle prépondérant. Les interactions utilisées s'appuient sur un ensemble de forces d'attraction et de répulsion. L'environnement, quant à lui, sert de point d'entrée au système en formalisant les contraintes et les caractéristiques du problème à résoudre. Le comportement des agents en interaction et la dynamique de l'environnement produisent une réponse collective émergente. Ce comportement collectif peut alors être considéré, du point de vue du système, comme une réponse à un problème posé par l'environnement. En effet, en l'absence de variation de l'environnement, le système évolue de façon auto-organisée vers un état stable représentant une solution au problème, conditionnée par la configuration de l'environnement. La matérialisation d'une réponse est obtenue lorsqu'il y a équilibre entre les différentes dynamiques du système : la dynamique propre de l'environnement rendant compte de l'évolution du problème d'une part et la dynamique comportementale des agents d'autre part. La figure 2.1 montre le principe général de l'architecture proposée.

2.2.2 Principe

A travers le problème de la fusion de capteurs pour la localisation et le suivi de cibles, nous explicitons les composants importants du processus de résolution esquisssé précédemment :

L'environnement

L'environnement d'évolution des agents est une représentation artificielle de la zone couverte par les différents capteurs du système. Chaque capteur est capable de fournir un ensemble de percepts localisés. Chacun de ces percepts est intégré dans l'environnement comme une déformation induisant une modification des comportements des agents. En d'autres termes, un percept

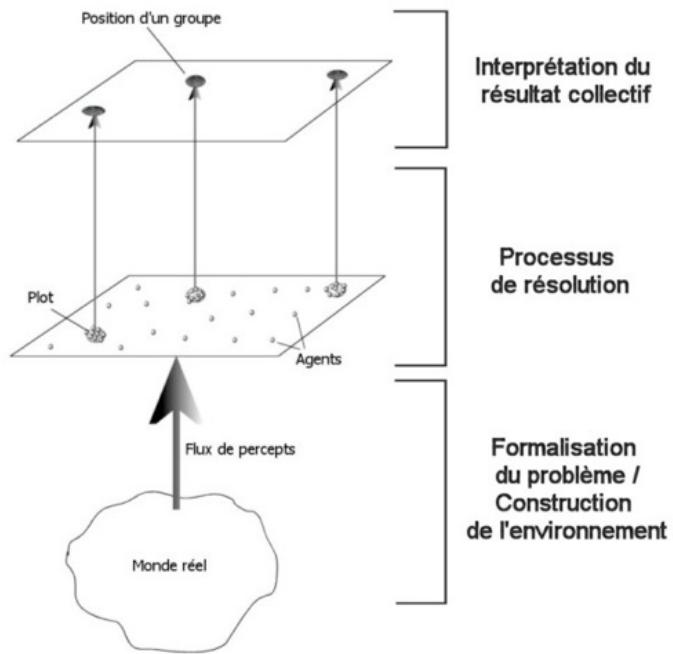


FIGURE 2.1 – Principe Général du processus de localisation et de suivi de Cibles s'appuyant sur les systèmes multi-agents réactifs

construit dans l'environnement artificiel un pôle d'attraction pour les agents.

– Topologie

Nous supposons que la topologie de l'environnement est connue *a priori*. Cette topologie correspond à l'union des zones de perception de chacun des capteurs utilisés. L'environnement des agents peut donc être considéré comme une abstraction du monde réel représentant l'espace d'état des positions possibles des cibles à localiser. Chaque position dans l'environnement des agents est associée à une valeur correspondant à la possibilité de présence d'une cible à cette position. Chaque valeur non nulle est matérialisée par un plot dans l'environnement des agents. Plus la valeur est élevée plus l'hypothèse de présence d'une cible peut être jugée comme fiable.

– Dynamique

La dynamique de l'environnement doit rendre compte de celle des cibles réelles. Ces dernières apparaissent, se déplacent et disparaissent, il faut donc définir au sein de l'environnement des mécanismes permettant de gérer l'apparition, le déplacement et la disparition des informations. Pour cela, nous avons défini un mécanisme d'accumulation des informations s'apparentant au phénomène d'apparition, et un mécanisme d'évaporation lié à la disparition des informations. Ce dernier peut être comparé au mécanisme d'évaporation dans les approches à base de phéromones artificielles. Grâce à la conjonction de ces deux mécanismes, il est possible de prendre en compte le déplacement des cibles.

L'environnement est donc capable de maintenir une cohérence temporelle des informations fournies par les capteurs tout en gérant l'apparition, la disparition et le déplacement des cibles. La figure 2.2 montre comment fonctionnent ces mécanismes.

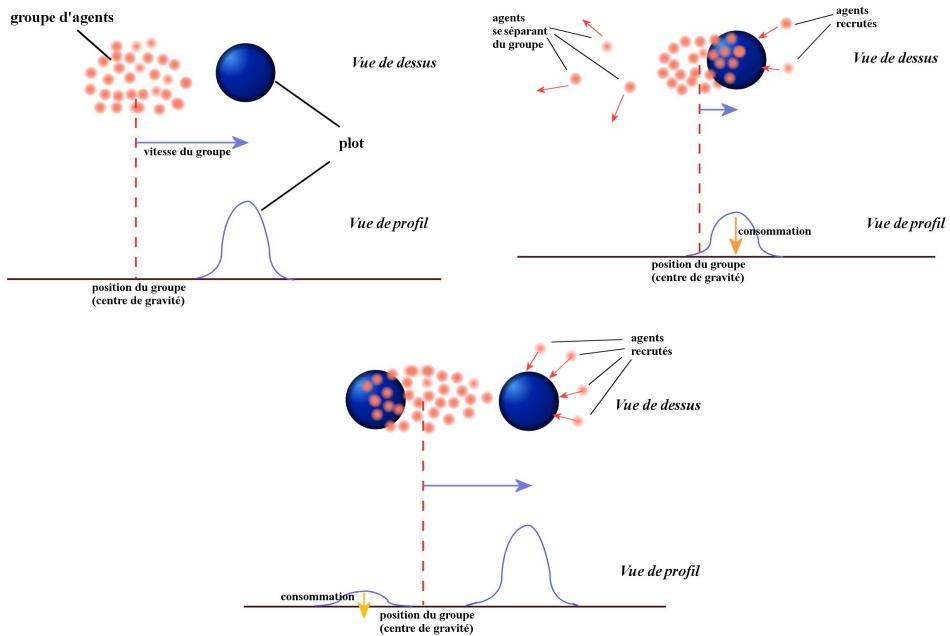


FIGURE 2.2 – (A) Un plot apparaît dans l'environnement. (B) Sous l'effet de l'atténuation, le plot commence à disparaître. (C) La cible réel se déplace créant ainsi un nouveau plot. L'altitude du plot précédent continue à décroître. (D) Le premier plot a disparu et le second commence à s'atténuer.

De plus, de façon à avoir un environnement non conservatif au sens physique, ce qui impliquerait une amplification infinie des mouvements des agents, nous avons introduit une force de frottement fluide.

Les interactions

Les interactions reposent sur un couple de forces d'attraction/répulsion inspirées de la physique Newtonienne. La force de répulsion, qui agit entre les agents, est une force de type $1/r^2$. La force d'attraction, quant à elle, agit entre les agents et les plots. Elle est composée de trois zones d'attraction différentes (cf. figure 2.5) : une zone lointaine en $1/r^2$, une zone plus proche avec une attraction constante et une zone de proximité linéaire en fonction de la distance.

Les agents

Les agents se comportent comme des particules dans un champ de force. Comme indiqué précédemment, ils sont attirés par les percepts et repoussés entre eux. De plus, les agents possèdent un comportement de régulation de la dynamique de l'environnement de façon à contrôler la population des agents présents sur les plots. Ainsi, lorsqu'ils se trouvent sur un plot, les agents amplifient le phénomène d'atténuation. De plus, il y a une inhibition de la répulsion entre les agents lorsque ceux-ci se trouvent sur un plot. La table 2.1 résume l'ensemble des phénomènes mis en œuvre.

Éléments en interaction		<i>Agent/Plot</i>	<i>Agent/Agent</i>
Action	Nom	<i>Attraction</i>	<i>Repulsion</i>
	Équation	$\vec{F} = k\beta m_A \cdot alt_P \frac{\vec{AP}}{\ \vec{AP}\ ^n}$	$\vec{R}_{ij} = I\alpha m_i \cdot m_j \frac{\vec{A}_i \vec{A}_j}{\ \vec{A}_i \vec{A}_j\ ^3}$
Régulation	Nom	<i>Amplification de l'atténuation</i>	
	Équation	$z_i(t) = z_i(t - 1) \cdot \mu^{nb}$	$I = \frac{1}{1 + \nu z_A}$

TABLE 2.1 – Résumés des comportements des agents

Le calcul du comportement de chacun des agents repose sur le principe fondamental de la dynamique. Ainsi, l'accélération de chacun des agents est déterminée en fonction de la somme des forces qu'il subit. Ensuite, après deux intégrations, la vitesse et la position de l'agent sont déterminées. Ce calcul est effectué à chaque pas de temps pour chacun des agents du système.

Le résultat collectif obtenu est une agrégation des agents sur des zones marquées de l'environnement correspondant à des suppositions de présence de cibles matérialisées par l'accumulation de percepts. En outre, en cas d'absence de cible potentielle, les agents, grâce à un phénomène de régulation, tendent à se répartir de façon homogène dans tout l'environnement. L'interprétation de ces phénomènes collectifs permet la localisation et le suivi de plusieurs cibles simultanément.

2.2.3 Résultats

Un des principaux intérêts de l'approche développée est de montrer comment l'environnement peut jouer un rôle central dans le cadre d'un système utilisant des modèles d'inspiration physique. L'utilisation qui est faite de ces modèles peut être assimilée à l'élaboration d'une physique de l'environnement. Ainsi, ce qui est modifié lors de la mise au point du système, ce n'est pas la façon dont les agents vont réagir aux variations de l'environnement mais comment ce dernier va influer sur les éléments qu'il contient.

D'autre part, la gestion dynamique des nouvelles sources d'informations est également une caractéristique intéressante. En effet, le fait de gérer l'apport de nouvelles sources dynamiquement à travers un principe d'accumulation de percepts dans l'environnement artificiel des agents permet d'aborder le problème de la fusion d'informations d'un point de vue réactif.

Les différents tests effectués, tant en simulation qu'avec des robots réels, ont permis de montrer que l'utilisation de SMA constitués d'agents réactifs permet de résoudre la problématique de la localisation et du suivi de cibles de façon efficace. Cette approche réactive est caractérisée par la mise en évidence d'un certain nombre de propriétés remarquables telle que la capacité à gérer un nombre de cibles quelconque et variable en cours de fonctionnement et la gestion des pannes des capteurs. En outre, les tests comparatifs, à partir d'un filtre de Kalman, ont permis de mettre en évidence les qualités de l'approche proposée vis-à-vis d'une méthode de suivi éprouvée. Les résultats obtenus montrent que le dispositif développé permet d'obtenir des résultats similaires tout en ayant recours à moins d'informations concernant le modèle d'observation, le modèle cinématique et la position initiale des cibles. Enfin, la souplesse de notre approche vis-à-vis de la nature intrinsèque des unités perceptives permet d'envisager une utilisation conjointe avec le filtrage de Kalman afin de bénéficier des avantages des deux méthodes.

Cette première approche a permis de mettre en évidence les points essentiels devant être mis en œuvre dans le cadre de l'utilisation de systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problème. Outre la façon de formaliser l'environnement en tant qu'abstraction du problème à résoudre, le principe de régulation de la dynamique de l'environnement grâce à des mécanismes comportementaux des agents a également été mis en évidence.

2.3 Vers une approche de conception de SMA fondée sur l'environnement

Le travail précédent a aboutit à la conception d'un système multi-agent d'inspiration physique pour un problème spécifique. Ce travail a permis de comprendre le fonctionnement des éléments principaux d'un système multi-agent réactif dans le cadre de la résolution de problème. Dans le prolongement de cet exemple applicatif, il a semblé intéressant d'établir, si ce n'est une méthodologie, mais une approche de conception de systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problèmes fondée sur l'environnement. Cette approche de conception s'appuie sur des principes extraits de ce travail préliminaire. Hors des travaux présentés dans (DROGOUL 1993), (MULLER 1998) et (SIMONIN et al. 2001), il n'existe que très peu de travaux traitant ce problème. Cependant, des travaux plus récents tels que (WEYNS et al. 2004) ont montré l'importance du rôle de l'environnement dans le cadre des agents situés réactifs.

En collaboration avec Olivier Simonin (SIMONIN et al. 2006a), nous avons proposé une démarche de conception de SMA réactifs s'appuyant sur l'environnement en tant que lieu de formalisation du problème à résoudre. Cette démarche résulte de la mise en commun de nos expériences respectives dans la construction de modèles multi-agents réactifs. Dans cette approche, l'environnement joue le rôle principal du processus de résolution en faisant le lien entre le problème à résoudre, ses caractéristiques statiques et dynamiques, et le processus de résolution. Contrairement aux approches d'inspiration sociologique ou biologique, la méthode proposée s'appuie sur une étude pragmatique s'inspirant de l'ingénierie. Cette méthode est très proche des méthodes utilisées en automatique pour définir des systèmes à base de boucle de régulation. Ainsi, concevoir un SMAR pour la résolution de problème revient à définir un processus de régulation, ou de filtrage, dont le but est de fournir une solution stable, dans le temps et dans l'espace. La figure 2.3 montre le schéma de principe de la démarche proposée.

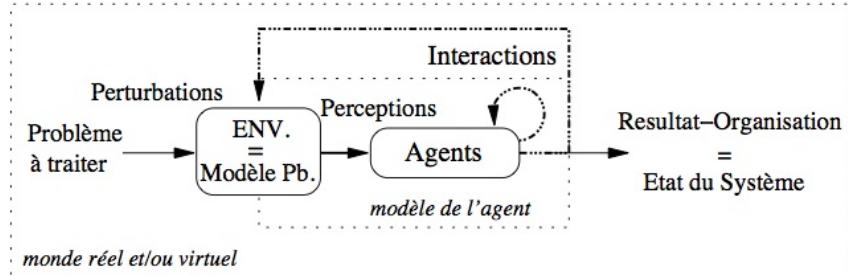


FIGURE 2.3 – Principe de résolution basé sur l'environnement (GECHTER et al. 2005)

Dans ce travail, l'environnement est défini comme étant la couche d'entrée de la boucle de régulation. 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. Ceci, nous a permis de dégager une approche de conception de technique de résolution réactive, qui se décline en 4 étapes :

1. **Définir un modèle de l'environnement** qui représente une abstraction du problème à résoudre.
2. **Définir la perception des agents.** Les agents doivent être capables de percevoir les différents états de l'environnement ainsi que ses variations.
3. **Définir des mécanismes d'interaction** dans le but de réduire les perturbations qui se manifestent dans l'environnement. Ces mécanismes peuvent être définis selon 3 niveaux.
 - a. *Niveau individuel* : réactions locales et individuelles pour palier aux variations de l'environnement (perception des contraintes du problème)
 - b. *Niveau collectif* : s'il existe des situations rendant ces actions locales inefficaces ou conflictuelles, prévoir des actions et des interactions coopératives pour réduire ces phénomènes.
 - c. *Régulation* : actions de régulation des deux types de processus (individuels et collectifs).
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 (MRJEAN 1997). 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 ou être évalué par des fonctions analogues à celles définies dans le chapitre 4.

Plusieurs pistes sont exposées dans (SIMONIN et al. 2006a), (SIMONIN et al. 2005a) et (GECHTER et al. 2005) pour définir chacune de ces étapes. De plus, nous avons montré comment cette approche pouvait être mise en œuvre dans le cadre de la définition du modèle satisfaction/altruisme et du modèle pour la localisation et le suivi. De plus, ce travail a également servi de source d'inspiration pour les travaux menés dans le cadre des problèmes de positionnement (MOUJAHED et al. 2009) ainsi que dans les travaux que nous allons exposés dans la suite de ce chapitre.

2.4 Évitement d'obstacles et aide à la conduite

2.4.1 Contexte

Le but de ce travail est de proposer un modèle de prise de décision fondé sur un système multi-agent réactif pour l'évitement d'obstacles et le suivi de trajectoires. L'évitement d'obstacle, la planification de mouvement et le suivi de trajectoire sont des problèmes bien connus et étroitement liés. Ils sont classiquement résolus avec le calcul de la trajectoire géométrique en évitant les obstacles (LATOMBE 1991). Toutefois, les méthodes standards pour la planification du mouvement ne peuvent être appliquées à un environnement dynamique incertain. En outre, si l'environnement n'est pas connu d'un point de vue global, les méthodes classiques ne sont plus applicables. Par conséquent, la navigation réactive semble être la seule solution appropriée. La littérature classe ces approches en trois catégories :

- *Méthodes inspirées de la physique* : dans ce type de modèle d'inspiration physique, les informations des capteurs sont transformées en lois de commande de direction et de vitesse. Parmi ces méthodes, celles à base de champs de potentiels comme VFH (Vector Field Histogram) et VFF (Virtual Force Field) (KOREN et al. 1991) et (MASOUD et al. 2000) peuvent être citées.
- *Méthodes de sélection de commandes de déplacement* : Cette approche calcule un ensemble des commandes de déplacement pour en sélectionner une par rapport à des stratégies de navigation (SIMMONS 1996). La stratégie de sélection peut être fondée sur des algorithmes classiques tels que l'architecture HTN (Hierarchical Task Networks) ou des courbes paramétriques de type clostoïdes (SCHEUER. 1998).
- *Méthodes de haut niveaux* : Ces méthodes calculent une description de haut-niveau des informations sensorielles pour obtenir une commande de déplacement. Les diagrammes de navigation (MINGUEZ et al. 2004) appartiennent à ce groupe d'approches.

2.4.2 Vers un modèle de décision multi-agent pour l'évitement d'obstacle et le suivi de trajectoires

Principe général

Contrairement aux approches classiques, le véhicule est considéré, ici, comme un système multi-agent dont le but est de prendre la meilleure décision possible en prenant en compte les contraintes d'évolution (présence d'obstacles, but à atteindre,...). A l'instar de ce qui a été présenté précédemment, le système multi-agent est constitué d'un environnement permettant de formaliser le problème, un ensemble d'agents (appelés agent décisionnel : AD) et d'interactions inspirées de la physique qui permettent de mettre en œuvre les principes énoncés dans la section 2.3.

Comme expliqué précédemment, l'environnement peut être considéré comme le lien entre le monde réel et le monde des agents. Ainsi, l'environnement des AD est construit à partir des informations fournies par les capteurs du véhicule. Les limites de l'environnement des AD correspondent aux limites de perception des capteurs. Les interactions permettent de définir les comportements suivants : les agents décisionnels sont repoussés par les obstacles et attirés par les points de passage. L'organisation émergente de ce comportement est interprétée et transformée en une décision globale en utilisant des indicateurs globaux basés soit sur une analyse géométrique (position moyenne, vitesse moyenne des agents, ...), soit sur la fonction de partition comme présenté dans le chapitre 4. Chaque obstacle détecté par un ou plusieurs capteurs est transformé en un point de répulsion dans l'environnement des AD. Les propriétés de ce point de répulsion sont définies à partir des informations des capteurs (taille, orientation, hauteur, ...).

Les points de passages sont également intégrés dans l'environnement, soit comme des points d'attraction s'ils sont dans le champ de perception du véhicule soit comme une direction d'attraction si les capteurs ne les perçoivent pas. La figure 2.4 présente une vue d'ensemble de l'architecture décrite.

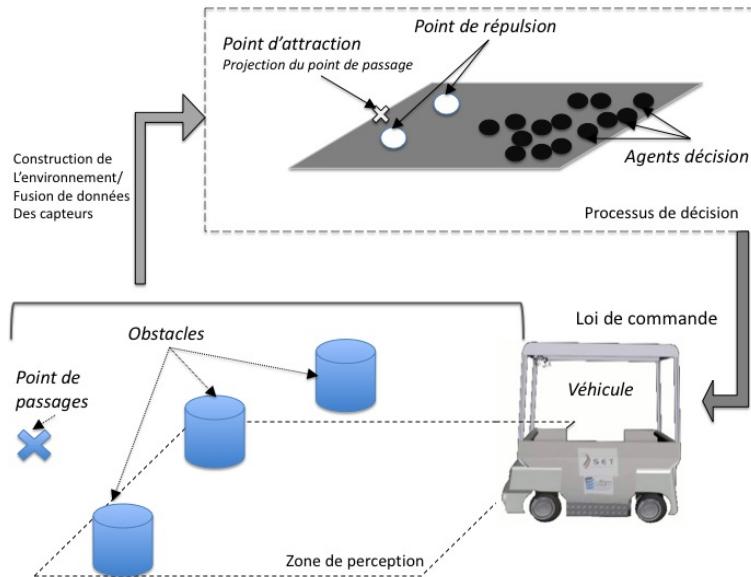


FIGURE 2.4 – Vue d'ensemble du système

Description des mécanismes

Comme vu précédemment, l'**environnement** est l'élément central de l'approche puisqu'elle permet de relier le monde du véhicule et le processus de décision. L'environnement est défini comme étant la représentation de l'union des zones de perception des capteurs. En ce qui concerne sa dynamique, elle est directement liée à celle des obstacles. Pour chaque obstacle réel, un nouveau point répulsif est créé dont les propriétés dépendent de l'objet réel et sont déterminées de la façon suivante :

- *Position2D* : Position déduite des informations des capteurs.
- *Coefficient de répulsion* : Le coefficient de répulsion est appelé R_o et dépend de la taille de l'objet.

L'objectif à atteindre par le véhicule est transformé en point d'attraction avec les propriétés suivantes :

- *Position2D* : Cette position correspond à la position du point d'attraction s'il est dans le champ de perception du véhicule ou une direction d'attraction si les capteurs ne le perçoivent pas.
- *Coefficient d'attraction* : Appelé A_w , ce coefficient est proportionnel à la distance entre le véhicule et le prochain point de passage.

Dans ce contexte, les **agents décisionnels** peuvent être considérés comme des particules dans un champ de forces. Ce champ de force est engendré par l'ensemble des attractions/répulsions générées par les représentations des obstacles et des points de trajectoire dans l'environnement des agents. De plus, chaque agent décisionnel induit un champ de répulsion permettant de conserver

une répartition cohérente des agents dans leur environnement.

A l'instar du modèle développé pour la localisation et le suivi de cible présenté précédemment, les **interactions** sont inspirées de la physique. Trois types d'interaction sont définies :

- *Répulsion entre agents* : ce sont des répulsions de type newtoniennes en $1/r^2$.
- *Répulsion entre agents et obstacles* (incluant les limites de l'environnement) : il s'agit de répulsions analogues à celles présentes entre les agents.
- *Attraction entre agents et points de passages* : Il s'agit d'une simple attraction linéaire. Il y a une différentiation faite dans le calcul si le point de passage se trouve dans la zone de perception ou s'il se trouve en dehors de la zone de perception. La figure 2.5 montre comment est réalisé cette différentiation.

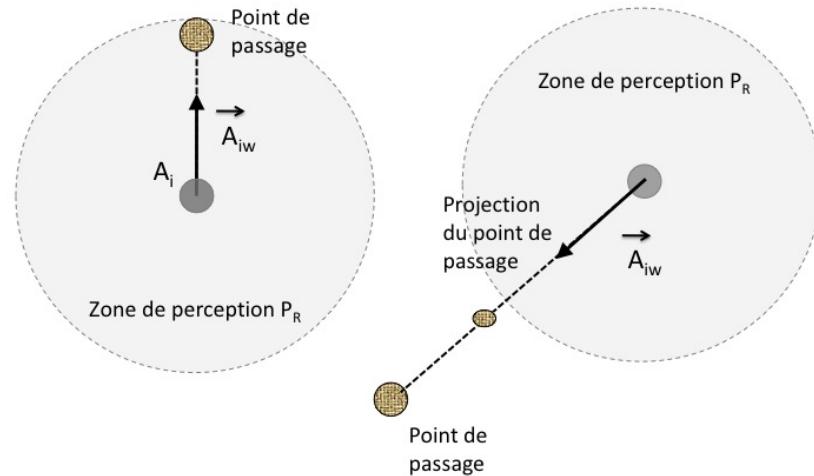


FIGURE 2.5 – Comportement d'attraction Agent-point de passage (Gauche) point de passage dans la zone de perception, (Droite) point de passage en dehors de la zone de perception

La position, la vitesse et l'accélération de chaque agent sont calculées en continu en appliquant la relation fondamentale de la dynamique.

La **prise de décision** est faite en prenant en considération la configuration spatiale et la dynamique de la population d'agents. Même si le chapitre 4 étudie plus en détail ce point spécifique, nous pouvons mentionner ici que le calcul de la décision à appliquer au véhicule est réalisé en prenant en compte le centre de gravité, la vitesse moyenne et les énergies potentielle et cinétique de la population d'agents. La position moyenne permet de calculer le vecteur décision en fonction de la position relative du véhicule dans l'environnement des agents décisionnels. Cette décision est représentée par un vecteur dont on déduit de l'orientation un angle et de sa norme une vitesse à appliquer sur le véhicule. L'angle du vecteur vitesse est ensuite modifié en fonction de la valeur de la vitesse moyenne. Cette modification produit le vecteur \vec{M} qui vient de la combinaison du vecteur \vec{M}_p et de la vitesse moyenne \vec{M}_s . Ensuite, la norme du vecteur de

combinaison \vec{M} est fixée en fonction de la norme du vecteur vitesse moyenne (cf. Figure 2.6), comme le décrit l'équation suivante :

$$\vec{M} = \left(\vec{M}_p + \frac{\vec{M}_s}{\sqrt{nb_A}} \right) \frac{\|\vec{M}_p\|}{\left\| \left(\vec{M}_p + \frac{\vec{M}_s}{\sqrt{nb_A}} \right) \right\|} \quad (2.1)$$

avec nb_A le nombre d'agents décisionnels.

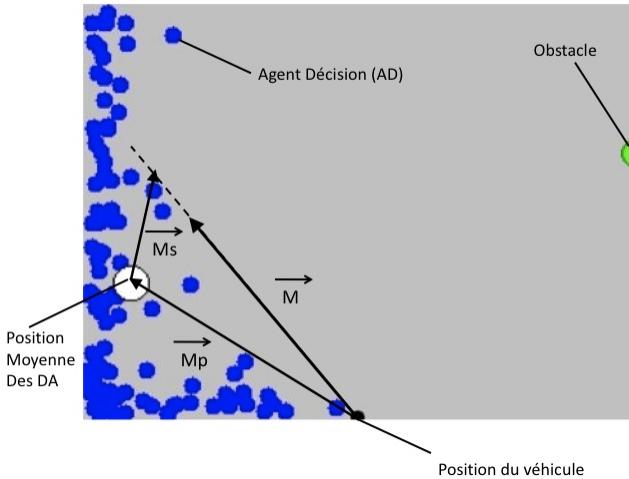


FIGURE 2.6 – Détermination du vecteur décision

Ce vecteur est ensuite appliqué au véhicule.

2.4.3 Résultats

Les performances du modèle proposé ainsi que ses propriétés peuvent se résumer de la façon suivante :

- Ce mécanisme de prise de décision a été mis en œuvre à la fois en simulation (YANG et al. 2008a), en utilisant un modèle simplifié de véhicule (CONTET et al. 2009c), avec le simulateur de véhicule du laboratoire IRTES-SeT, ainsi qu'avec des véhicules réels (GECHTER et al. 2010), (GECHTER et al. 2011a).
- Ce modèle présente une robustesse et une adaptabilité aux différentes configurations de trajectoires et aux différentes configurations de la distribution des obstacles dans l'espace de perception du véhicule.
- Le système s'adapte également aux déplacements des obstacles et permet de modifier dynamiquement la trajectoire du véhicule.
- Le système montre également une adaptabilité aux contraintes et modifie les paramètres de déplacement du véhicule, en particulier la vitesse, en fonction de la proximité des obstacles.

2.4.4 De l'évitement d'obstacle à l'aide à la conduite

Le modèle présenté dans la section précédente a été adapté de façon à pouvoir être utilisé comme système embarqué d'aide à la conduite. La principale différence entre un dispositif d'évitement d'obstacle et de suivi de trajectoire et un mécanisme d'aide à la conduite réside dans la

façon d'appréhender la trajectoire de référence. Dans le cas décrit précédemment, la trajectoire et les points de passage sont prédéfinis et ne varient pas au cours de l'évolution du véhicule. Dans le cadre de l'aide à la conduite, la trajectoire (ou le point de contrôle) est définie en cours de fonctionnement de façon dynamique soit par un opérateur humain soit par un programme annexe gérant la conduite autonome du véhicule.

Interaction avec un opérateur humain

Ce système a été mis en œuvre sur des véhicules réels. Le comportement observé est très différent de ceux que l'on peut obtenir avec des approches classiquement développées en automatique. En effet, le comportement du dispositif est très progressif. Le système intervient très peu sur la direction et sur la vitesse du véhicule lorsque ce dernier se trouve loin des obstacles. Par contre, plus le véhicule s'approche d'un obstacle plus l'intervention du système est importante. De la même façon, lorsque les obstacles se trouvent de chaque côté du véhicule (dans une configuration de type canyon par exemple) le dispositif agit sur la vitesse du véhicule en la réduisant en fonction des contraintes imposées par les obstacles.

Interaction avec un algorithme de contrôle de véhicule

De la même façon, nous avons utilisé ce système en association avec un algorithme de contrôle de véhicule autonome. Cette mise en œuvre a été réalisée en particulier dans le cadre du projet ANR Safeplatoon, où le dispositif a été associé à un algorithme de déplacement de véhicules en convoi (cf. chapitre 3 pour plus de détail sur l'algorithme de conduite en convoi utilisé).

2.5 Stationnement automatique

2.5.1 Contexte

De nos jours, l'assistance au stationnement est principalement mise en avant par les fabricants d'automobiles. La plupart de ses méthodes étant protégées par des brevets, il est donc assez difficile de connaître avec exactitude leurs principes et la façon dont ils sont mis en œuvre. Cependant, l'étude des trajectoires suivies par les véhicules et la liste des capteurs utilisés permettent d'extraire un certain nombre d'indices. Le processus de stationnement est le suivant :

1. Le véhicule détecte une place disponible (généralement égale à 1,5 fois la longueur du véhicule à stationner).
2. Le système est activé par le passage de la marche arrière.
3. Le véhicule effectue la manœuvre de façon semi-automatique (i.e. le véhicule contrôle la direction alors que le conducteur contrôle l'accélération) ou totalement automatique.

Bien que les méthodes utilisées par les constructeurs soient classifiées, il existe dans la littérature des travaux traitant des trois étapes principales nécessaires au stationnement : La détection de la place disponible (SUHR et al. 2010), (JUNG et al. 2007), (PARK et al. 2008), la détermination de la trajectoire à suivre (FINTZEL et al. 2004), (JUNG et al. 2006) et le suivi de cette trajectoire (ELKAIM et al. 2006), (ENCARNACAO et al. 2001).

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de ne pas nous occuper de la détection de la place disponible pour nous focaliser sur les deux dernières étapes.

2.5.2 Principe

L'approche proposée est similaire à celle utilisée dans le cadre de l'évitement d'obstacle et de l'aide à la conduite. Le modèle proposé repose sur l'utilisation d'un environnement construit à partir des perceptions du véhicule à stationner. Il représente le voisinage perceptif du véhicule incluant la place dans laquelle il doit stationner et les éventuels obstacles empêchant le suivi de la trajectoire. Dans cet environnement, la place de parking est matérialisée par deux points caractéristiques correspondants à la position où doit se trouver l'avant du véhicule et à la position où doit se trouver l'arrière de celui-ci.

L'ensemble des agents est constitué de deux populations. Chacune est attirée par l'un des deux points caractéristiques. De plus, un mécanisme de répulsion entre agent/agent et agents/obstacles est mis en place en utilisant des forces inspirées de la physique. Les comportements globaux des deux populations sont évalués indépendamment selon la même méthode que celle utilisée dans l'évitement d'obstacles. Ensuite, ces deux évaluations sont fusionnées pour fournir au véhicule une consigne adaptée. Le processus est représenté par la figure 2.7.

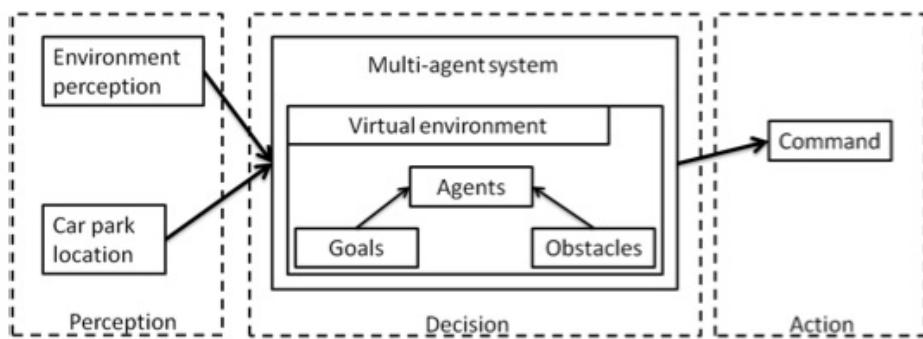


FIGURE 2.7 – Principe de fonctionnement du système de stationnement automatique

2.5.3 Résultats

Le système a été mis en œuvre en simulation et avec des véhicules réels et ceci pour plusieurs types de stationnement (créneau, épis, bataille). En l'absence d'obstacle, les résultats obtenus sont légèrement de moins bonne qualité que ceux obtenus avec les approches classiquement utilisées pour ce type de tâche. Ceci se traduit particulièrement par la nécessité d'avoir un emplacement de stationnement de plus grande taille pour le stationnement en bataille et par un moins bon alignement avec la place de parking. Cependant, contrairement aux approches classiques, le système à base d'agents réactifs est capable de trouver une solution, en stationnement en créneau, avec des places de taille réduite (<1,5 fois la taille du véhicule). De plus, dans tous les cas, il est capable d'intégrer la présence d'obstacles mobiles sur la trajectoire de stationnement (cf. figure 2.8).

2.6 Comparaison avec les approches de type filtrage particulaire

La littérature contient plusieurs exemples d'approches similaires à celles proposées dans ce chapitre telles que les approches de type "swarm" d'inspiration physique (SIMONIN 2000), (ZEGHAL et al. 1994), or (REYNOLDS 1987) ou d'inspiration biologique utilisant des phéromones

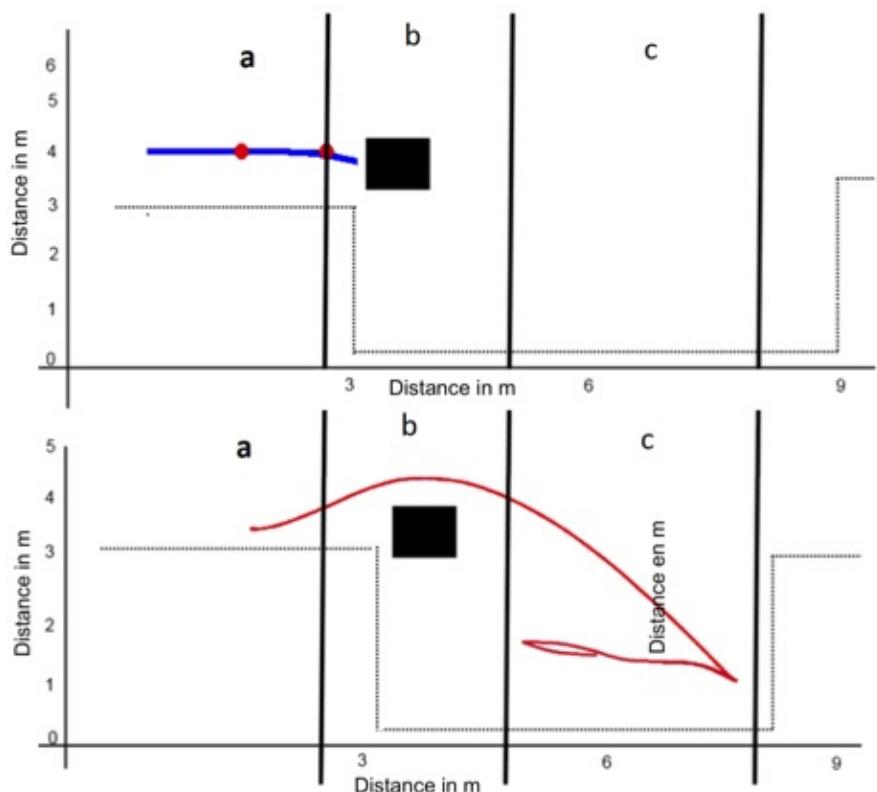


FIGURE 2.8 – Trajectoires de stationnement automatique avec une méthode classique (en haut) et avec la méthode à base d'agents réactifs (en bas)

digitales par exemple (BRUECKNER 2000), (DORIGO et al. 1999), (PARUNAK 1997). D'autres méthodes n'utilisant pas les systèmes multi-agents possèdent des caractéristiques proches de celles des modèles que nous avons développés. C'est le cas notamment des algorithmes de filtrage particulaires.

L'idée principale derrière le filtrage particulaires est la construction d'estimateurs probabilistes d'un certain vecteur d'état en prenant en compte un modèle du processus à étudier, un modèle d'observation de ce processus et un modèle statistique du bruit de mesure ou d'estimation de l'état du système. L'approche par filtrage particulaires repose sur l'exploration de l'espace d'états par un ensemble de particules générées de façon aléatoire en utilisant une loi de probabilité liée à l'observation du processus à étudier. Le filtrage particulaires est issu à la fois des algorithmes de Markov et des méthodes de type filtrage de Kalman. Ainsi, les informations nécessaires pour appliquer ce type de méthodes sont similaires à celles utilisées pour les approches de type Kalman (état initial, modèle d'évolution, modèle d'observation,...). Le principal avantage est la possibilité d'explorer l'espace d'état de façon parallèle en explorant plusieurs hypothèses. Ceci permet d'obtenir une fiabilité par rapport au bruit présent sur le modèle d'observation (HUE et al. 2000). Le lien avec les approches Markoviennes est fait au niveau des lois de probabilités utilisées pour déployer les particules dans l'espace d'état. Ces lois sont analogues à celles utilisées dans les processus décisionnels de Markov (MDP) ou encore dans les processus décisionnels partiellement observables (POMDP). Le principal avantage est alors la possibilité de limiter l'explosion combinatoire de ces méthodes en faisant un sous échantillonnage probabiliste de l'espace d'état en utilisant les particules. Parmi les méthodes les plus utilisées, en particulier pour la localisation, nous pouvons citer celles développées par Dieter Fox (FOX et al. 1999), (FOX et al. 2000) et (DELLAERT et al. 1999).

Ainsi, il existe un certain nombre de similarités entre les approches proposées dans ce chapitre et les méthodes de filtrage particulaires. D'un certain point de vue, les deux approches peuvent être considérées comme du filtrage. Elles reposent sur une exploration de l'espace d'état du processus de façon à déterminer l'état le plus pertinent. Cette exploration se faisant en utilisant des modèles inspirés de la Physique.

Cependant, au delà de ces similarités, ces approches possèdent des différences fondamentales :

- Dans le cadre de l'approche agent, l'environnement est un élément actif du processus de résolution alors que dans le filtrage particulaires, il ne sert qu'à représenter l'espace d'état.
- Dans nos approches, la dynamique des agents est découpée de la dynamique des éléments présents dans le problème à résoudre. Ce n'est pas le cas dans les approches particulières puisque le modèle dynamique des particules est lié au modèle des éléments qu'elles représentent.
- Les agents présents dans nos approches ne sont pas uniquement de simples particules. En effet, même s'ils subissent les lois physiques de l'environnement, ils interagissent avec celui-ci en le modifiant (phénomène d'inhibition de la répulsion dans la localisation par exemple).
- Dans les systèmes de particule, chacune d'entre elle peut être considérée comme étant détentrice d'une partie de la solution (relativement à son poids). Dans le cas des systèmes à base d'agents, la solution est obtenue collectivement par émergence d'une certaine organisation ou structure spatio-temporelle.
- Contrairement aux systèmes particulaires, il n'est pas encore possible de définir un critère d'optimalité pour les systèmes à base d'agents. Cependant, il est possible de caractériser certaines propriétés émergentes en utilisant des indicateurs adaptés tels que ceux présentés dans le chapitre 4 de ce mémoire.

Par conséquent, malgré leurs similarités, les deux méthodes diffèrent de façon importante du point de vue théorique. Les approches, présentées dans ce chapitre ne peuvent simplement être considérées comme une approche de type particulière notamment de part le rôle primordial joué par l'environnement des agents.

2.7 Conclusion

Notre activité de recherche sur la conception de SMA réactifs pour la résolution de problème a permis de mettre en évidence l'importance de l'environnement dans ce type d'approche. En effet, celui-ci permet de faire le lien entre l'espace d'état du problème à résoudre et l'espace d'état des solutions parcouru par les agents. La principale difficulté réside dans la formalisation de l'environnement qui doit être en adéquation avec l'espace d'état du problème à résoudre, à la fois au niveau topologique et au niveau dynamique, et permettre une interprétation de l'organisation émergente des agents dans l'espace d'état des solutions. Ainsi, la conception de l'environnement peut être considérée comme la définition d'une fonction de projection de l'espace du problème vers l'espace des solutions.

Dans les travaux que nous avons réalisés jusqu'alors, cette étape de projection s'effectue avec des espaces d'état possédant des dimensions identiques. Maintenant que les grands principes de l'approche sont posés, nous envisageons d'appliquer cette méthode pour des problèmes dont l'espace d'état possède une dimension différente de celle de l'espace des solutions. Par exemple, nous réfléchissons à la possibilité d'utiliser cette approche dans le cadre des smartgrid.

Certains travaux exposés dans ce chapitre sont détaillés dans les publications suivantes : (**GECHTER** et al. 2006) et (YANG et al. 2008b) présentes dans le document annexe.

Chapitre 3

Modèles spécifiques d'interaction et
modèles d'interaction inspirés de la
physique

3.1 Introduction

Dans le cadre des agents réactifs, il est habituel de considérer que l'intelligence n'est pas contenue dans les agents mais dans l'environnement et les interactions. Il est alors naturel, après s'être intéressé à l'environnement, de se concentrer sur la notion d'interaction. Une interaction peut être définie comme une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques (FERBER 1995). Elles peuvent être considérées comme des actions ayant une influence sur la perception des autres agents induisant ainsi une modification de leurs actions. La principale différence, pour la résolution de problème, entre un système multi-agent et un système classique réside dans le rôle et l'importance de la mise en œuvre des interactions, celles-ci prévalant sur la conception des agents eux mêmes (MULLER 1998).

Les interactions peuvent prendre plusieurs formes dans les systèmes multi-agents. Ce lien entre agents peut se matérialiser de façon directe, par action d'un agent sur un autre par exemple (DROGOUL et al. 1991), ou indirecte par l'intermédiaire d'un agent ou de l'environnement comme dans le cadre des approches utilisant des dépôts de phéromones (PARUNAK 1997). La communication peut être également vue comme une forme d'interaction. Dans certaines applications, elle peut être considérée comme étant à la base des interactions et de l'organisation sociale.

Dans les systèmes multi-agents réactifs, il existe principalement deux sources d'inspiration pour la définition des interactions : la Biologie et la Physique. Les approches d'inspiration biologique reposent généralement sur l'étude des mécanismes mis en place dans les populations d'insectes sociaux. Parmi les exemples les plus courants, nous pouvons citer les algorithmes s'inspirant des fourmis utilisant comme média d'interaction des phéromones artificielles. Celles-ci sont déposées par les agents dans l'environnement afin de construire une source d'information partagée au niveau global (BONABEAU et al. 1999), (DORIGO et al. 1999), (COLORNI et al. 1991), (DiMARZO-SERUGENDO et al. 2004). En général, de telles approches sont utilisées pour la construction de chemins entre des ressources et un lieu privilégié (PARUNAK 1997), (RAMOS et al. 2000). D'autres approches s'inspirent de mécanismes d'interaction issus d'autres familles d'animaux sociaux tels que les loups, les termites, les lucioles ou les araignées (BOURJOT et al. 2002). Le principal intérêt des approches d'inspiration biologique est que l'organisation globale émergente est connue à l'avance (apparition de chemins optimaux (BRUECKNER 2000), création de zone de couverture pour des régions possédant une altitude constante (BOURJOT et al. 2002),...). Ainsi, la démarche suivie dans ce cadre repose principalement sur l'adaptation de mécanismes biologiques connus à un problème donné (Adaptation des algorithmes de recherche du plus court chemin chez les fourmis adapté au problème du voyageur de commerce par exemple). Le résultat du système est obtenu lorsqu'il y a équilibre entre un mécanisme d'amplification (dynamique de dépôt des informations (phéromones) dans le cas des fourmis) et un mécanisme d'atténuation (évaporation, diffusion dans le cas des fourmis). Une fois cet équilibre obtenu, le résultat fourni par le système correspond à la persistance de l'information dans l'environnement (structure géométrique des agents ou de leurs constructions par exemple). La propriété d'adaptation du système est obtenu lorsque, sous l'action d'une perturbation extérieure, l'équilibre est rompu. Le système recherche alors un autre point d'équilibre.

Les approches d'inspiration physique sont également très répandues. Dans ce cadre, la démarche n'est pas induite par le résultat global que l'on veut obtenir mais par les comportements que l'on veut fournir aux agents. Il est assez courant que les approches d'inspiration physique reposent sur des mécanismes de type attraction et répulsion (MOUJAHED et al. 2009), (ZEGHAL et al. 1994), (SIMONIN et al. 2001). De façon similaire aux approches d'inspiration biologique, l'objectif est d'obtenir un état d'équilibre stable ou métastable permettant de rendre compte de

l'état du système. Cet état d'équilibre est généralement matérialisé par une structure spatiale formées par les agents.

Il existe bien évidemment d'autres mécanismes d'interaction qui ne correspondent pas à ces deux sources d'inspiration s'appuyant sur d'autres sources d'inspiration extraite de domaines tels que les sciences cognitives, la sociologie,... De plus, il existe des mécanismes spécifiques à une tâche ou une application donnée.

Je me suis essentiellement focalisé sur les interactions d'inspiration physique. Mes travaux se sont concentrés sur la définition, l'élaboration et la mise au point de mécanismes d'interaction permettant d'obtenir des états d'équilibre. Les approches proposées reposent principalement sur des principes d'attraction/répulsion. Pour instancier ces principes, il est possible d'avoir recours à plusieurs mécanismes physiques tels que les forces de gravitation newtonniennes, les champs de potentiel, les forces de type ressort, les forces électro-magnétiques,...(KOREN et al. 1991), (BAUTIN et al. 2012a), (BAUTIN et al. 2012b). La première partie de ce chapitre, sections 3.2 et 3.3, est consacrée à ces approches d'inspiration physique appliquées à la navigation multi-véhicules, à la conduite en convoi (Travaux de thèse de Jean-Michel Contet, de Madeleine El-Zaher et de Baudouin Dafflon) et à des travaux mêlant art et technologie. La seconde partie de ce chapitre, sections 3.4 et 3.5, est ensuite consacrée à des modèles d'interaction spécifiques à des applications telles que l'interaction entre tableaux blancs interactifs ou la gestion de trafic aux carrefours.

Afin de présenter ces travaux de manière à la fois précise et concise, nous avons choisi d'utiliser le formalisme du méta-modèle **RIO** (Rôle-Interaction-Organisation) développé au sein du laboratoire SeT (HILAIRE et al. 2001). Dans ce méta-modèle le **rôle** est l'unité de description de comportement. Il correspond à une abstraction d'un comportement ou d'un statut. Les rôles sont liés entre eux par le concept d'**interaction**, c'est-à-dire une séquence d'actions dont les conséquences ont une influence sur le comportement futur des rôles. Enfin, l'**organisation** est définie comme une unité logique définissant un ensemble de rôles en interaction ainsi que leur contexte.

3.2 Modèles d'interaction pour la navigation multi-véhicules

3.2.1 Contexte

L'idée de véhicule intelligent est née au début des années 90. Elle est liée au développement, de plus en plus important de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication dans l'industrie automobile et aux potentialités qu'elles offrent. Les travaux de recherche menés dans ce cadre ont donné lieu à un grand nombre d'applications et d'innovations visant à l'amélioration et à l'évolution des véhicules automobiles classiques tant au niveau de la sécurité active ou passive, qu'au niveau de leurs interactions avec l'environnement. Cette évolution a également donné lieu à l'exploration de nouvelles approches de mobilité incitée par le contexte socio-économique. Parmi les applications les plus courantes, nous pouvons citer : l'assistance à la conduite (anti-blocage des roues, anti-patinage, régulateur de vitesse auto-adaptatif, évitemennt d'obstacle, ...), la conduite automatisée, la communication inter-véhicule, la navigation multi-véhicules, la conduite en convoi,...

Dans la majorité de ces applications, l'intelligence conférée au véhicule se matérialise par sa capacité à prendre des décisions de manière proactive et à interagir avec son environnement (l'infrastructure et les autres véhicules par exemple) à partir de perceptions issues de capteurs.

Ainsi, le mécanisme de décision peut se représenter selon le schéma de la figure 3.1.

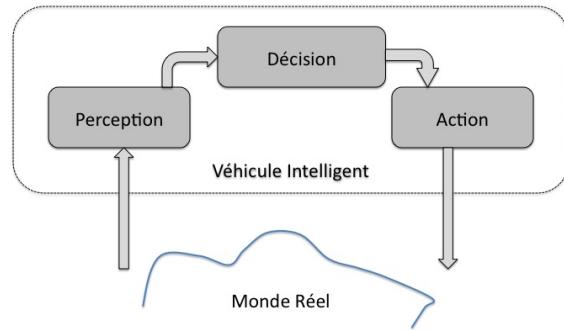


FIGURE 3.1 – Mécanisme de décision

3.2.2 La conduite en convoi

Un convoi peut être défini comme l'organisation spatiale d'un ensemble de véhicules suivant une configuration géométrique spécifique. Dépendant du type d'application (urbain, agricole, militaire, . . .), la configuration géométrique peut prendre plusieurs formes. Les configurations sont caractérisées par les écarts latéraux et longitudinaux entre les véhicules. Les configurations géométriques les plus étudiées sont les suivantes (cf. figure 3.2)

- **Colonne** : Le convoi est constitué d'un ensemble de véhicules qui se suivent l'un derrière l'autre.
- **Ligne** : Chaque véhicule se déplace en respectant un écart longitudinal nul et un écart latéral constant avec ses voisins dans le convoi.
- **Échelon** : Les véhicules respectent un écart longitudinal et latéral constant non nul et identique pour tous les véhicules.

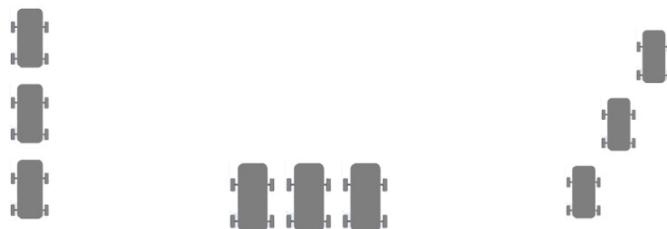


FIGURE 3.2 – Les configurations usuelles de la conduite en convoi : colonne (à gauche), ligne (au centre) et échelon (à droite)

Bien évidemment, il existe d'autres types de formations, en particulier dans le domaine militaire telles que la configuration en "L" ou la configuration diamant. Cependant, ces configurations peuvent en général être appréhendées comme une composition des trois configurations de base.

3.2.3 Approche locale contre approche globale

D'une manière générale, le contrôle de véhicules en convoi se fait soit par une approche de type locale soit par une approche de type globale. Dans l'approche locale, chaque véhicule suit uniquement un **véhicule de référence local** (leader local) présent dans son proche voisinage perceptif. Il s'agit par exemple de son prédecesseur dans le cas d'une formation de type colonne. Dans l'approche globale, chaque véhicule suit une référence globale au train qui peut être soit une trajectoire prédéfinie à l'avance soit la trajectoire fournie en direct par le premier véhicule du train. Chacune de ces approches possède des caractéristiques et des propriétés intéressantes. Les approches locales sont en général plus simples à mettre en œuvre et nécessitent des moyens de perception moins coûteux. Cependant, la qualité de suivi en terme d'écart latéral est généralement moins bonne et elles sont fortement tributaires des algorithmes de perception utilisés. A l'opposé, les méthodes dites globales montrent de bonnes qualités de suivi de trajectoire mais nécessitent un positionnement précis dans un référentiel global impliquant l'utilisation de capteurs généralement coûteux et des moyen de communication performants.

Nos travaux se placent dans le cadre de l'approche locale. L'objectif de ce travail est d'essayer de se rapprocher autant que possible de la qualité de suivi des approches globales tout en conservant une certaine simplicité perceptive inhérente aux approches locales.

3.2.4 Formalisation du problème

En faisant le parallèle entre le fonctionnement d'un agent (réactif ou cognitif) et d'un véhicule dit "intelligent", il semble naturel d'associer à chaque véhicule un agent. Cette approche est classique dans la littérature. La perception de l'agent correspond dans ce cas à celle du véhicule et le résultat de sa décision s'applique directement au véhicule. Concevoir un agent dans ce contexte revient à construire un mécanisme décisionnel s'appuyant sur les perceptions disponibles pour le véhicule et ayant pour but l'élaboration d'une action réalisable et adaptée à la partie matérielle du véhicule physique. Le choix de ce mécanisme décisionnel est très vaste dans la littérature. Il peut s'agir d'algorithmes utilisant la logique floue (LEE et al. 2003), (LEE et al. 2002), (KODAGODA et al. 2002), les réseaux de neurones (CAO et al. 2007), les modèles markoviens (FOX et al. 2000),... Cependant, il existe assez peu, dans la littérature, de mécanismes utilisant un paradigme réactif de type stimulus/réponse.

Ainsi, nous considérons chaque véhicule du convoi comme un agent réactif capable de percevoir son environnement et de réagir en maintenant une configuration cohérente avec son véhicule de référence local. Dans ce contexte, la conduite en convoi est le résultat des interactions directes entre chaque véhicule et le véhicule de référence. Le schéma 3.3 donne la description RIO de l'approche.

Dans cette description, deux principaux rôles sont à considérer. Le rôle **Head Vehicle** est celui joué par le véhicule local référence. Le rôle **Follower Vehicle** est celui joué par le véhicule suiveur. Ce rôle inclut à la fois les sous-rôles liés à la perception et au comportement désiré (**VehRun**). Hormis le véhicule leader de l'ensemble du convoi qui ne joue que le rôle "Head Vehicle", tous les véhicules du convoi jouent simultanément les deux rôles. Dans la suite de cette section, nous allons supposer que la perception est capable de nous fournir des informations suffisantes quant à la configuration spatiale entre le véhicule suiveur et son véhicule de référence. Nous nous focaliserons donc, dans la suite, sur la réalisation du rôle **VehRun** qui a pour but de calculer la commande à envoyer à la partie matérielle du véhicule en fonction de la perception et du comportement désiré.

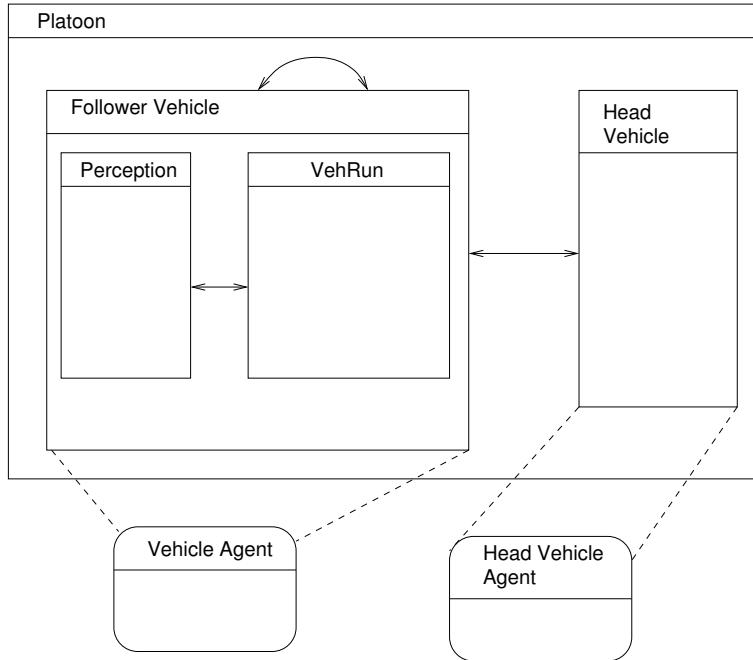


FIGURE 3.3 – Diagramme RIO pour la conduite en convoi

Notre approche repose sur l'utilisation d'un lien mécanique virtuel entre deux véhicules, le véhicule suiveur et son véhicule de référence local. Plusieurs types de liens ont été étudiés, lien de type attraction/répulsion gravitationnelles, ressort et amortisseur simple (thèse de Jean-Michel Contet) (CONTET 2010), ressorts doubles (thèse de Madeleine El-Zaher) (EL-ZAHER 2013). Les principaux objectifs de nos travaux visent l'obtention d'un train ou d'une configuration stable dans l'espace et dans le temps et d'un suivi précis en courbe. Pour cela, nous avons mené plusieurs études sur la position des points d'ancrage et sur la prise en compte du côté non inertiel du référentiel local. De plus, pour chaque modèle, nous nous sommes assuré de la stabilité du convoi en utilisant la "string stability" et le théorème de Lyapunov. (CONTET 2010), (EL-ZAHER 2013).

3.2.5 La configuration colonne

Dans le cas particulier de la configuration colonne, le véhicule de référence local, pour un véhicule donné, correspond à son prédecesseur dans le train. Après avoir étudié plusieurs types d'interactions physiques telles que l'attraction/répulsion classique dont les résultats n'étaient pas satisfaisants, nous nous sommes intéressés aux liens mettant en œuvre des ressorts couplés à un dispositif d'amortissement. Ce modèle est assez courant (c'est le principe de l'amortisseur automobile) ; on peut également le trouver sous le nom d'impédance-contrôle. Le principe est d'utiliser la faculté qu'à un ressort à s'opposer au mouvement qui lui est imprimé (i.e. le ressort génère une force tendant à réduire sa taille s'il est étiré et une force tendant à l'étendre s'il est compressé). Nous avons ajouté un dispositif de frottement permettant de "lisser" les oscillations liées à l'action du ressort en vue d'assurer une certaine stabilité.

Le modèle utilisé n'est pas à proprement parlé un modèle physique classique. En effet, l'utilisation d'un modèle classique impliquerait une influence de l'interaction sur les deux véhicules reliés par le ressort comme dans (YI et al. 2005). Or, ici, uniquement le véhicule suiveur subit l'influence

de la liaison mécanique virtuelle. En effet, étant donné que nous nous plaçons dans le paradigme agent, le véhicule suiveur perçoit son véhicule de référence et "décide" de son comportement en fonction des résultats de cette perception. Le lien virtuel est donc, dans ce cas, uniquement un lien unidirectionnel.

Le modèle à ressort simple

Ce modèle est composé d'un ressort de raideur k , de longueur au repos l_v et d'un amortisseur de coefficient h . La figure 3.4 montre 3 véhicules en convoi. Chaque véhicule n est représenté par sa position X_n . La masse des véhicules est notée m et la longueur du ressort est donnée par $P_{n,n-1} = \|\vec{X}_{n-1} - \vec{X}_n\| - l_v$ avec l_v la longueur à vide du ressort.

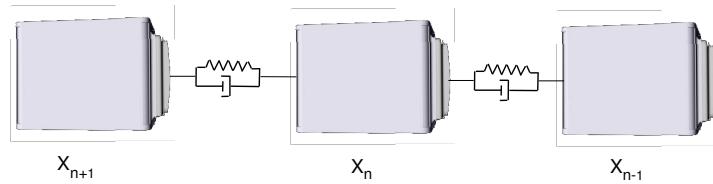


FIGURE 3.4 – Représentation d'un train de véhicules dans le cas du modèle à simple ressort

Chaque agent véhicule n est soumis aux forces suivantes :

- Force du ressort \vec{F}_r^n :

$$\vec{F}_r^n = -k P_{n,n-1} \vec{u}_{n,n-1} \quad (3.1)$$

avec $\vec{u}_{n,n-1}$ le vecteur unitaire engendrant l'axe entre le véhicule n et le véhicule $n - 1$ et k la raideur du ressort.

- Force de l'amortisseur \vec{F}_a^n :

$$\vec{F}_a^n = -h \left(\frac{d\vec{X}_{n-1}}{dt} - \frac{d\vec{X}_n}{dt} \right) \quad (3.2)$$

avec h le coefficient d'amortissement.

A partir des forces modélisant l'accroche immatérielle, nous pouvons déduire du principe fondamental de la dynamique¹, une équation différentielle du second ordre :

$$m \ddot{\vec{X}}_n = -k(\|\vec{X}_{n-1} - \vec{X}_n\| - l_v) \vec{u}_{n,n-1} - h \left(\frac{d\vec{X}_{n-1}}{dt} - \frac{d\vec{X}_n}{dt} \right) \quad (3.3)$$

La résolution de cette équation permet de déterminer les consignes à appliquer au véhicule. Cette équation différentielle est également utilisée pour effectuer le réglage des paramètres du modèle. En effet, nous avons choisi de nous placer dans le cas d'un régime critique de façon à obtenir une convergence rapide du modèle et à éviter les oscillations. Nous avons ensuite étudié la stabilité de cette structure en utilisant la "string stability" et le théorème de Lyapunov (LYAPUNOV 1992). Les résultats obtenus ont montré une bonne stabilité du train et un respect de l'écart longitudinal entre les véhicules analogue à la consigne. Cependant, le respect de l'écart longitudinal n'est pas toujours effectif, en particulier sur des trajectoires présentant des rayons

1. Soit un corps de masse m constante, l'accélération subie par un corps dans un référentiel galiléen est proportionnelle à la résultante des forces qu'il subit, et inversement proportionnelle à sa masse m .

de courbure faibles. Pour cela, le modèle a été amélioré en introduisant un mécanisme de torsion au système masse/ressort (cf. figure 3.5).

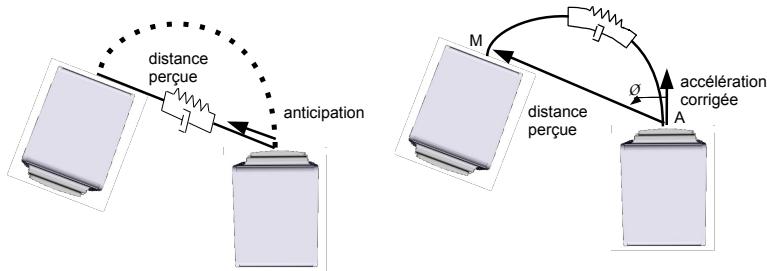


FIGURE 3.5 – Comportement du modèle ressort sans (à gauche) et avec (à droite) le mécanisme de torsion

D'où, l'introduction d'une nouvelle force résultante d'un moment de torsion \vec{M}_A correspondant à un système "masse-ressort" composé d'un ressort de raideur de torsion k_t et d'un amortisseur de torsion de coefficient h_t . Le moment est appliqué en sur le point central de la face avant du véhicule suiveur et dépend de l'angle de torsion θ entre les deux axes longitudinaux des véhicules :

$$\vec{M}_A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_t\theta - h_t \frac{d\theta}{dt} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

La force ajoutée au système possède donc la forme suivante :

$$\vec{F}_t^n = \vec{BA} \wedge \vec{M}_A \quad (3.5)$$

Il s'agit ensuite de résoudre le système d'équations différentielles pour calculer les consignes à appliquer au véhicule réel. Une étude de stabilité de ce modèle a été réalisée dans (CONTET et al. 2011a). Les résultats obtenus montrent un meilleur suivi en courbe que pour le modèle initial. En particulier, l'écart latéral en courbe reste très contenu (en général inférieur à la largeur d'un pneu).

Modèle à double ressorts

L'idée du modèle à double ressorts est également issue de nos réflexions menées pour améliorer l'approche locale de conduite en convoi en particulier lors de trajectoires à faible rayon de courbure. De la même façon que dans le modèle précédent, nous supposons que la perception est capable de fournir les informations suffisantes quant à la configuration spatiale entre le véhicule suiveur et son véhicule de référence local.

Le modèle proposé est constitué de deux ressorts reliant les extrémités de l'essieu avant du véhicule suiveur avec les extrémités de l'essieu arrière du véhicule de référence local (cf. figure 3.6). De plus, comme dans le modèle précédent, un amortisseur a été ajouté de façon à limiter les oscillations de l'écart longitudinal entre les véhicules.

Dans ce modèle, l'erreur sur l'écart latéral en courbe est corrigée en ajustant les valeurs des raideurs des ressorts. Ainsi, en augmentant la raideur du ressort situé à l'extérieur du virage et en diminuant la raideur du ressort placé à l'intérieur, il est possible de limiter le phénomène d'anticipation et donc d'améliorer de façon significative la précision latérale de l'algorithme de

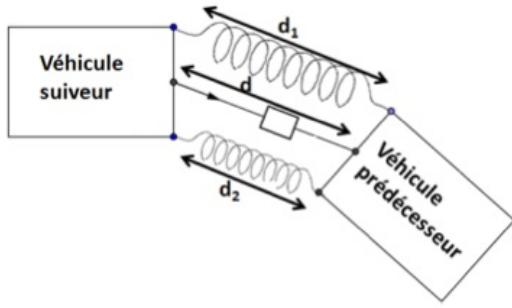


FIGURE 3.6 – Modèle à double ressort

conduite en convoi.

Le calcul des différents paramètres se fait de la façon suivante :

- Les coefficients de raideur global (i.e. la somme des deux raideurs de chacun des ressorts) et d'amortissement sont calculés en considérant le convoi en ligne droite. La détermination se fait alors de manière analogue au modèle précédent en cherchant les solutions de l'équation différentielle caractéristique du système correspondant au cas critique.
- On considère ensuite que la raideur globale est un invariant du système. Ainsi, déterminer les variations nécessaires sur l'un des ressorts permet de déduire facilement les variations à appliquer sur le second.
- Le théorème du moment cinétique nous fournit une seconde équation liant les deux raideurs. Il s'agit alors de résoudre ce système d'équations pour obtenir l'expression de chacun des paramètres du modèle en fonction des consignes d'écart longitudinal et de l'angle entre les deux axes longitudinaux des véhicules.

De la même façon que pour le modèle précédent, une étude de stabilité par le théorème de Lyapunov et une étude de "String stability" ont été réalisées dans (EL ZAHER et al. 2012e). Les résultats obtenus tant en simulation qu'en expérimentation sont assez similaires à ceux obtenus avec le modèle précédent. Cependant, la mise en œuvre pratique est plus aisée avec ce modèle.

3.2.6 Passage de la configuration colonne à d'autres types de configuration : une altération de la perception

Pour aborder les configurations autres que colonne, nous avons également développé une méthode s'appuyant sur une modification de la perception du véhicule suiveur de façon à transformer n'importe quelle configuration géométrique de train en une configuration de type colonne. Le principal intérêt de cette méthode est de pouvoir bénéficier des propriétés et des études de stabilité réalisées pour la configuration colonne. De plus, cette méthode permet de faciliter la continuité du passage dynamique d'une configuration géométrique à une autre en modifiant uniquement les données fournies au véhicule par la perception. Cette méthode se traduit par la mise en place d'un filtre de perception qui décale virtuellement la position du véhicule de référence local en fonction des paramètres de la configuration désirée. Ainsi, le véhicule ne suit plus directement son véhicule de référence local mais un avatar de celui-ci, appelé leader virtuel (cf. figure 3.7).

Cette transformation peut être considérée comme une projection des informations perceptives

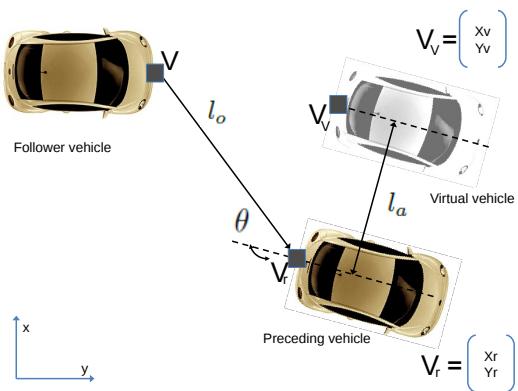


FIGURE 3.7 – Exemple de détermination de la position de leader virtuel dans le cadre d'une configuration échelon.

réelles dans l'espace de perception du véhicule. En plus des paramètres liés à la configuration spatiale désirée, nous avons ajouté des paramètres de correction destinés à diminuer le phénomène d'anticipation en virage. Les paramètres de cette projection sont déterminés en utilisant l'étude théorique présentée dans (PETROV 2008). Cette correction revient à déplacer le leader virtuel de façon à introduire un point de pivot analogue à celui utilisé dans le monde ferroviaire et placé à égale distance entre le véhicule de référence et le véhicule suiveur. La figure 3.8 montre le positionnement de ce point de pivot dans le cadre d'une configuration colonne.

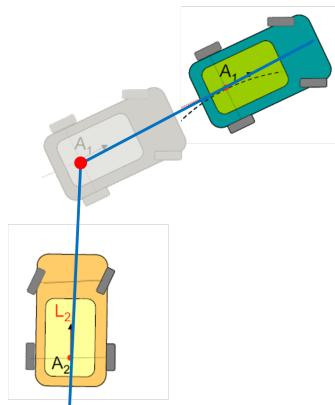


FIGURE 3.8 – Placement du point de pivot dans le cadre d'une configuration colonne

Cette modification de la perception peut être mise en parallèle avec la notion de structure virtuelle utilisée en robotique mobile (TAN 1997). Dans le cadre de la conduite en convoi, la transformation de la perception revient à construire un véhicule de référence virtuel local sur lequel est appliqué le modèle d'interaction défini pour la configuration colonne. La figure 3.9 montre comment ce principe peut être appliquée pour les configurations spatiales usuelles.

Dans le cadre de configurations quelconques, il est également possible d'utiliser ce principe de transformation de la perception. En effet, il s'agit alors d'analyser la configuration désirée et de la transformer en tant que composition de configurations usuelles. La figure 3.10 montre

	Leader Perception	Virtual leader definition	Installation of control model	Lateral translation (T_x)	Longitudinal translation (T_y)
Echelon				Lateral distance	0
Line				Lateral distance	Longitudinal distance
Column				0	0

FIGURE 3.9 – Modèles de transformation de la perception pour les configurations spatiales usuelles

comment cette décomposition peut être réalisée sur un exemple.

Le principal inconvénient de cette approche est lié aux aspects temporels de la boucle perception-décision-action. En effet, le temps de traitement de l'information perceptive et de détermination du comportement du véhicule réel induit un décalage temporel entre la consigne appliquée et la configuration perceptive réelle. Si ceci n'est pas critique pour les configurations colonne et échelon pour lesquels une augmentation légère de l'erreur longitudinale est observée, le décalage temporel est particulièrement gênant dans le cadre de la configuration ligne (EL ZAHER et al. 2012e), (EL ZAHER et al. 2012c).

3.2.7 Simulations et expérimentations

Certaines propriétés des approches proposées dans ce cadre ont été tout d'abord vérifiées en utilisant le modèle checker SAL. En particulier, les travaux de vérification se sont concentrés sur la propriété de sûreté correspondant à la non-collision entre les véhicules. Le chapitre 5 traite de ces aspects de façon détaillée.

D'autre part, pour valider les modèles développés dans le cadre de la navigation multi-véhicules, nous avons développé des outils de simulation de véhicules intelligents dans des milieux urbains. Pour cela, le simulateur VIVUS a été créé. La première version de ce simulateur a été réalisée dans le cadre du projet CRISTAL (<http://projet-cristal.net>). Il s'appuie sur les moteurs PhysX et Java3D (GECHTER et al. 2012), (LAMOTTE et al. 2010a). La seconde version, basée sur les moteurs Unity et PhysX, permet de s'affranchir d'une partie des limitations de la première version. Un soin particulier a été apporté à la communication entre l'intelligence de contrôle

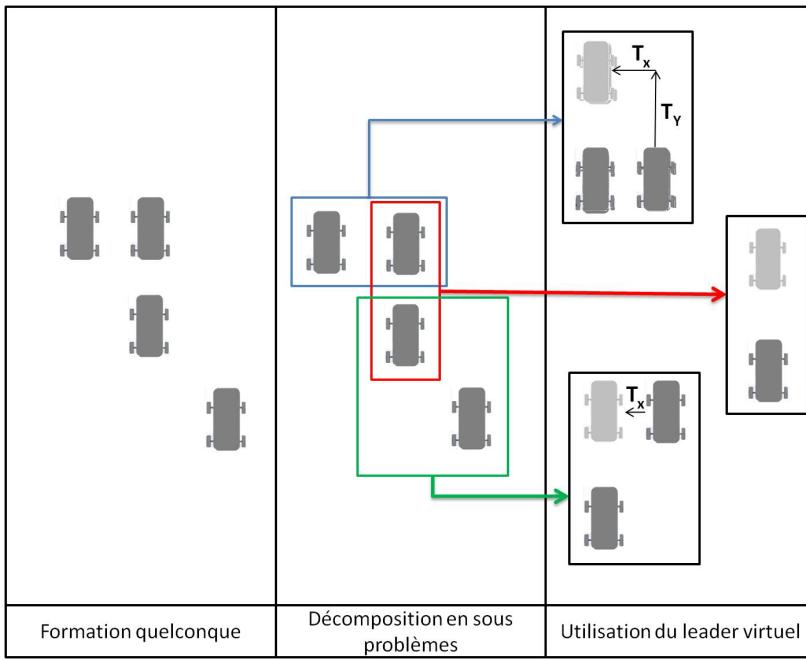


FIGURE 3.10 – Exemples de décomposition d'une configuration spatiale en un ensemble de configurations usuelles

des véhicules et les différents capteurs et actionneurs simulés. Ces derniers utilisent exactement le même protocole et les mêmes trames que les capteurs et les actionneurs réels (BASIC et al. 2012a), (NIETO et al. 2012a). Ces simulateurs ont été utilisés pour tester les algorithmes proposés dans le cadre du projet ANR Safeplatoon. Ils sont particulièrement utiles pour tester le comportement des convois de véhicules dans le cas de scénarii critiques (conditions d'adhérence précaires, faible inter-distance entre véhicule,...) ou interdits (collisions, présence d'obstacles entre les véhicules,...). La figure 3.11 montre l'architecture de la seconde version du simulateur VIVUS.

De même, nous avons mis en place des plateformes expérimentales s'appuyant sur des véhicules électriques commerciaux, modifiés au sein du laboratoire IRTES-SeT. Ces véhicules sont de deux types : GEM Car et Little car. Ils sont tous équipés d'actionneurs permettant un contrôle de la direction et de la vitesse et de capteurs permettant de percevoir l'environnement tels que caméras, télémètres, LIDAR,... Le principal capteur utilisé dans le cadre des approches de conduite en convoi présentées précédemment est le télémètre. Même si les capacités perceptives de celui-ci peuvent paraître limitées, elles sont suffisantes pour le prototypage des approches. Néanmoins, il sera nécessaire, pour les fiabiliser davantage, d'utiliser des capteurs additionnels permettant une redondance des informations.

3.3 Interactions entre l'Art et la Technologie

3.3.1 Vers des agents pilotés par la musique, les gestes et la voix

L'objectif de ce travail, réalisé en collaboration avec l'espace Gantner du Territoire de Belfort, est de pouvoir construire des peintures numériques pilotées par la musique, la voix et les gestes. Le travail proposé se place dans les thématiques du "Cyberart" (TELES et al. 2009), (MURA

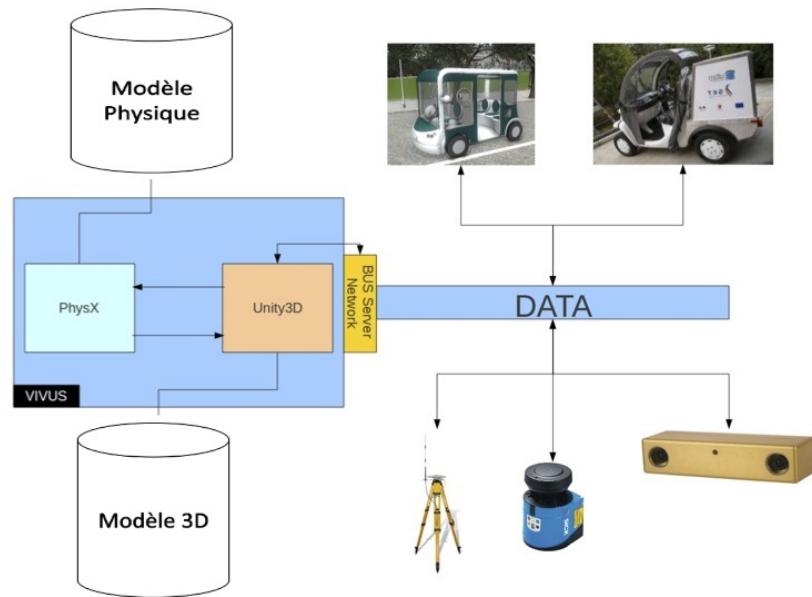


FIGURE 3.11 – Architecture globale du simulateur VIVUS



FIGURE 3.12 – Exemple d'affichage du simulateur VIVUS (Projets CATS : Modèle 3D réalisé par Tecnomade, Modèles de comportement de piétons réalisés par Voxelia)

2011). Le Cyberart est un mouvement artistique dont le but est de produire des œuvres en utilisant l'intervention des machines et en particulier d'ordinateurs.

Dans ce contexte, nous avons conçu un système multi-agent réactif d'inspiration physique mettant en œuvre les rôles décrits dans la figure 3.13.

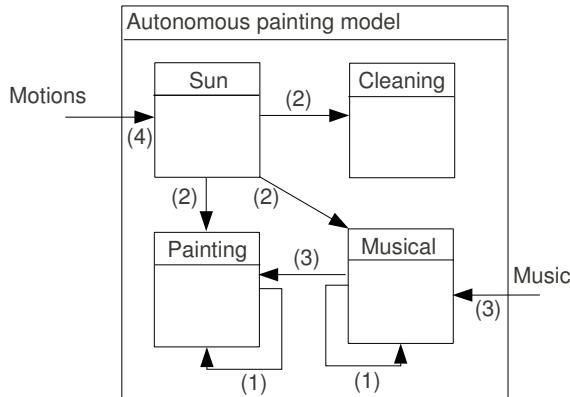


FIGURE 3.13 – Modèle RIO de l'architecture proposés pour les agents peintres CONTEL et al. 2013a

Les différents rôles utilisés peuvent être décrits de la façon suivante :

- **Musical role** : ce rôle consiste en un déplacement aléatoire sous l'influence des interactions définies dans le système et en une diffusion de signaux audio au sein du système permettant un déclenchement de l'action de peindre chez les agents endossant le rôle "Painting".
- **Painting role** : à l'instar du rôle précédent, le "Painting role" implique un déplacement aléatoire en fonction des interactions présentes dans le système. Lorsqu'un agent endossant ce rôle se trouve à proximité d'une source musicale correspondant à sa sensibilité en terme de fréquence et d'amplitude, il y a génération d'une action de dessin dans l'environnement. Cette action possède une paramétrisation en terme de couleur, de forme et de taille qui dépend des caractéristiques dynamiques de l'agent concerné.
- **Cleaning role** : ce rôle est assez semblable au rôle lié à l'action de dessin. La principale différence est que l'action engendrée correspond à un effacement des dessins placés dans le voisinage de l'agent endossant ce rôle.
- **Sun role** : un agent endossant ce rôle a la particularité de posséder une masse très importante induisant une forte attraction envers les autres agents. Ce rôle est mis en relation directe avec les dispositifs permettant la capture des mouvements des acteurs.

Les interactions notées (1) dans le schéma de la figure 3.13 correspondent à des interactions de type répulsion. Les interactions notées (2) correspondent à une attraction entre agents. Les interactions (3) et (4) correspondent aux échanges du système avec l'extérieur par l'intermédiaire de diffusion de musique (interactions (3)) ou de capture de mouvement (interactions (4)).

Le travail réalisé a donné lieu à plusieurs manifestations avec des enfants interagissant avec le système à travers la voix et un dispositif équipé de capteurs de mouvements (CONTEL et al. 2013a). La figure 3.14 montre le dispositif utilisé ainsi qu'un résultat obtenu en utilisant à la fois de la diffusion musicale, de la capture de sons via un microphone et de la capture de mouvement.

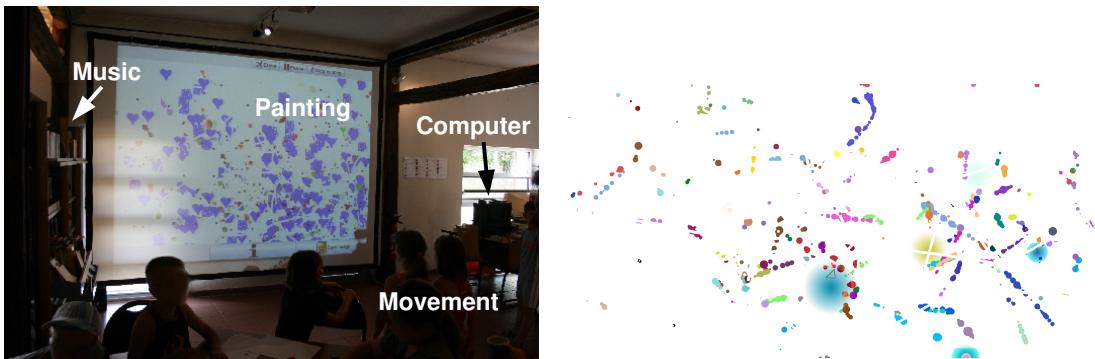


FIGURE 3.14 – Le dispositif expérimental (gauche) et un exemple de résultat obtenu (droite)

3.3.2 Sphericall : une expérience interactive couplant deux systèmes multi-agents

Ce travail, réalisé en collaboration avec Tharsis Software, a pour objectif de construire un dispositif tactile interactif permettant à la fois de contrôler des pistes sonores, sous la forme d'une table de mixage tactile et de visualiser l'impact de ce contrôle sur un écosystème synthétique composé d'agents particulaires interagissant les uns avec les autres. Ce projet peut être perçu comme un approfondissement du travail précédent. En effet, il s'agit, cette fois-ci, de coupler deux systèmes multi-agents dont l'un d'entre eux est également en interaction avec un opérateur humain.

Le dispositif est composé de deux éléments :

- Un écran tactile qui est utilisé comme une interface de type table de mixage dont les composants logiciels sont des agents interagissant avec l'opérateur et entre eux sous la forme de collision de type choc élastique. (cf. figure 3.15)
- Un écosystème synthétique représenté sous la forme d'une sphère et affiché à l'aide d'un vidéo projecteur.

L'écosystème développé dans le monde sphérique est assez similaire à celui développé dans le cadre des agents peintres. Les rôles *musicien* et *destructeur* sont proches des rôles *musical* et *cleaner* définis précédemment. La principale différence dans le rôle musicien est l'ajout d'une interaction de type attraction entre musiciens liée aux groupements d'agents réalisés au niveau de la partie table de mixage. Les rôles *organic builder* et *city builder* sont proches du rôle *painting* du modèle précédent. Les résultats de ces rôles ne sont plus des dessins mais une construction en 3D de structures organiques pour le rôle *organic builder* et de structure de type *building* pour le rôle *city builder*. Le diagramme 3.16 montre les différents rôles interagissant dans le monde sphérique.

Ce travail a été présenté publiquement lors du festival OFFF qui a eu lieu à Paris en 2010. Dédié à la création digitale et numérique, le festival OFFF propose des conférences, performances, projections, workshops et concerts durant 3 jours. Après Lisbonne et Oeiras, OFFF 2010 s'est installé à Paris en Juin 2010 à la Grande Halle de la Villette. La figure 3.17 montre le dispositif expérimental mis en place dans le cadre du festival ainsi qu'un exemple de résultat obtenu.

Une démonstration de ce travail peut être visualisée à l'adresse suivante :
<http://www.youtube.com/watch?v=iDEkBE6Cbz8>

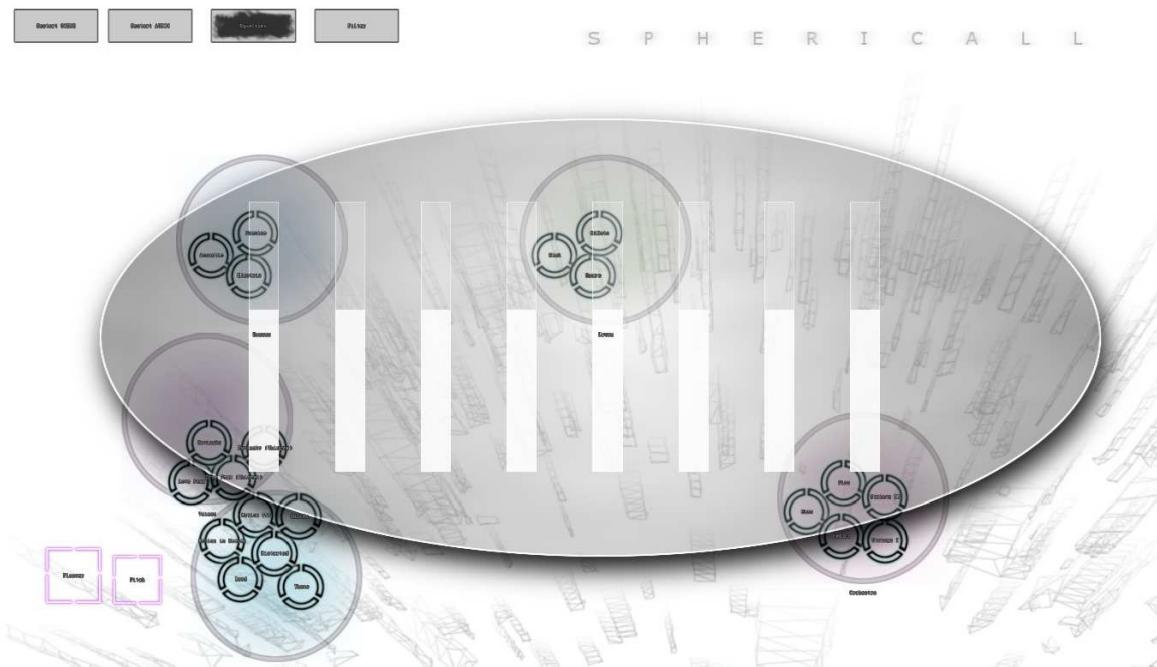


FIGURE 3.15 – L’interface tactile du dispositif Sphericall. Les barres blanches verticales correspondent aux fader de la table de mixage. Les grands cercles gris foncé correspondent aux groupes d’instruments et les petits cercles correspondent chacun à un instrument de la piste son.

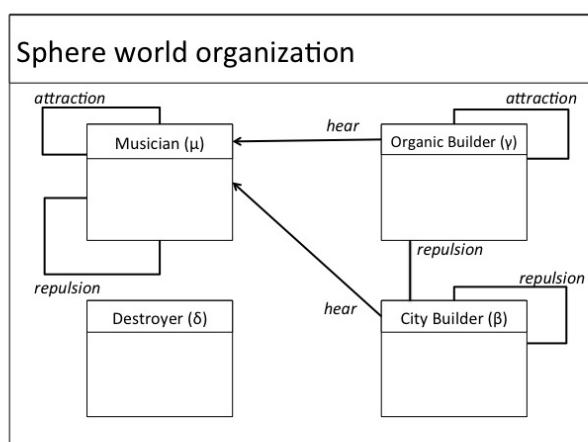


FIGURE 3.16 – Modèle RIO du monde sphérique de Sphericall



FIGURE 3.17 – Le dispositif utilisé pour la démonstration du festival OFFF (gauche) et un exemple de résultat obtenu pour le monde sphérique (droite)

3.4 Modèle d’interaction pour la gestion de carrefours

3.4.1 Contexte

De nos jours, les environnements urbains souffrent de la congestion de trafic liée à l'utilisation massive de véhicules personnels au détriment des transports publics. Cette congestion implique un certain nombre d'effets néfastes tels qu'une émission de gaz et de particules, une nuisance sonore importante et une augmentation des temps de trajets pour les véhicules individuels et pour les modes de transports collectifs n'utilisant pas de sites protégés. Pour limiter ces effets indésirables, des politiques locales, visant à encourager l'utilisation de modes de transport public, ont été mises en place. Cependant, celles-ci ne permettent pas forcément d'obtenir des résultats immédiats quant à l'amélioration des conditions de trafic. Un autre levier possible est l'amélioration des stratégies utilisées pour synchroniser les feux aux intersections. Les stratégies classiques ne prennent pas en compte le nombre de véhicules entrant et les variations de ce nombre dans le temps (MILLER 1963). Les stratégies adoptées reposent généralement sur des temps fixes de passage au vert (MA et al. 2007). Des problèmes similaires se posent également au niveau d'intersections comportant des stops. De plus, il faut de plus en plus intégrer à ces stratégies la présence de mode de transport prioritaire tel que les tramways.

Une façon de traiter ce problème réside dans l'utilisation de stratégies s'appuyant sur l'analyse du trafic en utilisant une méthode de véhicule-intervalle (PAPAGEORGIOU et al. 2003) ou des méthodes mettant en œuvre des moyens de communications entre les véhicules ou entre les véhicules et le carrefour. Cependant, l'utilisation de communication soulève des problèmes technologiques liés à la fiabilité des protocoles mis en place (problème de temps de réponse, perte de messages, réception de trames erronées,...).

Dans ce cadre, nous avons proposé une approche permettant le croisement de convois de véhicules de type colonne dans un carrefour qui a pour but à la fois d'optimiser les flux et de rendre possible l'échange de véhicules d'un convoi à un autre. Ce modèle s'appuie sur l'analyse, par le carrefour, des convois de véhicules entrant et la destination de chacun d'entre eux. Dans cette approche chaque file de véhicule est considérée comme un convoi "virtuel" qui doit traverser le carrefour le plus rapidement possible.

3.4.2 Comportement des Véhicules

Lors du passage dans le carrefour, les véhicules deviennent autonomes et utilisent un algorithme de suivi de trajectoire s'inspirant des algorithmes de conduite en convoi précédemment exposés. Leur comportement peut être décomposé en trois phases :

1. **Comportement d'entrée dans le carrefour** : les véhicules arrivent sur le carrefour sous la forme d'un convoi de type colonne. Chacun utilise un algorithme analogue à celui présenté précédemment excepté pour le leader qui est piloté par un être humain ou qui utilise un algorithme de suivi de trajectoire autonome. A l'arrivée dans la zone de perception du carrefour, chaque véhicule bascule en mode automatique. Dans ce mode, chaque véhicule est capable de suivre une trajectoire prédéfinie en fonction de sa destination.
2. **Comportement à l'intérieur du carrefour** : chaque véhicule doit suivre une trajectoire prédéfinie en fonction de sa destination. Le déclenchement de ce suivi se fait lorsque le carrefour envoie une autorisation au véhicule. Tant que l'autorisation n'est pas activée, le véhicule attend au niveau de l'entrée du carrefour.
3. **Comportement de sortie du carrefour** : après le passage dans le carrefour, le véhicule repasse du mode automatique au mode conduite en convoi.

3.4.3 Comportement des feux du carrefour

La description du comportement des véhicules a permis de mettre l'accent sur le point essentiel de la méthode proposée à savoir la stratégie de déclenchement des autorisations de passage générées par le carrefour. Dans cette approche, chaque feu, considéré comme un agent, est capable de percevoir le nombre de véhicules arrivant sur l'intersection et la direction désirée de ceux-ci (observation des clignotants). De plus, le carrefour perçoit l'état (libre ou occupé) des voies de sortie du carrefour. A partir de cette perception, les feux d'un même carrefour se synchronisent de façon à optimiser la vitesse de dégagement. Ainsi, le comportement du carrefour est basé sur une analyse des flux entrant. Chacun de ces flux est caractérisé par une signature déterminée en fonction de la direction désirée par chacun des véhicules. Cette signature est calculée en utilisant la table illustrée figure 3.18.

R	L	F	X
Le véhicule tourne à droite	Le véhicule tourne à gauche	Le véhicule va tout droit	Il n'y a pas de véhicule sur la ligne

FIGURE 3.18 – Table de correspondance permettant de construire la signature d'un feu en fonction du flux de véhicules entrant.

Les différents feux du carrefour se partagent alors leurs signatures. En fonction, de cette composition de signatures, chaque feu est alors capable de décider d'autoriser le passage des véhicules en utilisant la table de correspondance définie par la figure 3.19.

3.4.4 Résultats et apports

Nous avons comparé, en simulation, les résultats obtenus par cette approche relativement à deux algorithmes courants : la gestion de carrefour par feux tricolores classiques, la gestion donnant priorité au premier entrant dans le carrefour. Ces comparaisons ont été faites en utilisant différentes configurations de trains de même taille ou de taille différente (cf. figure 3.20).

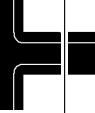
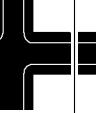
Rank	4	3	3	2	2	2
Coding	R R R R	R R R X	R F X R	R R X X	R X R X	F X F X
Example						
Rank	2	2	2	1	1	1
Coding	F X R X	F X X R	R L X X	R X X X	F X X X	L X X X
Example						

FIGURE 3.19 – Table de correspondance permettant la prise de décision de chacun des feux

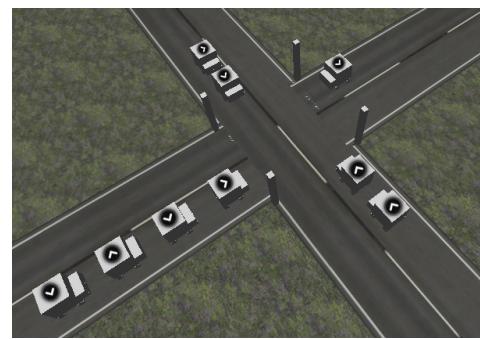


FIGURE 3.20 – Exemple de configuration de test.

Les résultats obtenus montrent un gain dans le temps de libération du carrefour compris de l'ordre de 40% par rapport à un fonctionnement de feux tricolores classiques et un gain entre 10% et 25% par rapport à un système dans lequel le premier arrivé est prioritaire. Les améliorations sont d'autant plus importantes que le nombre de véhicules initial dans les trains est grand. De même, le gain du point de vue du temps d'attente moyen est de l'ordre de 45% par rapport aux feux tricolores et de l'ordre de 25% par rapport au système à priorité au premier entrant.

3.5 Modèle d'interaction pour la coopération entre Tableaux Blanc Interactifs

3.5.1 Contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Tableau Blanc Interactif (TBI) financé par le biais du Bonus Qualité Enseignement de l'UTBM. Outre la réalisation d'une application de type TBI pouvant fonctionner sur de multiples plateformes (cf. figure 3.21), ce travail s'est également intéressé aux problématiques liées à la communication entre TBI de façon à envisager une utilisation collective distante. Chaque tableau blanc interactif doit pouvoir être autonome, mais doit également être en mesure de se connecter à un ou plusieurs autres tableaux pour travailler de manière collaborative. Il n'est donc pas question de considérer qu'un tableau « source » sert de serveur et que tous ceux qui veulent participer à la collaboration se connectent sur ce serveur. Il faut que tout tableau blanc interactif soit capable de se connecter à n'importe quel tableau de ce groupe, et puisse entrer presque instantanément dans ce groupe en tant qu'acteur, ou spectateur.

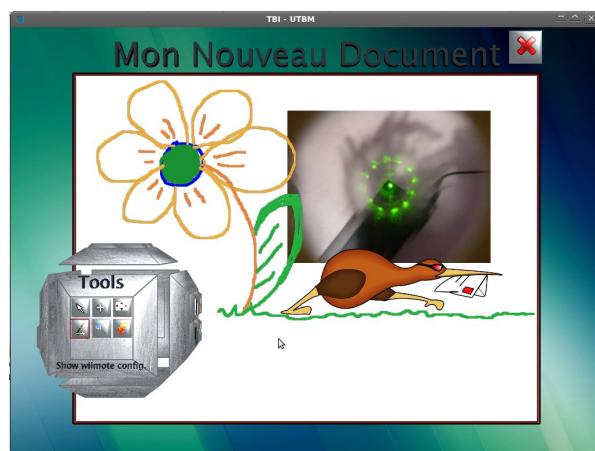


FIGURE 3.21 – Interface du logiciel de tableau blanc interactif

En se plaçant dans le cadre d'un enseignement classique, il est naturel de considérer qu'une machine, présente sur le réseau, joue le rôle de l'enseignant. Les clients connectés à ce serveur jouent alors le rôle des étudiants. Même si cette architecture permet de bénéficier des avantages des technologies de l'information en terme de flexibilité et de modularité, elle n'est pas suffisante dans ce cadre. D'autres approches utilisent quant à elles la structure collaborative classique dite du tableau noir (XENOS et al. 2004), (KOMIS et al. 2002), (HOPPE et al. 1999)

3.5.2 Principe

Le mécanisme d’interaction mis en place considère chaque TBI comme un agent (GECHTER et al. 2011b). Cet agent est capable, via des communications, de transmettre ses modifications à ses voisins et de récupérer et d’appliquer les modifications transmises par ceux-ci. Ainsi, le système peut être décrit de la façon suivante :

- Un tableau blanc se connecte à un autre dont il connaît l’adresse IP. Une fois ceci fait, il reçoit un certain nombre d’informations, dont le document mis en couche de fond, et toutes les nouvelles modifications à partir de sa connexion.
- En parallèle, le système de chaque tableau blanc va rechercher ses voisins les plus proches, comme étant ceux qui lui répondent le plus vite. Pour ce faire, il va régulièrement demander à tous ses voisins de lui fournir la liste de leurs voisins, et tester leur temps de réponse.
- Le système ne va garder que les voisins les plus efficaces, afin que la propagation des événements soit la plus rapide possible.

Ce principe de fonctionnement a été rendu possible en identifiant chaque action possible sur le TBI comme étant un événement. La transmission entre plusieurs TBI se résume à un déclenchement d’événements distants très peu coûteux en ressources hormis pour l’insertion d’images pour lesquelles un fichier est envoyé sur le réseau.

Ce logiciel de TBI a été testé sur plusieurs plateformes. Les tests effectués sont concluants et permettent une utilisation collaborative simultanée entre plusieurs machines disposant du logiciel. Actuellement, des versions Android et iOS sont en cours de développement.

3.6 Conclusion

Nos travaux ont permis de montrer l’intérêt de l’utilisation des SMA réactifs d’inspiration physique dans le cadre de la résolution de problèmes concrets réels. En effet, le choix de modèles d’interaction en adéquation avec les phénomènes régissant le problème réel permet d’obtenir de bons résultats.

La principale difficulté réside dans le réglage du modèle d’interaction, celui-ci étant composé généralement d’un nombre important de paramètres. Si, dans certains cas, il est possible de trouver des relations liant les paramètres entre eux pour faciliter ces réglages, cette tâche reste généralement délicate. Nous envisageons maintenant de nous focaliser sur ce point critique en utilisant, par exemple, des techniques d’apprentissage.

Nos travaux se sont essentiellement focalisés sur une métaphore corpusculaire des agents, ces derniers étant considérés comme des particules massiques soumises à des forces. Nous envisageons également d’explorer d’autres mécanismes physiques tels que ceux liés aux interactions/interférences entre des ondes. Bien que nécessitant encore une compréhension plus poussée des phénomènes observés, les premiers résultats que nous avons obtenus dans le cadre de l’asservissement longitudinal pour la conduite en convoi sont prometteurs.

Certains travaux exposés dans ce chapitre sont détaillés dans les publications suivantes : (CONTET et al. 2011a) et (DAFFLON et al. 2011a) présentées dans le document annexe.

Chapitre 4

Évaluation et mesure des phénomènes émergents

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes concentrés sur deux des composants essentiels des systèmes multi-agents que sont l'environnement d'une part et les interactions d'autre part. Dans certaines applications, abordées dans ces chapitres, la détermination de la pertinence du résultat obtenu passe par l'observation du comportement global du système relativement à un cadre applicatif concret. Cependant, dans certains cas, cette observation n'est pas suffisante. C'est particulièrement vrai lorsqu'il est nécessaire d'interpréter le résultat en tant que solution à un problème ou en tant que source d'informations permettant de prendre une décision.

Ce problème d'évaluation ou de mesure des résultats ou des propriétés globales d'un système est un sujet particulièrement sensible dans le cadre des systèmes multi-agents et plus généralement dans le cadre des systèmes complexes. Ce problème est à mettre en relation avec les notions d'émergence, d'auto-organisation qui sont les sources de nombreux travaux tant du point de vue pratique que du point de vue théorique.

4.2 Systèmes complexes, émergence et évaluation des propriétés d'un système

4.2.1 Systèmes complexes et systèmes multi-agents

Un système complexe est généralement considéré comme un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction et dont le comportement global et son évolution ne peuvent pas être prévus par le calcul ou par un observateur extérieur. Ainsi, un système est dit complexe si le résultat final n'est pas prédictible autrement que par l'expérience ou la simulation, même en connaissant parfaitement l'ensemble de ses constituants et toutes les règles qui les lient. Ainsi, l'existence de tels systèmes remet en cause l'approche réductionniste (NAGEL 1961) qui considère que la nature complexe des choses peut être réduite à une somme de principes fondamentaux. L'étude des systèmes complexes est une activité que l'on retrouve dans de nombreuses disciplines scientifiques.

Il existe parfois une confusion entre la notion de système compliqué et la notion de système complexe. Si l'on se réfère à l'origine étymologique de ces termes, compliqué signifie qu'il faut du temps et du talent pour le comprendre. La complexité signifie que le système comporte beaucoup d'intrications et que l'on ne peut pas en étudier une partie de façon isolée sans prendre en compte l'ensemble du système. Dans (MONCION et al. 2010), une différentiation est faite entre les deux notions en s'appuyant sur la nature dynamique des relations entre les constituants du système. Ainsi, si les deux types de systèmes peuvent être définis comme étant composés d'un grand nombre d'éléments en interaction, ceux-ci sont considérés comme fixes et figées dans un système compliqué alors qu'ils peuvent varier dynamiquement dans un système complexe. Par exemple, un mécanisme d'horlogerie peut être considéré comme un système compliqué mais certainement pas comme un système complexe.

Dans ce contexte, certains systèmes multi-agents peuvent être considérés comme des systèmes complexes. En effet, même si les mécanismes d'interaction sont définis de façon fixe lors de la conception du système, l'application de ceux-ci dépend de la perception de chacun des agents et de leurs mécanismes décisionnels propres. Ainsi, nous pouvons considérer que les interactions entre les différents constituants du système varient dynamiquement. Ces différentes définitions permettent alors de faire la distinction entre un système de particules classiques et un système

d'agents particulaires (i.e un système dans lequel les agents se comportent comme des particules mais dont les interactions changent en fonction de la perception de chacun d'entre eux).

4.2.2 Émergence et auto-organisation

Les notions d'émergence et d'auto-organisation sont deux notions liées et complémentaires. La notion d'auto-organisation est souvent liée à un accroissement de l'ordre ou à une diminution de l'entropie du système, sans que le processus menant à ce résultat ne soit guidé ou contrôlé par une entité extérieure au système. Dans (DE WOLF et al. 2005), l'auto-organisation est définie comme *un processus dynamique et adaptatif permettant au système d'acquérir ou de maintenir une structure sans contrôle externe.*

Si la notion d'auto-organisation est assez claire et définie par un certain consensus dans la communauté scientifique, ce n'est pas le cas pour la notion d'émergence pour laquelle, il est possible de trouver un grand nombre de définitions. Le sens commun de l'émergence est lié à la présence d'un observateur capable de détecter et d'analyser les phénomènes produits par un processus. Au cours du XIX^e siècle, le terme émergent a été introduit en biologie et en philosophie par opposition au courant réductionniste, puis, plus récemment, il a fait l'objet de nombreux travaux liés aux sciences de l'information (MRJEAN 1997), (DESSALLES et al. 2008), (BONABEAU et al. 1995a), (BONABEAU et al. 1995b), (YAMINS 2005a), (YAMINS 2005a) aux systèmes complexes (MONCION et al. 2010), à la sociologie,...

De même que l'étude des systèmes complexes ne peut pas être envisagée dans un cadre réductionniste, la notion d'émergence pose le même type de problème. Dans (MEMMI 1996), par exemple, la notion d'émergence est réduite à un problème de description et d'explication. De ce point de vue, l'émergence n'est pas une propriété du système mais une propriété du point de vue que l'on porte sur lui.

Dans (DE WOLF et al. 2005), un système est défini comme ayant des propriétés émergentes lorsque des phénomènes apparaissent dynamiquement au niveau macroscopique sous l'action des interactions qui lient les constituants du système au niveau microscopique. Dans (BEDAU 1997) et (BEDAU 2002), l'émergence est classée selon plusieurs types :

- L'*émergence nominale* : elle concerne la présence de propriétés macroscopiques qui ne peuvent pas être considérées comme pouvant être des propriétés microscopiques.
- L'*émergence faible* : elle est une sous partie de l'émergence nominale pour laquelle l'apparition des phénomènes émergents ne peut pas être expliquée de façon triviale. Selon BEDAU 1997, c'est ce type d'émergence qui nécessite le recours à des simulations et des expérimentations.
- L'*émergence forte* : par opposition à l'émergence nominale, elle considère que les phénomènes observés au niveau macroscopique ont des effets à la fois au niveau microscopique et au niveau macroscopique.

Dans nos travaux, nous avons considéré l'émergence comme un processus aboutissant à l'apparition de phénomènes macroscopiques ne pouvant être prédits par la connaissance des constituants du système et de leur interaction. En ce sens, nous nous rapprochons des notions d'émergences nominale et faible définies précédemment.

4.2.3 Évaluation des propriétés émergentes d'un système

L'évaluation et la mesure des propriétés émergentes d'un système multi-agent sont des tâches délicates mais nécessaires dès lors que l'on désire analyser la solution fournie par le système dans le cadre de la résolution de problèmes ou de la prise de décision. Ainsi, dans certains cas

complexes, il est nécessaire d'avoir recours à des indicateurs ou des mesures permettant une meilleure analyse du système qu'une simple observation.

L'évaluation des propriétés émergentes revient, dans certain cas, à mesurer une distance par rapport à un objectif à atteindre. Pour cela, il est nécessaire de construire des indicateurs permettant de mesurer des propriétés du système. Les mesures doivent alors prendre en compte les propriétés locales et globales du système. Afin de résoudre ce problème, la littérature propose plusieurs solutions développées en s'inspirant de la biologie (valeur de fitness, ...), de la sociologie (fonction d'utilité, satisfaction, altruisme, ...) ou de la physique (entropie, énergie, ...). Aussi, les indicateurs utilisés pour cette caractérisation/interprétation des phénomènes émergents peuvent être classés selon trois catégories :

- *Indicateurs basés sur le cadre applicatif.* Ce sont les indicateurs les plus simples à construire puisqu'ils s'appuient sur une évaluation pragmatique du phénomène émergent relativement à l'application visée. Par exemple, si un système a pour objectif la recherche du plus court chemin dans un graphe, il est assez facile de construire un indicateur de longueur de chemin et de comparer les résultats obtenus avec ceux d'un autre algorithme. Ainsi, construire un tel indicateur ne nécessite qu'une bonne connaissance du domaine applicatif. C'est ce type d'indicateurs qui a été utilisé pour la validation des algorithmes, exposés dans le chapitre 3, concernant la navigation multi-véhicules.

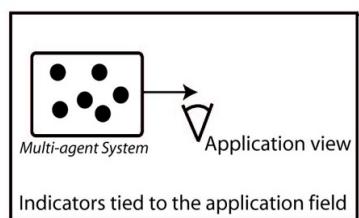


FIGURE 4.1 – Evaluation par rapports aux objectifs globaux et au cadre applicatif

- *Indicateurs basés sur une évaluation globale de l'organisation émergente.* Ce type d'indicateurs est également très répandu dans la littérature. Il s'agit alors de trouver une caractérisation globale de la configuration spatiale ou temporelle de la population d'agents. C'est ce type d'indicateur qui a été utilisé pour les travaux, exposés dans le chapitre 2, concernant la localisation et le suivi de cibles.

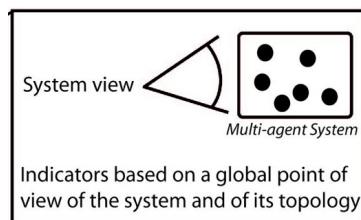


FIGURE 4.2 – Évaluation globale basée sur la mesure globale de l'organisation émergente

- *Indicateurs globaux basés sur les mécanismes locaux d'interaction.* Cette catégorie est la plus délicate à mettre en œuvre car il faut à la fois prendre en compte les mécanismes locaux d'interaction et leur résultats au niveau global. Parmi les indicateurs usuels entrant dans cette catégorie, nous pouvons noter l'entropie et les indicateurs s'appuyant sur la notion d'énergie. En effet, dans les cas où l'inspiration est physique, l'entropie peut être utilisée pour estimer l'ordre ou l'organisation du système. Il existe plusieurs façons de calculer

l'entropie parmi lesquels nous pouvons citer l'entropie sociale hiérarchique (BALCH 2000), et l'entropie dynamique ou statistique (PARUNAK et al. 2001).

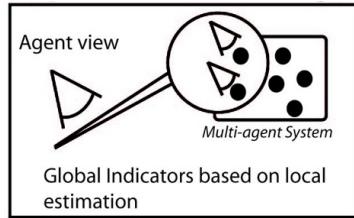


FIGURE 4.3 – Evaluation des phénomènes émergents globaux en prenant en compte les mécanismes locaux

Les travaux présentés dans ce chapitre portent sur ce troisième type d'indicateurs. Dans un premier temps, nous allons présenter l'utilisation de la notion d'énergie (potentielle et cinétique) dans le cadre de la simulation de piétons. Ensuite, nous présenterons nos travaux liés à l'utilisation de la fonction de partition dans le cadre d'une application de type boids de Reynolds (REYNOLDS 1987) et de l'assistance à la conduite dont le cadre a déjà été présenté dans le chapitre 2.

4.3 Construction d'indicateurs globaux basés sur l'énergie pour la simulation de piétons

4.3.1 Contexte

L'objectif de ce travail est de pouvoir construire une simulation d'un grand nombre de piétons permettant de rendre compte le plus précisément possible des déplacements de chacun. Généralement, les ressources matérielles sont insuffisantes pour tout simuler de façon précise, d'autant plus qu'il est nécessaire de visualiser la simulation dans un environnement virtuel. De plus, il n'est pas forcément intéressant de tout simuler. C'est d'autant plus important si on ne visualise qu'une partie de la simulation. Il faut donc être en mesure de regrouper les piétons (agents) de façon à rester le plus précis possible. L'objectif est donc ici de construire des indicateurs permettant d'évaluer l'état de la population d'agents en prenant en compte les comportements et les contraintes de chacun des composants. Pour cela, nous avons défini des indicateurs, basés sur la notion d'énergie, permettant d'évaluer l'état du système, l'état des groupes le constituant et l'état des agents formant ces groupes. L'utilisation de ces indicateurs à différents niveaux d'abstraction a permis en particulier de définir des mécanismes de regroupement entre les constituants du système en vue d'une réduction des ressources nécessaires à la simulation.

4.3.2 Un modèle de simulation holistique

Comme dit précédemment, le contexte de ce travail est la simulation de foules de piétons dans un environnement urbain. Compte tenu de ses caractéristiques, le milieu urbain peut être considéré comme un système complexe. Dans nos travaux, nous nous appuyons sur le concept d'holon, pour la modélisation de foules de piétons dans un environnement urbain. Ce concept a montré son efficacité dans le cadre de la modélisation de systèmes complexes (TECCHIA et al. 2001), (ULIERU et al. 2002). Un holon peut être défini comme une structure auto-similaire étant elle-même composée d'holons. La structure organisationnelle constituée d'holons est appelé une holarchie. Elle permet par exemple de modéliser un système selon plusieurs niveaux de granularité.

D'un point de vue comportemental, il n'y a que très peu de différences entre les actions réalisées par un piéton et celles réalisées par un groupe de piétons subissant les mêmes contraintes et désirant atteindre le même objectif. Ainsi, il semble naturel d'utiliser une structure holarchique pour effectuer une simulation de piétons. La principale difficulté réside alors dans le choix du niveau d'abstraction à utiliser pour réaliser la simulation de chaque élément du système. Ce choix est tributaire à la fois du niveau de simulation désiré et des ressources disponibles. Chaque holon joue à la fois un rôle correspondant à son comportement propre et un rôle dans l'ordonnancement de la simulation. Un exemple de ce type de structure est exposé dans la figure 4.4. Le niveau le plus bas, en général désigné comme le niveau microscopique, correspond à une simulation la plus précise possible utilisant chaque élément à son plus haut niveau de détail. Plus nous montons dans la holarchie, plus les comportements des agents sont agrégés et donc moins la simulation est détaillée. Le nombre de niveaux de la holarchie dépend de l'application de simulation visée et du nombre de ses constituants. Le passage d'un niveau d'abstraction à l'autre se fait en considérant les variations d'affinité entre les agents.

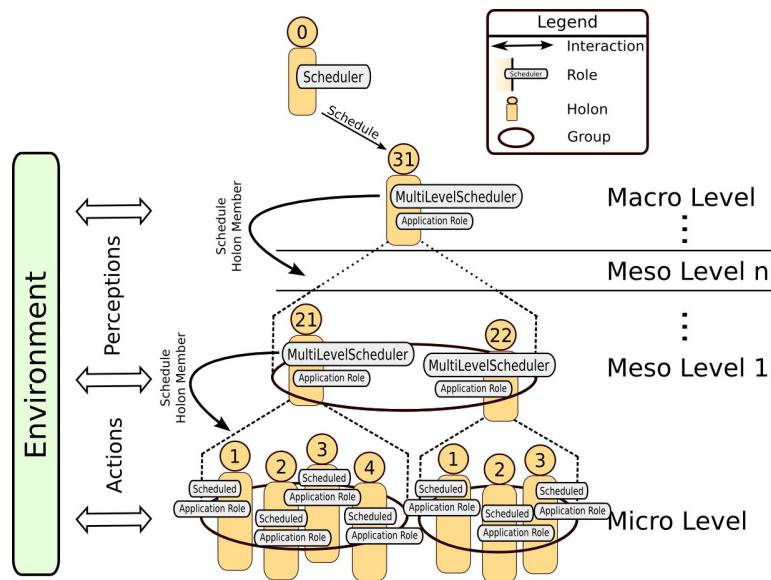


FIGURE 4.4 – Evaluation des phénomènes émergents globaux en prenant en compte les mécanismes locaux (GAUD et al. 2008a), (GAUD et al. 2007a).

Ainsi, chaque piéton est considéré comme un holon. Ces holons sont alors groupés sous la forme d'un super-holon en fonction de leur affinité. Les super-holons sont alors également regroupés de façon à obtenir *in fine* une holarchie complète. En fonction des variations de la valeur de cette affinité, un holon va pouvoir être simulé de façon individuelle ou à l'intérieur d'un super-holon. Dans ce contexte, la notion d'affinité est primordiale puisqu'elle permet la structuration cohérente de la holarchie.

4.3.3 Définition des grandeurs énergétiques utilisées

Parmi les grandeurs physiques généralement utilisées pour mesurer les phénomènes émergents d'un système, celle qui est la plus répandue est l'entropie. Sa valeur permet d'évaluer l'état d'organisation ou de désordre d'un système. Il existe plusieurs méthodes pour calculer cette valeur d'entropie. Nous pouvons citer l'entropie sociale hiérarchique (BALCH 2000) ou le calcul d'en-

tropie statique et dynamique (PARUNAK et al. 2001). Ces modes de calculs sont principalement dérivés de la formulation de l'entropie définie dans la théorie de la communication de Shannon (SHANNON 1948). Le principal inconvénient rencontré dans le cadre de ce type d'approches est lié à l'interprétation de la valeur estimée. Une autre approche possible est l'utilisation de la notion d'énergie. C'est cette approche que nous avons choisi d'utiliser dans le cadre de la simulation de foules de piétons. Nous avons donc utilisé trois mesures différentes de l'énergie :

- L'*énergie cinétique*, notée E_{ci} , correspond à l'évaluation de la dynamique du holon i en utilisant en particulier une estimation de sa vitesse.
- L'*énergie potentielle de but*, notée E_{pgi} , correspond à l'énergie nécessaire au holon i pour atteindre son but.
- L'*énergie potentielle de contrainte*, notée E_{pc_i} , correspond à une mesure des contraintes générées sur le holon i par les autres holons et les obstacles présents dans l'environnement.

Ces trois fonctions peuvent être considérées comme des fonctions d'état au sens de la Physique, puisqu'elles ne dépendent que de l'état du holon considéré. De plus, ces mesures peuvent être calculées quelque soit le niveau de la holarchie considéré. L'expression complète de ces trois indicateurs sera détaillée dans la section 4.3.4.

A partir de ces indicateurs, l'énergie globale d'un holon i peut être calculée par la relation suivante :

$$E_i = E_{ci} + E_{pgi} + E_{pc_i} \quad (4.1)$$

Cette mesure est représentative de l'état courant d'un holon. A partir de cette mesure globale d'énergie, nous pouvons définir la similarité s_{n+1} entre un holon, simulé au niveau n , et le super-holon à qui il appartient, simulé au niveau $n + 1$, par la relation suivante :

$$s_{n+1} = (\Delta E)_{n+1} = E_j^{n+1} - E_i^n \quad (4.2)$$

Dans cette équation E_i^n est l'énergie du holon i simulé au niveau n et E_j^{n+1} est l'énergie de son super-holon. Si cette valeur de similarité tend vers zero, nous pouvons estimer que la simulation du holon au sein de son super-holon est une bonne approximation. Par contre, si cette valeur augmente, la simulation au niveau $n + 1$ n'est plus une bonne simulation. Il faut alors envisager d'avoir recours à une simulation au niveau inférieur.

De même, nous avons défini la notion d'affinité entre les holons d'un même niveau n par la relation suivante :

$$Aff_{i-j} = \frac{1}{E_i^n - E_j^n} \quad (4.3)$$

Plus cette valeur est importante, plus les holons sont proches en terme de dynamique de but et de contraintes. C'est cette valeur qui va permettre de décider du regroupement de plusieurs holons en un seul super-holon.

4.3.4 Application à la simulation de piétons

Le modèle de piéton utilisé est un modèle à base de forces. Un piéton ou un holon (groupe de piétons) est attiré par un objectif avec une force d'attraction définie par :

$$\vec{F}_{obj} = \beta_{obj} \vec{A}_i \vec{O} \quad (4.4)$$

avec A_i la position du holon i , O la position du but et β_{obj} une constante.

La force de répulsion entre holons est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{rep_{ij}} = \beta_{ij} \frac{m_i \cdot m_j}{d_{ij}^2} \cdot \vec{d}_{ij} \quad (4.5)$$

avec \vec{d}_{ij} le vecteur reliant le holon j au holon i , m_i et m_j les masses respectives des holons i et j , et β_{ij} une constante.

La force générée par les obstacles est, quant à elle, donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{rep_{obs}} = \beta_{obs} \frac{m_i}{(d \cdot \sin(\alpha))^4} \cdot \vec{n} \quad (4.6)$$

avec d la distance entre le holon i et l'obstacle, α l'angle entre le vecteur reliant le holon à son but et celui le reliant à l'obstacle, β_{obs} une constante et \vec{n} le vecteur unitaire défini par :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 & -\text{signe}(\alpha) \\ \text{signe}(\alpha) & 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{\vec{A}_i \vec{O}_{bs}}{\|\vec{A}_i \vec{O}_{bs}\|} \quad (4.7)$$

Une fois ces comportements formalisés, nous pouvons calculer les différentes énergies précédemment définies de la façon suivante :

- L'énergie cinétique est calculée par la formule classique suivante :

$$E_{ci} = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \|\vec{V}_i\|^2 \quad (4.8)$$

où \vec{V}_i est la vitesse du piéton et m_i sa masse.

- L'énergie potentielle est généralement définie, dans le cadre d'une force \vec{F} conservative, par la relation $Ep = -\delta W_{\vec{F}} = -\vec{F} \cdot \vec{du}$ avec \vec{du} un vecteur unitaire dans le sens du déplacement du mobile considéré. Par conséquent, les énergies potentielles de but et de contrainte sont données par les expressions suivantes :

$$E_{pgi} = -\frac{\beta_{obj} \cdot \vec{A}_i \vec{O}_{bj} \cdot \vec{V}_i}{\|\vec{V}_i\|} \quad (4.9)$$

$$E_{pc_i} = \sum_{o \in \{obstacles\}} \frac{\vec{n}_o \cdot \vec{V}_i}{\|\vec{V}_i\| (d_o \cdot \sin(\alpha_o))^4} + \sum_{i \neq j} \frac{\vec{d}_{ij} \cdot \vec{V}_i}{\|\vec{V}_i\| d_{ij}^2} \quad (4.10)$$

4.3.5 Résultats

Dans un premier temps, nous avons étudié l'évolution de l'énergie d'un piéton simulé de façon microscopique selon un parcours prédéfini.

La figure 4.5 montre les résultats obtenus. La partie gauche correspond au parcours du piéton dans le monde. Le piéton part de la position *start* pour rejoindre la position *goal* et rencontre, sur son chemin, deux obstacles lui imposant une trajectoire d'évitement. La partie droite de la figure montre l'évolution de l'énergie globale du piéton durant ce parcours. La tendance globale correspond à une augmentation de l'énergie entre le point de départ et le point d'arrivée. La présence des obstacles sur le parcours correspond à des baisses brusques de l'énergie lorsque le piéton est à proximité.

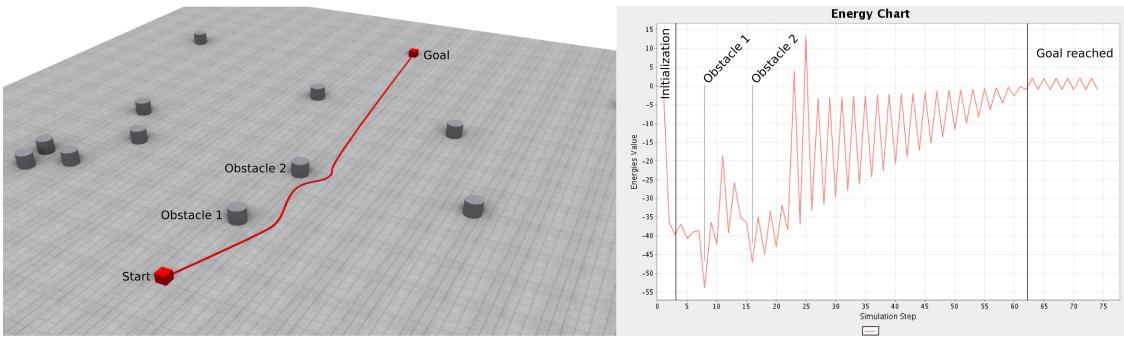


FIGURE 4.5 – Evolution de l'énergie d'un piéton sur un parcours donné (GAUD et al. 2008a).

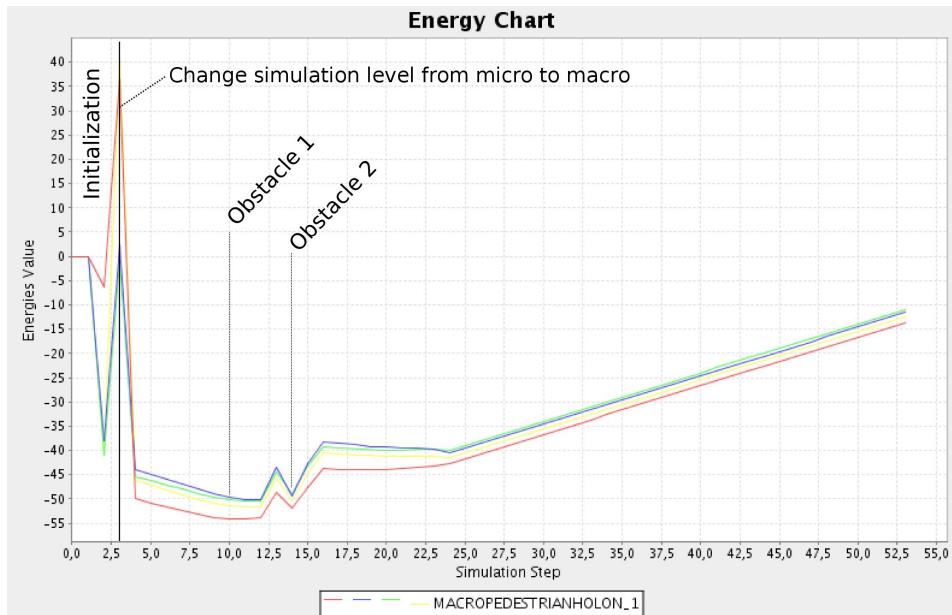


FIGURE 4.6 – Comparaison du niveau d'énergie de plusieurs piétons suivant un parcours similaire (GAUD et al. 2008a).

Ensuite, nous avons comparés les niveaux d'énergie de plusieurs piétons parcourant un chemin similaire (cf. figure 4.6). Cette comparaison montre que les profils énergétiques sont quasiment identiques pour des piétons ayant une vitesse initiale et un objectif similaires.

Pour valider ce modèle et ces indicateurs, nous avons réalisé plusieurs simulations impliquant un nombre variable de holons et nous avons fait une comparaison entre le temps de calcul nécessaire pour une simulation au niveau microscopique et une simulation au niveau macroscopique (cf. figure 4.7)

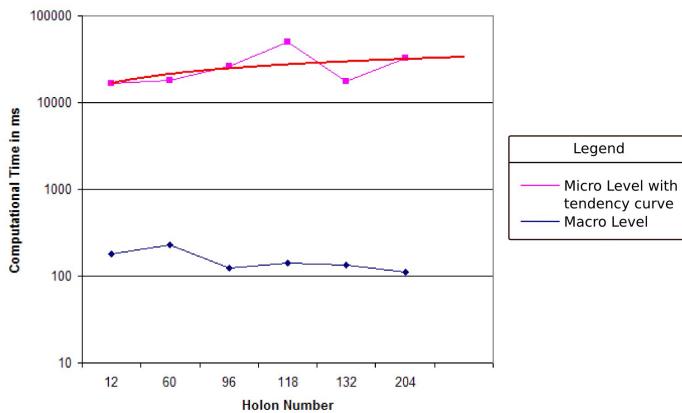


FIGURE 4.7 – Comparaison du temps de calcul nécessaire pour des simulations au niveau macroscopique et au niveau microscopique pour un nombre variable d'agents (GAUD et al. 2007a).

Les résultats obtenus sont de bonne qualité et permettent de mettre en évidence la pertinence de ce type d'indicateurs inspiré de l'énergie pour caractériser à la fois le système mais également ses constituants pris de façon individuelle ou de façon collective. De plus, le fait d'introduire dans ce cadre applicatif de la simulation de piétons une structure holonique permet d'utiliser les mêmes indicateurs quelque soit le niveau d'abstraction considéré.

Le principal inconvénient de ce type d'indicateur est qu'il repose nécessairement sur un modèle physique d'interaction entre les éléments du système. Il ne peut donc pas être utilisé dans d'autres types d'approche. De plus, la sémantique de la notion d'énergie n'est pas toujours facile à apprêhender. Enfin, bien que l'énergie soit adaptée dans le cadre d'un système holonique, ce n'est pas forcément le cas pour des systèmes où chaque niveau possède un ensemble de règles et de comportements différents. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la fonction de partition et à son adaptation aux systèmes multi-agents.

4.4 Construction d'indicateurs globaux basés sur la fonction de partition

4.4.1 Principes théoriques

Ce travail s'appuie sur une technique inspirée de la physique statistique. Dans notre contexte, la physique statistique est une bonne source d'inspiration pour analyser les relations entre les deux niveaux d'observation d'un système. C'est l'une des seules disciplines scientifiques ayant réussi à faire le lien entre des propriétés microscopiques (agitation thermique,...) et leurs influences au

niveau macroscopique (grandeur thermodynamiques) (BALIAN 2007). Dans ce cadre, on considère alors que seules des informations statistiques sur les éléments microscopiques peuvent aider à la compréhension des mécanismes complexes observés au niveau macroscopique. La fonction de partition est une grandeur, notée Z , qui représente l'intégration des éléments microscopiques dans une grandeur macroscopique mesurable. La plupart des fonctions classiques de la thermodynamique, encore appelées potentiels (enthalpie, énergie, enthalpie libre,...) sont issues de cette fonction.

Un potentiel thermodynamique peut être considéré comme une fonction d'état permettant de caractériser un système selon un certain point de vue (BALIAN 2007), (KULLBACK 1959), (GIORDANO 1998). Chaque potentiel peut atteindre une valeur extrémum lorsque le système se trouve dans un état d'équilibre. Les potentiels thermodynamiques sont donc particulièrement utiles dès lors que l'on désire étudier un système au cours d'une transformation telle qu'une réaction chimique par exemple. En thermodynamique, ces potentiels ont la dimension d'une énergie. La dénomination "potentiel" vient du fait qu'ils peuvent être considérés comme décrivant la quantité d'énergie potentielle d'un système thermodynamique sous certaines contraintes de température, de pression,... La liste des potentiels thermodynamiques les plus courants est présentée dans la figure 4.8.

Potentiel thermodynamique	Jeux de variables d'état utilisées
Énergie interne U	S, V, N_i
Energie libre (Helmholtz) A (ou F)	T, V, N_i
Enthalpie H	S, P, N_i
Enthalpie libre (Gibbs) G	T, P, N_i

FIGURE 4.8 – Les différents potentiels thermodynamiques

où T est la température, S l'entropie, P la pression, V le volume, et N_i le nombre d'éléments du système.

La fonction de partition est en général donnée par l'équation suivante :

$$Z = \sum_j \exp^{-\beta E_j} \quad (4.11)$$

avec E_j l'énergie du micro-état j .

La principale difficulté des approches utilisant la fonction de partition est liée aux conditions restrictives imposées pour le calcul de chacun des potentiels thermodynamiques, qui ne sont pas forcément compatibles avec une utilisation dans le cadre de modèles informatiques. En effet, des grandeurs telles que la pression, le volume ou la température ne sont pas facilement transposables dans les systèmes artificiels. Ainsi, parmi tous les potentiels thermodynamiques pouvant être extraits de la fonction de partition, la fonction de Helmholtz semble être la plus adaptée aux systèmes multi-agents de part les contraintes imposées. Cette fonction se calcule en considérant que la température du système, son volume et son nombre de constituants sont constants. Le potentiel de Helmholtz est donné en relation avec la fonction de partition par l'équation suivante :

$$A(T, V, N_i) = - \frac{\ln Z}{\beta}. \quad (4.12)$$

avec T , V and N_i constants, Z la fonction de partition et β une constante liée au système étudié.

Avant de calculer ce potentiel pour un système multi-agent, il est important de se poser la question de la légitimité d'une telle approche alors que les notions de température, de volume n'ont pas forcément d'équivalents dans un cadre agent et que, même si le nombre d'agents d'un système peut être très important, il n'est pas forcément suffisamment grand pour être statistiquement pertinent.

En ce qui concerne le premier point, le problème du nombre N_i , du volume V et de la température T peut être résolu en imposant des contraintes au système. En effet, on peut considérer le volume comme étant la dimension de l'environnement, N_i comme étant le nombre d'agents et T comme étant une grandeur liée au mouvement moyen des agents. Il est ainsi assez aisés de maintenir un environnement avec une taille constante (V constant) et de ne considérer que les systèmes fermés (N_i constant). En ce qui concerne la température, le problème est un peu plus délicat. Cependant, nous pouvons adopter la même hypothèse que celle utilisée dans (SHANNON 1948) et (PARUNAK et al. 2001) qui considère que la température peut être vue comme constante dans des systèmes artificiels comme ceux qui nous intéressent ici.

Pour le second point, c'est à dire le nombre d'agents, il est important de revenir sur les fondamentaux de la physique statistique. Dans (BALIAN 2007), il est expliqué que ce qui doit être statistiquement pertinent pour pouvoir appliquer ces méthodes n'est pas le nombre d'entités intervenants dans le système mais le nombre d'états accessibles du système. Étant donné que les exemples que nous étudions possèdent tous un environnement continu, le nombre d'états accessibles par les agents est infini. Par conséquent, la fonction de partition et ses potentiels dérivés peuvent très bien, de ce point de vue, être utilisés dans le cadre des systèmes multi-agents.

Enfin, il reste à déterminer la valeur de la constante β . Initialement, cette constante a été introduite pour faire coïncider l'entropie statistique avec l'entropie calculée classiquement en thermodynamique (BALIAN 2007). Dans le cadre de la théorie de la communication, cette constante est choisie comme étant égale à 1 car il n'y a alors pas de nécessité de mise à l'échelle par rapport aux grandeurs manipulées. Nous avons également adopté ce point de vue dans les travaux que nous présentons dans la suite de ce chapitre.

4.4.2 Première application : les Boids

Les boids (REYNOLDS 1987) peuvent être maintenant considérés comme une application classique des systèmes multi-agents réactifs. L'objectif de ce modèle est de pouvoir modéliser le déplacement d'une volée d'oiseaux ou d'un banc de poissons en utilisant uniquement trois comportements simples de séparation, de cohésion et d'alignement. Ces trois comportements sont généralement mis sous la forme des équations suivantes :

$$\vec{F}_{Cohesion} = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\vec{R}_i}{N} \right] - \vec{P}_{agent} \quad (4.13)$$

$$\vec{F}_{Separation} = \sum_{i=1}^N \frac{\vec{R}_i}{\|\vec{R}_i\|^3} \quad (4.14)$$

$$\vec{F}_{Alignment} = \sum_{i=1}^N \frac{\bullet \vec{R}_i}{\vec{R}_i} \quad (4.15)$$

$$With \begin{cases} N : Nombre de voisins \\ \vec{R}_i : distance entre \\ l' agent et l' agent i \\ \vec{P} : position de l'agent \end{cases} \quad (4.16)$$

Maintenant que ces équations sont définies, il s'agit dans un premier temps de calculer les différentes énergies pour chacun des agents, de calculer la fonction de partition du système et d'en déduire l'énergie libre A du système.

- **Énergie cinétique** : Dans l'équation suivante, l'agent i est représenté par sa masse m_i et sa vitesse \vec{V}_i .

$$E_K = \frac{1}{2} m_i \vec{V}_i \cdot \vec{V}_i \quad (4.17)$$

- **L'Énergie potentielle** est calculée selon la même méthode que celle expliquée précédemment dans ce chapitre.

$$E_p = -\delta W = -\vec{F}_{total} \cdot \vec{d}u = -(\vec{F}_C \cdot \vec{d}u + \vec{F}_S \cdot \vec{d}u + \vec{F}_A \cdot \vec{d}u) \quad (4.18)$$

L'énergie globale de l'agent i correspond à la somme des deux énergies.

A partir de maintenant, il est possible de calculer la fonction de partition Z et le potentiel A .

$$\begin{cases} A(T, V, N_i) = -\ln(Z) \\ Z = e^{-\beta E_i} \end{cases} \quad (4.19)$$

L'application de cette méthode sur une population de boids a donné les résultats exposés dans la figure 4.9

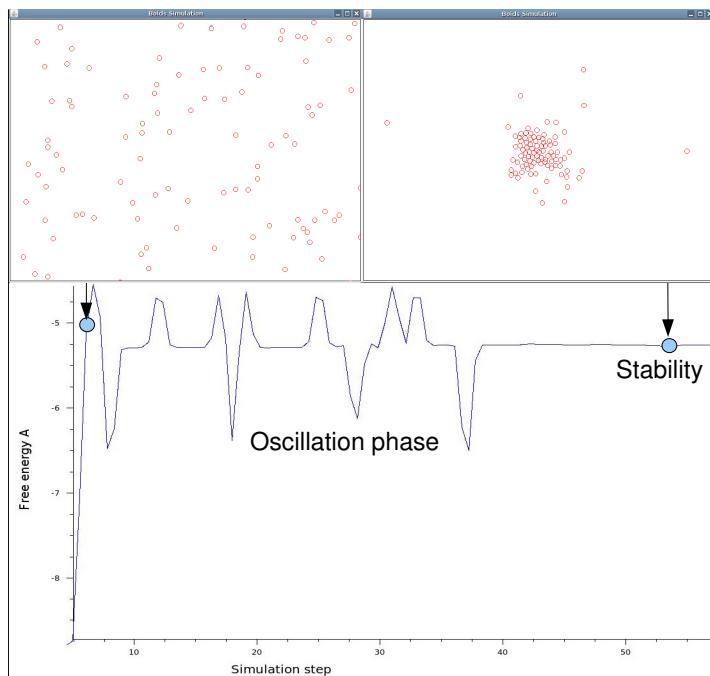


FIGURE 4.9 – Résultat du calcul du potentiel de Helmholtz dans le cadre des boids.

A l'initialisation l'énergie libre possède une valeur minimum qui correspond à une répartition des boids de façon aléatoire dans l'environnement. Le système applique ensuite les comportements aux agents ce qui se traduit par une oscillation de la valeur de l'énergie libre. Une fois la cohésion du groupe de boids obtenue, l'énergie libre se stabilise.

4.4.3 Deuxième application : Évitement d'obstacles

Dans le cadre du système d'évitement d'obstacle basé sur l'environnement décrit dans le chapitre 2, nous avons utilisé le potentiel de Helmholtz pour moduler la consigne envoyée au véhicule. Le potentiel de Helmholtz permet de représenter, sous la forme d'une fonction, les contraintes subies par le système. Dans ce contexte, une forte contrainte du système multi-agent correspond à une distribution d'obstacles à proximité du véhicule. Le principal intérêt à utiliser cette approche est de pouvoir prendre en compte cette contrainte dans la commande transmise au véhicule réel.

Cette commande, calculée initialement sous la forme du vecteur \vec{M} (cf. equation 2.1), est modifiée de la façon suivante :

$$\vec{D} = (1 + \kappa \cdot A) \cdot \vec{M} \quad (4.20)$$

avec κ un facteur de prépondérance.

Ce vecteur \vec{D} est alors ensuite appliqué comme consigne au véhicule réel. Grâce à l'utilisation de la fonction de partition, le système agit de façon progressive sur la consigne du conducteur. En effet, lorsque les obstacles sont éloignés du véhicule, le système agit très faiblement, se contentant d'infléchir légèrement les consignes de direction. Par contre, lorsque les obstacles sont proches, le système prend totalement le contrôle en effectuant une trajectoire d'évitement. Les expérimentations réalisées tant en simulation qu'avec les véhicules du laboratoire ont permis de mettre en évidence, dans ce cas, des résultats probants y compris avec un nombre variable d'obstacles et avec des obstacles dynamiques. La figure 4.10 montre par exemple le profil de la vitesse du véhicule lors du passage entre deux obstacles (CONTET et al. 2009c).

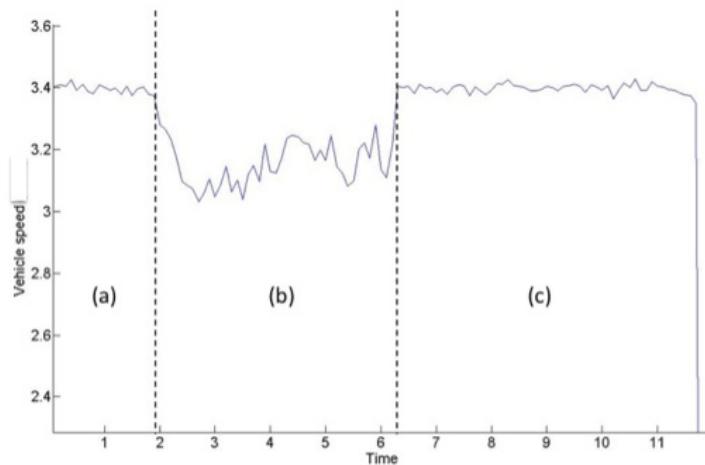


FIGURE 4.10 – Profil de la vitesse du véhicule lors du passage entre deux obstacles (CONTET et al. 2009c)

Dans cet exemple, la partie (a) correspond à la zone de déplacement du véhicule avant la détection des obstacles, la partie (b) correspond au passage du véhicule entre les obstacles et la partie (c) correspond à la zone de dégagement après les obstacles. Le véhicule adapte sa vitesse en prenant en compte les contraintes générées par la présence des obstacles. Une fois les obstacles franchis, le véhicule reprend son déplacement de façon nominale.

4.5 Conclusion

Caractériser les propriétés émergentes d'un système multi-agent est une tâche délicate. Les méthodes proposées utilisant la notion d'énergie ou la fonction de partition montrent de bons résultats à la fois sur des exemples d'étude, en simulation et en expérimentations réelles. Le principal inconvénient de ces approches est qu'elles ne sont applicables qu'à des systèmes reposant sur des modèles d'interaction d'inspiration physique. La méthode utilisant l'énergie est plus directement applicable. L'utilisation de la fonction de partition oblige à manipuler des grandeurs (Température, Pression, Volume) dont la sémantique est plus adaptée aux systèmes thermodynamiques qu'aux systèmes informatiques. Parmi tous les potentiels thermodynamiques calculables à partir de la fonction de partition, le potentiel de Helmholtz est celui dont la sémantique est la plus adaptée puisqu'il correspond à une mesure de la contrainte subie par le système en considérant T , V et N_i constants. Par contre, ce modèle impose des précautions d'utilisation de façon à s'assurer que le système possède les bonnes propriétés vis à vis de la physique. De plus, les hypothèses sur les grandeurs physiques, en particulier sur le caractère constant de la température, même si elles sont valables en première approximation, ne sont pas complètement satisfaisantes d'un point de vue scientifique. Une des solutions que nous souhaitons étudier est de définir un équivalent des variables d'états (P , T et V) dans le cadre des systèmes multi-agents. Ceci revient à l'élaboration d'une physique des SMA à partir de laquelle, nous pourrions appliquer les calculs liés à la fonction de partition.

Certains travaux exposés dans ce chapitre sont détaillés dans les publications suivantes : (GAUD et al. 2008a) et (GECHTER et al. 2011a) présentes dans le document annexe.

Chapitre 5

Vérification et model checking

5.1 Introduction

Même si cette thématique ne constitue pas le champ principal de mes travaux de recherche, j'ai néanmoins travaillé, en collaboration avec P. Gruer et dans le cadre des travaux de thèse de Jean-Michel Contet et de Madeleine El-Zaher, sur la vérification de propriétés en relation avec des modèles d'interaction d'inspiration physique appliqués à la conduite en convoi.

En effet, la conduite en convoi fait partie du domaine des applications embarquées distribuées sujettes à des propriétés de sûreté. Idéalement, ces applications doivent faire l'objet d'une certification : on doit pouvoir garantir qu'un certain nombre de propriétés sont satisfaites. Dans ce contexte, la vérification est l'une des approches les plus utilisées. Cette dernière est l'activité qui consiste à établir, avec la force d'une preuve mathématique, qu'un système S satisfait une propriété P . En tant qu'activité, la vérification s'appuie sur un ensemble de formalismes, d'outils et de méthodes.

5.2 Cadre théorique

5.2.1 Les systèmes formels

Les approches formelles en génie logiciel se basent sur la construction d'un modèle de l'application à développer. Le modèle est dit formel lorsqu'il est construit à l'aide d'un formalisme dont toutes les primitives ont été mathématiquement définies. En général, les modèles construits à l'aide de ces formalismes prennent la forme d'un système formel, qui sont particulièrement adaptés à l'intégration d'une étape de vérification dans le processus de conception.

Un système formel comprend trois éléments de base (\mathcal{L} , \mathcal{S} , f_s), où \mathcal{L} est un langage, défini en donnant sa syntaxe et utilisé pour construire des modèles formels de spécification. \mathcal{S} est un domaine sémantique, une structure mathématique constituée d'ensembles, fonctions, relations, opérateurs, ... La fonction f_s , appelée fonction sémantique, établit une correspondance entre une entité syntaxique et une entité sémantique. Si la syntaxe de \mathcal{L} est définie par induction, on peut définir f_s de façon inductive.

Aux trois éléments de base s'ajoute une quatrième composante, \mathcal{T} , qui est une théorie du premier ordre (TPO), définie sur les entités du domaine sémantique, éventuellement augmenté si nécessaire d'autres domaines. Une TPO est une structure de la logique formelle qui comprend un ensemble de prédicats qui s'appliquent aux entités du domaine sémantique et un langage d'expressions logiques, défini à partir des prédicats, à l'aide d'opérateurs logiques classiques et/ou modaux. La TPO peut inclure également un système de déduction, constitué d'un ensemble d'axiomes et d'un ensemble de règles de déduction. Le rôle de la TPO sera d'exprimer des propriétés relatives aux entités sémantiques. La présence d'un système de déduction introduit la possibilité de prouver les dites propriétés, relativement à des entités sémantiques. Il est à signaler que pour certains systèmes formels, le domaine sémantique et la TPO se confondent. C'est le cas des formalismes basés sur la logique du premier ordre et la théorie des ensembles.

5.2.2 La vérification

Étant donné un modèle M et une propriété P , la vérification consiste à établir que M satisfait toujours P . En général, le modèle M est une représentation des comportements possibles du système et P une propriété relative à ces comportements, exprimée par une formule de la logique

temporelle.

Dans la grande majorité des cas, la propriété à vérifier porte sur le comportement du système. C'est le cas des propriétés de sûreté, auxquelles nous nous intéressons. Soit $\mathcal{C}(M)$ le comportement du modèle M , c'est-à-dire l'ensemble des états globaux successifs que M peut produire. Dans ce cas, la vérification consiste à décider des relations suivantes, entre la formule d'état P , et le modèle M :

- P est satisfaite par M s'il existe $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ telle que $\sigma \models P$.
- P est valide relativement à M si pour tout $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ on a $\sigma \models P$.

Si P est satisfaite par M , on note $M \models P$. La vérification permet de répondre par oui ou par non à la question de savoir si la propriété est satisfiable ou valide relativement à M ou bien si elle est un invariant de M . Il suffit de disposer d'un algorithme de vérification de la satisfiabilité car P sera valide relativement à M si $\neg P$ n'est pas satisfiable par M .

L'objectif de la vérification est de s'assurer que l'algorithme développé pour une tâche donnée n'induit pas d'erreur ou de dysfonctionnement par rapport au modèle théorique problème.

5.2.3 Les différents approches de vérifications

Les outils de vérification s'inspirent à la fois des systèmes de déduction et des algorithmiques de la décision. Chacun de ces deux types a donné naissance à une famille d'outils de vérification. Ces deux familles sont constituées, d'une part, par les outils basés sur la preuve (*theorem-proving*) et d'autre part, par les outils de *model checking*.

La preuve semi-automatique

La preuve repose sur le principe de déduction associé à la TPO du système formel. Le modèle M est représenté par un ensemble de formules qui jouent le rôle d'hypothèses. Dans ce cas, on montre $M \models P$ en trouvant une preuve de $M \vdash P$ qui se lit "des hypothèses M on déduit P ". Bien entendu, lors de la preuve, aux hypothèses fournies par M , on ajoute en général un ensemble de prédictats, d'axiomes et de règles de déduction qui font partie de la TPO associé au système formel. Par exemple, si nous considérons le modèle compteur-contrôleur de notre exemple, les variables étant des nombres entiers, des propriétés générales de ces derniers peuvent intervenir dans la preuve. Les méthodes basées sur la preuve donnent, en général, de très bons résultats en ce qui concerne la vérification de l'invariance.

Le model-checking

Le model-checking est basé sur les procédures de décision de la validité ou de la satisfiabilité, c'est à dire la recherche de modèles, au sens logique du terme, par exploration de l'espace d'états. Si nous considérons, par exemple, le cas des systèmes de transition, les modèles de P sont les chaînes σ telles que $\sigma \models P$. En général, les algorithmes de décision les plus efficaces sont ceux qui décident de la satisfiabilité (appelés SAT solvers). Dans ce cas, on vérifiera que $M \models P$ en cherchant à satisfaire $\neg P$. Si on trouve une chaîne $\sigma \in \mathcal{C}(M)$ telle que $\sigma \models \neg P$, alors σ est un contre-exemple de la propriété étudiée (P). Si aucun contre-exemple n'est trouvé, on conclut que $M \models P$.

L'outil de vérification par model-checking est le model-checker, qui opère conformément au schéma de la figure 5.1. A partir d'un modèle M du système, d'une propriété P à vérifier et,

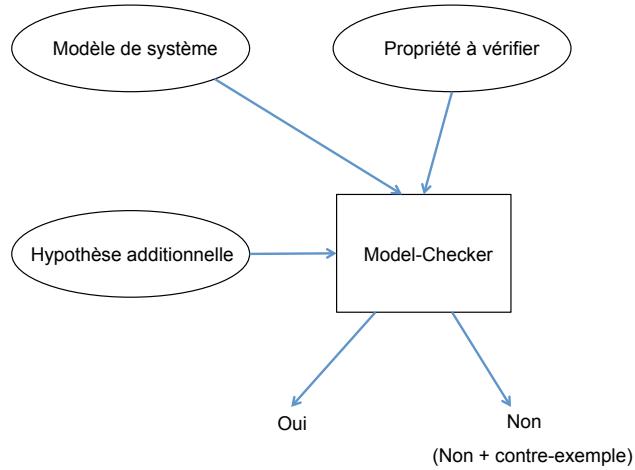


FIGURE 5.1 – Schéma de principe d'un model-checker

dans certains cas, d'une hypothèse auxiliaire H , le model checker, s'il converge vers un résultat, répondra *Oui* si $M \models P$ ou *Non* si $M \not\models P$. Certains model-checkers fonctionnent par réfutation, en cherchant une évolution du système qui met en défaut la propriété. Si une telle évolution est trouvée, le model-checker fournit une réponse négative et présente le contre-exemple.

Les outils de vérification ont des limitations, que nous allons présenter de façon très succincte. Chacune des familles d'outils, *theorem-proving* ou *model-checking*, présentent des limitations liées essentiellement à la complexité des systèmes modélisés.

Les outils basés sur le theorem-proving : des résultats théoriques relatifs à la décidabilité de la preuve indiquent que l'outil de preuve universel, capable de construire toutes les preuves possibles sans intervention humaine n'est pas à la portée des machines englobées dans l'hypothèse de Church-Turing. Par conséquent, la preuve ne peut être que semi-automatique, nécessitant l'aide d'un opérateur humain et ceci à partir d'un niveau de complexité assez bas. Un autre inconvénient de la preuve est qu'une réfutation de la propriété ne donne pas d'indication sur les modifications à apporter pour corriger le modèle. D'autre part, la construction d'une preuve étant un processus exploratoire, on peut être confronté à des cas de non-terminaison ou de coût calculatoire important. De plus, les outils de preuve capables de traiter des modèles contenant des variables réelles sont très rares.

Les outils basés sur le model-checking : les difficultés viennent de la nature exploratoire des algorithmes utilisés (GRUMBERG et al. 1991) qui reposent sur un parcours de l'espace d'états du système modélisé. Ce parcours est potentiellement exhaustif, dans le cas où la propriété est valide (car dans ce cas l'exploration ne sera pas arrêtée par la découverte d'un contre-exemple). Pour peu que le modèle incorpore des variables d'état à valeur prise dans des ensembles non finis, le nombre d'états possibles devient infini, et le model-checking peut, dans ces conditions, ne pas se terminer. De même, des systèmes dont le vecteur d'état global possède un nombre important de variables à valeur finie peuvent également posséder un espace d'états de très grande taille. Même si la puissance des algorithmes n'a pas cessé d'augmenter, des cas d'explosion combinatoire se présentent souvent dans la pratique réelle de la vérification.

Pour contourner les difficultés relatives à la vérification, de nombreux travaux ont abordé la question au niveau méthodologique : peut-on concevoir des méthodes pour l'utilisation des outils de vérification qui permettent de gérer les difficultés ? Ces travaux ont porté très majoritairement sur la vérification par model-checking, pour laquelle une idée générale se présente facilement à l'esprit : puisque le problème vient de la taille de l'espace d'états à explorer, comment réduire ou simplifier cet espace ? La section suivante présente de façon succincte les deux approches les plus étudiées quant à la maîtrise de la complexité de la vérification.

Méthodes de vérification

Deux concepts se sont imposés comme moyens de maîtriser le problème de l'explosion combinatoire. Premièrement, on peut imaginer une transformation qui, appliquée à l'espace d'états global, produit un nouvel espace d'état simplifié, où l'on fait **abstraction** de détails qui n'influent pas sur le résultat de l'exploration. Deuxièmement, on peut concevoir la possibilité de découper l'espace global en sous-espaces de taille maîtrisable, vérifier des propriétés auxiliaires sur les sous-espaces et, ensuite, déduire la propriété globale à partir des propriétés auxiliaires. On parlera alors dans ce cas de **méthode compositionnelle**.

La méthode compositionnelle, qui est celle que nous avons utilisée dans nos travaux, s'appuie sur une règle de déduction. La règle de déduction s'applique à des instances M_i du modèle du système. L'instance M_i est le résultat de l'addition d'un nouveau composant C_i à l'instance M_{i-1} . La composition de M_i avec C_i est notée $M_i = C_i \parallel M_{i-1}$. Généralement, C_i et M_{i-1} interagissent par l'intermédiaire d'un mécanisme de synchronisation ou de communication. Les systèmes composés de dispositifs physiques situés peuvent comporter des interactions par l'intermédiaire de perceptions sans aucun mécanisme explicite de communication ou synchronisation. L'idée principale, exprimée par la règle de déduction, est de simplifier la vérification de la propriété P_i en remplaçant le modèle M_{i-1} par une propriété auxiliaire T_{i-1} , introduite en tant qu'hypothèse.

Étant données les propriétés P_1, \dots, P_n , nous notons $M \models P_1, \dots, P_n$ lorsque les propriétés P_i sont valides relativement au modèle M . Les propriétés sont évaluées sur des séquences infinies σ d'états, qui représentent des évolutions causales du système. Notons $\mathcal{B}(M)$ l'ensemble de séquences produites par M et $Sat(P)$ l'ensemble de séquences qui satisfont la propriété P . Alors, $M \models P$ si et seulement si $\mathcal{B}(M) \subseteq Sat(P)$. Nous notons $M, H \models P$ si la propriété P est satisfaite par le modèle M sous l'hypothèse H . La méthode de vérification compositionnelle applique la règle suivante pour $i > 0$:

$$R_c : \frac{C_i, T_{i-1} \models T_i \quad C_{i+1}, T_i \models S_{i+1}}{C_{i+1} \parallel M_i \models S_{i+1}} \quad (5.1)$$

Une condition suffisante de consistance pour cette règle est que $\mathcal{B}(C_i \parallel M_{i-1}) \subseteq Sat(T_i)$, ce qui signifie que l'addition du composant C_i n'empêche pas M_{i-1} de satisfaire T_i . Cette condition est satisfaite si la présence de C_i dans le système n'a aucune influence sur le comportement de M_{i-1} .

La formulation des propriétés auxiliaires T_i dépend des caractéristiques du problème. En général, on peut dire que T_i conditionne la satisfaction de S_i , éventuellement de façon indirecte.

Le processus de vérification induit par la méthode compositionnelle consiste alors à appliquer la méthode exposée dans la figure 5.2.

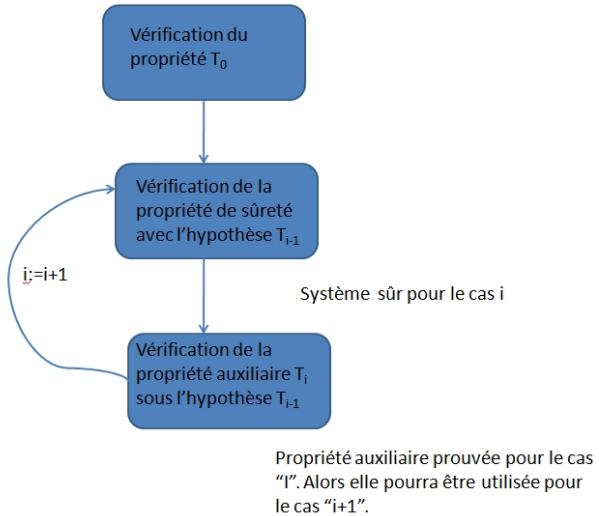


FIGURE 5.2 – Processus de vérification par la méthode compositionnelle

Les travaux que nous avons effectués s'appuient sur l'utilisation de la boîte à outil SAL, qui intègre, entre autres, un model-checker borné (bounded model-checker (BMC)) (BENSALEM et al. 2000), (SMITH et al. 2005), (PIKE 2007).

5.3 Vérification de propriétés de sûreté pour la conduite en convoi

L'objectif de cette section est de présenter le cadre dans lequel se sont déroulées nos activités de vérification de propriétés de sûreté des convois de véhicules. Ces travaux ont débuté dans le cadre du projet FCE/FUI CRISTAL et se sont poursuivis dans le cadre du projet ANR SafePlatoon.

5.3.1 Propriétés de sûreté

Parmi les nombreuses propriétés qui peuvent être définies, nous avons choisi de donner la priorité aux propriétés de sûreté permettant d'assurer la sécurité des passagers et des véhicules. Naturellement, nous nous sommes focalisés sur la propriété de **non collision** qui englobe un ensemble de propriétés de sûreté primordiales pour un convoi de véhicules.

Propriété de non collision entre deux véhicules du convoi

La non-collision entre véhicules du convoi est la propriété de sûreté la plus importante à vérifier pour assurer un déplacement fiable dans un convoi de véhicules. Pour exprimer cette propriété, nous utilisons deux métriques correspondant aux inter-distances latérale et longitudinale entre carrosseries, notées respectivement d_{cl} et d_{cL} .

La propriété de sûreté de non-collision entre deux véhicules du convoi est formulée de la façon suivante :

$$PS_1 : d_{cl} > d_{min_{lat}} \text{ et } d_{cL} > d_{min_{long}}$$

Propriété de non collision avec un élément extérieur au convoi

La non collision avec un élément extérieur au convoi est également une propriété de sûreté indispensable à la sécurité du convoi. Pour cela, nous avons défini une métrique représentant la distance minimum d_c par rapport à un obstacle que le convoi doit respecter. Cette distance est définie de façon à prendre en compte les contraintes liées aux caractéristiques des véhicules (distance d'arrêt, vitesse...).

La propriété de sûreté de non collision avec un élément extérieur au convoi est formulée de la façon suivante :

$$PS_2 : d_c > d_{min_{obstacle}}$$

5.3.2 Application à l'approche locale

Le modèle de véhicule suiveur utilisé est défini par la composition de trois comportements, correspondant chacun à un composant du modèle :

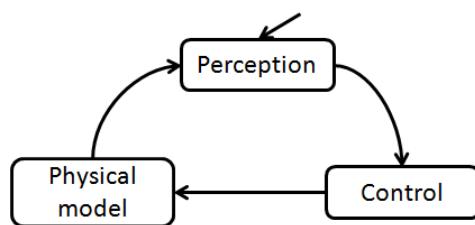


FIGURE 5.3 – Comportements d'un véhicule du convoi (EL ZAHER et al. 2012a)

- *Perception* : représente la fonction perception du véhicule. Le véhicule suiveur perçoit son leader local dans le convoi, et mesure l'inter-distance \vec{d} avec ce dernier.
- *Contrôle* : calcule une consigne de vitesse et de direction, en utilisant un modèle d'interaction tels que ceux définis dans le chapitre 3.
- *Modèle physique* : calcule la réaction du véhicule en fonction des caractéristiques dynamiques du véhicule.

Ces trois comportements sont exécutés séquentiellement, de façon cyclique comme le montre la figure 5.3.

En considérant notre approche de conduite en convoi basée sur un double ressort, la figure 5.4 présente les échanges de données entre les composants d'un véhicule.

Le modèle formel de ce comportement est ensuite développé sous SAL en détaillant le modèle de chacun des différents composants. La figure 5.5 montre l'écriture SAL du modèle comportemental d'un véhicule expurgé des détails concernant chacun de ses composants. Ceux-ci sont définis de façon détaillée dans (EL ZAHER et al. 2012a).

Application de la méthode compositionnelle

Dans le contexte de la conduite en convoi, le modèle M_i , tel qu'il est utilisé dans la méthode compositionnelle décrite précédemment, correspond au modèle formel d'un convoi de $i + 1$ véhi-

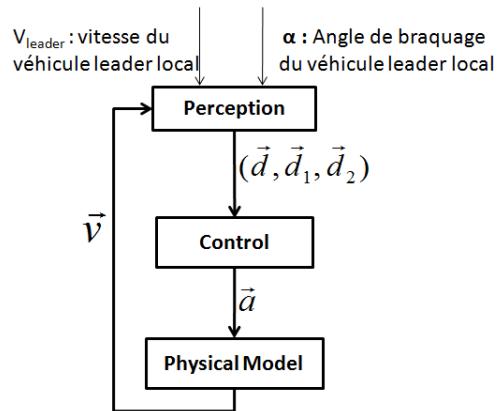


FIGURE 5.4 – Interactions entre les trois sous comportements d'un véhicule

```

Vehicle : CONTEXT =
BEGIN
  Constants definition
  Types definition
  Variables declaration
  Functions definition
  Perception : MODULE = ...
  Control : MODULE = ...
  physicalModel : MODULE = ...
  vehicleBehavior : MODULE = Perception [ ] Control [ ] PhysicalModel;
END;
  
```

FIGURE 5.5 – Ecriture SAL du modèle comportemental d'un véhicule

cules. La condition de consistance pour l'application de la règle R_c est satisfaite dans le cas de l'approche locale telle que présentée dans le chapitre 3, car aucun véhicule du convoi, modélisé par M_{i-1} n'est influencé par la présence d'un véhicule supplémentaire. En effet, étant donné que le modèle de ressorts utilisé est unidirectionnel, chaque véhicule ne peut influencer que ses suivreurs dans le train.

Résultats

Cette méthode a été appliquée à plusieurs scénarii de convoi de véhicules en configuration colonne, échelon ou ligne avec des contraintes de fonctionnement variables. La figure 5.6 montre par exemple les différents cas d'études abordés dans le cadre du projet SafePlatoon. Dans cette figure, $S1$, $S3$ et $S4$ correspondent respectivement aux configurations colonne, échelon et ligne ; $Mi1$, $Mi2$ et $Mi3$ correspondent respectivement à l'évaluation du nombre maximal de véhicules que peut comporter le convoi, à l'évaluation de la vitesse maximale que peut atteindre un convoi et à l'évaluation de l'inter-distance longitudinale minimale. $PM1$ correspond à une perturbation de la perception (absence de signal). Dans les cas $S3 - Mi1$ et $S4 - Mi1$, le nombre de véhicules donné dans le tableau correspond au nombre maximal de véhicules possibles dans le convoi.

Cas de vérification	Nombre de véhicule	Formation	d_x	d_y	Vitesse	Perturbation
S1-Mi1	Variable	Colonne	0	3 m	25 km/h	PM1
S1-Mi2	5	Colonne	0	3 m	variable	aucune
S1-Mi3	5	Colonne	0	Variable	25 km/h	aucune
S3-Mi1	3	Echelon	3 m	2 m	25 km/h	aucune
S4-Mi1	3	Ligne	0 m	2 m	15 km/h	aucune

FIGURE 5.6 – Les cas de vérification étudiés dans le cadre du projet SafePlatoon pour l'approche locale

Les résultats obtenus pour une vitesse de $25\text{km}/\text{h}$ et pour des rayons de courbure compris entre l'infini et 10m , n'ont pas montré de contre exemple pour des trains composés de 2 à 12 véhicules. Par contre, pour 13 véhicules, un contre exemple a été mis en évidence. Ceci permet donc d'en déduire le nombre maximal de véhicules pour un convoi évoluant à $25\text{km}/\text{h}$ et avec de rayons de courbure supérieurs à 10m . Dans le cas de rayons de courbure compris entre 10m et 5m , un contre exemple a été trouvé pour 6 véhicules.

Pour un convoi de 5 véhicules, la vitesse maximale sans contre-exemple est de $40\text{km}/\text{h}$ (cf. figure 5.7). Les résultats détaillés sont présentés dans (SAFEPLATOON et al. 2013).

Nombre de véhicule	Vitesse maximale	Rayon de courbure	Profondeur d'exploration	Nombre des noeuds explorés ¹	Temps d'exécution	Résultat
2 à 5	40 km/h	Infini	25	238859	950.17 s	prouvé
2 à 5	40 km/h	30	25	239159	887.12 s	prouvé
2 à 5	40 km/h	10	25	239159	902.36 s	prouvé
2 à 4	45 km/h	Infini	25	242265	1025.14 s	prouvé
5	45km/h	Infini	25	244396	42.36 s	Contre-exemple

FIGURE 5.7 – Les résultats de vérification étudiés dans le cadre du projet SafePlatoon pour l'approche locale (vitesse maximale)

Dans ces résultats, le temps d'exécution est donné à titre indicatif. En effet, ces vérifications

étant faites sur la ferme de calcul mise à disposition, dans le cadre du projet SafePlatoon, par l'IRSTEA, il n'est pas possible de savoir si le processus de vérification était le seul à fonctionner sur la machine.

5.4 Conclusion

La vérification est une étape particulièrement importante pour s'assurer que le système final respecte un certain nombre de propriétés. De plus, l'étape de vérification peut également servir à donner les limites d'utilisation du système relativement à la validation de ces propriétés. La principale difficulté de l'étape de vérification est la formalisation des propriétés à vérifier et la traduction dans le langage SAL de l'approche développée. Cette traduction doit, de plus, respecter les contraintes imposées par SAL comme l'impossibilité d'utiliser des fonctions mathématiques non linéaires ce qui est particulièrement délicat dans le cadre de systèmes physiques. Actuellement, dans le cadre du projet SafePlatoon, nous sommes en train d'appliquer cette démarche de vérification à une approche de conduite en convoi de type globale décentralisée. D'autre part, nous nous intéressons à l'application de la vérification à d'autres types de modèle agent. Par exemple, nous envisageons d'utiliser la vérification pour mettre en évidence des propriétés de l'approche d'évitement d'obstacle que nous avons développée. Dans ce cas, il sera certainement nécessaire de passer à une méthode de vérification par abstraction.

Certains travaux exposés dans ce chapitre sont détaillés dans les publications suivantes : (EL ZAHER et al. 2012b) et (CONTET et al. 2010a) présentées dans le document annexe.

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Bilan

Ce mémoire est le résultat de mon parcours de recherche durant lequel nous avons abordé les thématiques de la résolution de problème et de la prise de décision grâce à des modèles multi-agents réactifs utilisant des interactions inspirées de la Physique. Étant donné que nous nous sommes placés dans le paradigme réactif, nous nous sommes naturellement focalisés sur la définition, la conception et l'évaluation des modèles d'interaction ainsi que du modèle de l'environnement. Nous nous sommes également attachés à étudier leurs rôles respectifs dans l'obtention de phénomènes émergents. De plus, étant donné que nous nous avons principalement traité des applications réelles concrètes, nous avons mis en place une démarche de conception et de mise en œuvre incluant également des étapes de validation par la simulation et l'expérimentation, et de vérification formelle de propriétés. Nos contributions peuvent être synthétisées de la façon suivante :

- Nos travaux sur **rôle de l'environnement** dans le cadre de la résolution de problèmes et de la prise de décision ont permis de développer un certains nombre de principes de conception. Ceux-ci permettent d'envisager d'utiliser l'environnement comme élément actif du processus de décision ou de résolution faisant le lien entre l'espace d'état du problème et l'espace d'état des solutions. Les agents servent alors à parcourir l'espace des solutions en intégrant les contraintes et les propriétés désirées pour la solution ou la décision. L'application de cette méthode à des cas réels a permis de mettre en évidence les propriétés d'adaptabilité du système aux variations dynamiques des problèmes traités.
- Nos travaux sur **les modèles d'interaction d'inspiration physique** ont permis de montrer que l'utilisation de l'inspiration physique permet d'obtenir des comportements des agents et du système en adéquation avec les contraintes du problème réel traité. L'utilisation de ces modèles nous a également permis d'étudier et de prouver des propriétés telles que la stabilité de la réponse du système par exemple.
- Les travaux réalisés sur **la caractérisation et la mesure des propriétés émergentes** ont permis de développer deux approches pour construire des indicateurs globaux s'appuyant sur la prise en compte des mécanismes locaux d'interaction. Le première d'entre elles, basée sur la notion d'énergie, a été utilisée dans le cadre de la simulation de piétons et la seconde, basée sur la fonction de partition de la thermodynamique, a été notamment utilisée dans le cadre de l'évitement d'obstacle.
- Enfin, nos travaux sur **la vérification** se sont révélés complémentaires aux validations expérimentales et aux simulations que nous avons réalisées. Dans le cadre de la conduite en convoi, la vérification a permis de mettre en évidence les limites quantitatives de notre approche en terme de nombre de véhicules et de rayon de courbure.

6.2 Perspectives

Les thématiques de la résolution de problèmes et de la prise de décision sont continuellement alimentées par des problèmes réels pouvant être traités par nos approches. Aborder de nouvelles familles de problèmes permet à la fois de renforcer ou de réfuter les hypothèses posées lors de précédents travaux de façon à consolider les approches proposées. Les paragraphes suivants exposent les perspectives de nos travaux à la fois du point de vue théorique et du point de vue applicatif.

6.2.1 Point de vue théorique

Vers un mécanisme multi-agent de prise de décision

Le modèle spécifique de l'environnement que nous avons développé permet de considérer le processus de résolution comme la recherche par les agents d'une solution optimisant une fonction définie (Calcul de l'énergie, de l'entropie,...) dans l'espace d'états du problème à résoudre. D'une certaine manière, l'interprétation des caractéristiques de cette fonction à optimiser peut être assimilée à une prise de décision. En effet, il s'agit de trouver dans l'espace des solutions possibles celle qui satisfait le mieux un ou plusieurs critères. Il s'agit maintenant de formaliser et de généraliser ce mécanisme de décision agent de façon à pouvoir le comparer avec d'autres types de modèles tels que les réseaux de neurones, la logique floue,... Pour cela, nous envisageons de formaliser davantage le processus avant de le tester sur d'autres familles d'application pour lesquels, par exemple, les dimensions de l'espace d'état du problème et de l'espace des solutions sont différentes.

Vers une physique des systèmes multi-agent

Pour le moment, les modèles que nous avons développés reposent sur une seule fonction d'évaluation des phénomènes émergents. Grâce à la fonction de partition, il est possible de construire plusieurs fonctions correspondant chacune à un aspect de l'évolution du système. Ces fonctions correspondent toutes à des fonctions d'états dont la valeur ne dépend pas de la trajectoire du système dans l'espace d'état. Or, dans certain cas, il semble intéressant de prendre en compte l'évolution du système, en particulier pour la prise de décision. Pour cela, il est nécessaire de construire des variables d'états à l'instar de celles utilisées dans les systèmes thermodynamiques en plus des fonctions d'états classiquement utilisées. Ceci permettrait de caractériser les transformations subies par le système et d'exploiter cette connaissance à la fois pour la conception de SMA et pour leur exploitation applicative. Pour cela, nous envisageons, dans un premier temps, de trouver des correspondants satisfaisants aux grandeurs telles que la pression P , la température T , et le volume V classiquement utilisées en thermodynamique.

Vers une modélisation de systèmes complexes multi-niveaux

Les systèmes complexes peuvent être considérés comme un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction. Dans le cadre d'un système multi-niveaux, les mécanismes d'interactions peuvent alors impliquer des entités d'un même niveau mais également des entités de niveaux différents. De plus, parmi ces entités, certaines peuvent être décrites selon plusieurs niveaux d'abstraction en fonction du point de vue adopté. Dans ce contexte, la modélisation de ces relations, liant des aspects microscopiques d'une part et des aspects macroscopiques d'autre part, est particulièrement intéressante dans un cadre agent. Les travaux que nous avons menés sur les indicateurs globaux prenant en compte les mécanismes locaux d'interaction ont permis de mettre en évidence l'importance du lien micro/macro dans l'émergence des propriétés globales du système. Nous envisageons d'utiliser le paradigme agent pour modéliser et simuler des systèmes comprenant de tels aspects. Parmi les systèmes que nous envisageons d'étudier, nous pouvons citer les réseaux électriques intelligents (smartgrid) et les systèmes de type pile à combustible.

6.2.2 Point de vue applicatif

Convoi de véhicules

Pour la conduite en convoi, plusieurs pistes se dégagent pour améliorer les résultats obtenus par les approches classiques locales et globales. Comme énoncé précédemment, les approches locales montrent une précision de suivi perfectible notamment pour certaines configurations de courbes. Cependant, leur principal intérêt réside dans la simplicité des solutions de perception à mettre en œuvre. A l'opposé, les approches globales, si elles sont plus précises, requièrent des moyens de communication fiables de façon à transmettre à tous les véhicules la trajectoire de référence. La première idée que nous voulons développer est la mise en place d'un mécanisme de fusion pour combiner les deux approches. Cette fusion peut prendre plusieurs formes telles que :

- Le passage de l'approche globale à l'approche locale en cas de défaillance des communications par une fonction de transition possédant de "bonnes" propriétés mathématiques.
- L'utilisation conjointe des deux méthodes avec une prépondérance variable en fonction de la configuration de la trajectoire et de la qualité des perceptions. Le calcul de cette prépondérance devra être réalisé par un mécanisme de fusion prenant en compte les caractéristiques de chacune des approches et la configuration courante de l'environnement d'évolution des véhicules.

Dans la continuité de cette seconde piste, nous envisageons également de développer une méthode de conduite en convoi de type "globale localisée" utilisant à la fois nos travaux sur l'approche locale et ceux sur la modification de la perception. Cette approche reposera sur la construction d'un leader virtuel pour chacun des véhicules précédents dans le convoi. Il s'agirait ensuite de fusionner les consignes issues de chacuns des asservissements locaux utilisant les liens mécaniques vers ces références virtuelles. Enfin, dans le cadre des travaux de thèse de Baudouin Dafflon, nous allons nous intéresser aux phases de transitions dans les convois de véhicules. Outre l'étude et la mise en place de solutions pour l'insertion et l'éjection de véhicules, nous nous intéressons également à la problématique de croisement de convois.

Gestion de l'énergie dans les Smartgrid

Dans le cadre des Smartgrid, nous nous focaliserons sur l'application des méthodes que nous avons développées à la gestion de l'énergie à la fois du point de vue du "source management" (Quelles sources choisir à un instant donné compte tenu de la charge du réseau et des contraintes économiques et/ou écologiques imposées ?) et du point de vue du "load management" (Comment gérer la mise en route, l'extinction et le mode de fonctionnement des dispositifs électriques en prenant en compte des contraintes de coûts, de pollution,...?). Dans ce cadre, plusieurs pistes peuvent être explorées.

Dans un premier temps, il semble naturel de considérer chaque source d'un système comme un agent. L'expression des besoins du réseau peut également être formalisée comme un agent dont la masse varie en fonction de la demande. Chacun de ces agents va interagir avec les autres en utilisant des forces de type attraction/répulsion. Les caractéristiques de chacune des sources (soc, capacité, puissance,...) seront utilisées pour définir la masse de chacun des agents. La physique d'interaction sera alors commune à tous les agents. La prise de décision se fera en considérant la configuration spatiale des agents sources relativement à la demande du réseau.

Dans un second temps, il est également possible de considérer chacune des sources comme un pôle d'attraction dans un espace de dimension égal au nombre de sources. La prise de décision se fera alors en évaluant les caractéristiques d'une population d'agents particulaires influencés par la présence des pôles d'attraction.

Modélisation et simulation de systèmes pile à combustible

Les piles à combustible (PAC) représentent une solution pertinente pour la conversion d'énergie permettant de résoudre un certain nombre de problèmes liés aux futurs enjeux énergétiques mondiaux. Son principe réside dans la transformation directe de l'énergie chimique en énergie électrique sans passer par les différentes étapes habituelles de conversion.

Une pile à combustible est composée de divers éléments, en particulier de cellules. Chaque cellule peut être vue à la fois comme un sous-système (point de vue macroscopique) ou comme un ensemble de sous-systèmes (couches) ayant chacun un comportement particulier (point de vue microscopique). Chacun de ces éléments peut également être décomposé en trois sous systèmes en fonction du point de vue physique adopté (Thermique, Fluidique, Electrochimique). Un système PAC possède donc les caractéristiques d'un système complexe multi-niveaux tel que décrit précédemment. Ainsi, la modélisation/simulation de tels systèmes par une approche agent semble particulièrement adaptée. Elle doit permettre de construire un modèle de pile intégrant à la fois ses caractéristiques géométriques et ses comportements multi-physique, tout en prenant en compte les aspects hiérarchiques (points de vue microscopique/macroscopique)

Le principal objectif est alors de proposer, dans un premier temps, un modèle de pile de type PEM à la fois multi-physique et multi-niveau s'appuyant sur le paradigme des SMA. Une fois ce modèle développé, il s'agira ensuite de le tester en simulation de façon à évaluer son efficacité. À travers ce domaine d'application, nous retrouvons, encore une fois, la problématique soulevée par l'étude des relations micro/macro exposées dans nos perspectives de recherche sur les systèmes complexes.

Chapitre 7

Bibliographie

- ADOUANE, Lounis, Romuald AUFRÈRE, Pierre AVANZINI, Guillaume BRESSON, Roland CHA-PUIS, Jean-Pierre DERUTIN, Eric ROYER, Benoit THUILOT, M Vita VENTURA, Baudouin DAFFLON, Madeleine El ZAHER, Franck GECHTER, Maxime GUERIAU, Pablo GRUER, Abderrafiaa KOUKAM, Christophe DEBAIN, Roland LENAIN et Monir BENCHOAIB (2013b). “SafePlatoon : Sûreté de Convois de Véhicules Autonomes”. Dans : *Journées Nationales des Communications dans les Transport (JNCT)*.
- BALCH, T. (2000). “Hierachic Social Entropy : An Information Theoretic Measure of Robot Group Diversity”. Dans : *Autonomous Robots*.
- BALIAN, Roger (2007). *From Microphysics to Macrophysics*. Springer.
- BASIC, Dino, Jean-michel CONTEL et Franck GECHTER (2012a). “Visualisation de données capteurs d'un véhicule intelligent avec une tablette tactile”. Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press*.
- BASSO, Gillian, Nicolas GAUD, Franck GECHTER, Vincent HILAIRE et Fabrice LAURI (2013b). “A Framework for Qualifying and Evaluating Smart Grids Approaches : Focus on Multi-Agent Technologies”. Anglais. Dans : *International Journal of Smart Grid and Renewable Energy*.
- BAUTIN, Antoine, Olivier SIMONIN et François CHARPILLETT (2012a). “Stratégie d'exploration multirobot fondée sur les champs de potentiels arti7;ciels”. Dans : *Revue d'Intelligence Artificielle* 26.5, p. 523–542.
- (2012b). “Stratégie d'exploration multirobot fondée sur les champs de potentiels arti7;ciels”. Dans : *Revue d'Intelligence Artificielle* 26.5, p. 523–542.
- BEDAU, Mark A. (1997). “Weak Emergence”. Dans : *Philosophical Perspectives : Mind, Causation, and World*. Sous la dir. de J. TOMBERLIN. T. 31. In J. Tomberlin, ed., *Philosophical Perspectives : Mind, Causation, and World*, Vol. 11 (Malden, MA : Blackwell, 1997), pp. 375-399. Malden, MA : Blackwell Publishers Inc., p. 375–399. DOI : 10.1111/0029-4624.31.s11.17. URL : <http://dx.doi.org/10.1111/0029-4624.31.s11.17>.
- (2002). “Downward Causation and the Autonomy of Weak Emergence”. Dans : *Principia* 6.1, p. 5–50.
- BELLIFEMINE, Fabio, Agostino POGGI et Giovanni RIMASSA (1999). “JADE - A FIPA-compliant agent framework”. Dans : *Proceedings of the Practical Applications of Intelligent Agents*. URL : <http://jmvidal.cse.sc.edu/library/jade.pdf>.
- BENSALEM, Saddek, Vijay GANESH, Yassine LAKHNECH, César MUÑOZ, Sam OWRE, Harald RUESS, John RUSHBY, Vlad RUSU, Hassen SAÏDI, N. SHANKAR, Eli SINGERMAN et Ashish TIWARI (2000). “An Overview of SAL”. Dans : *LFM 2000 : Fifth NASA Langley Formal Methods Workshop*. Sous la dir. de C. Michael HOLLOWAY, p. 187–196.
- BERNON, Carole, Marie-Pierre GLEIZES, Sylvain PEYRUQUEOU et Gauthier PICARD (2003). “ADELFE : A Methodology for Adaptive Multi-agent Systems Engineering”. Dans : p. 70–81. DOI : 10.1007/3-540-39173-8_12. URL : http://dx.doi.org/10.1007/3-540-39173-8_12.
- BONABEAU, E., M. DORIGO et G. THERAULAZ (1999). *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press.
- BONABEAU, Eric, Jean-Louis DESSALLES et Alain GRUMBACH (1995a). “Characterizing emergent phenomena (1) : a critical review”. Dans : *Revue Internationale de Systémique* 9.3, p. 327–346.

- (1995b). “Characterizing emergent phenomena (2) : a conceptual framework”. Dans : *Revue Internationale de Systémique* 9.3, p. 347–371.
- BOURJOT, C., V. CHEVRIER et V. THOMAS (2002). “How social spiders inspired an approach to region detection”. Dans : *AAMAS*, p. 426–433.
- BRESCIANI, Paolo, Anna PERINI, Paolo GIORGINI, Fausto GIUNCHIGLIA et John MYLOPOULOS (mai 2004). “Tropos : An Agent-Oriented Software Development Methodology”. Dans : *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 8.3, p. 203–236. ISSN : 1387-2532. DOI : 10.1023/B:AGNT.0000018806.20944.ef. URL : <http://dx.doi.org/10.1023/B:AGNT.0000018806.20944.ef>.
- BRUECKNER, S. (2000). *Return from the ant : Synthetic Eco-systems for Manufacturing Control*. Thesis at Humboldt University Berlin, Department of Computer Science, 2000.
- BURRAFATO, Piermarco et Massimo COSENTINO (2002). “Designing a multi-agent solution for a bookstore with the PASSI methodology”. Dans : *AOIS@CAiSE*.
- BUSETTA, Paolo, Ralph RONNQUIST, Andrew HODGSON et Andrew LUCAS (1999). “JACK Intelligent Agents - Components for Intelligent Agents in Java”. Dans : *AgentLink Newsletter* 2.
- CAO, Jianbo, Binggang CAO, Wenzhi CHEN, Peng XU et Xiaolan WU (2007). “Neural network control of electric vehicle based on position-sensorless brushless DC motor”. Dans : *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on*, p. 1900–1905. DOI : 10.1109/ROBIO.2007.4522457.
- CARDON, A. et M. ITMI (2009). “A multi agent modeling approach for an adaptive regulation in large scale complex systems”. Dans : *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, p. 3663–3668. DOI : 10.1109/ICSMC.2009.5346867.
- CHEVRIER, Vincent et Franck GECHTER (2003b). “Une architecture réactive pour la localisation en robotique mobile”. Dans : *Technique et Science Informatiques* 22.4, p. 345–358.
- COLORNI, A., M. DORIGO et V. MANIEZZO (1991). “Distributed Optimization by Ant Colonies”. Dans : *proceedings of ECAL91, European conference on artificial life, Paris*, p. 134–142.
- CONTET, Jean-michel (déc. 2010). *Modèles Multi-agents Réactifs Pour La Navigation Multi-Véhicules : Spécification Formelle et Vérification*. Editions Universitaires Européennes. ISBN : 9786131552595.
- CONTET, Jean-michel, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2006b). “Multiagent system model for vehicle platooning with merge and split capabilities”. Anglais. Dans : *the 3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents – ICARA*. Palmerston North, New Zealand, p. 41–46.
- (2007b). “Application of reactive multiagent system to linear vehicle platoon”. Dans : *In 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence – ICTAI’2007*. Volume 2, Grèce, Patras, october 29-31. IEEE Computer Society, p. 67–70.
- (2007d). “Physics inspired multiagent system for vehicle platooning”. Anglais. Dans : *International conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), IFAAMAS*. Honolulu, Hawaï USA, p. 349–351.
- (2008b). “Evaluation of global system state thanks to local phenomenona”. Anglais. Dans : *Biennial European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*. Grèce, Patras, june 21-27.
- (2009b). “Bending Virtual Spring-Damper : A Solution to Improve Local Platoon Control”. Anglais. Dans : *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) Vol. 5544, paper from the International Conference on Computational Science 2009 (ICCS 2009), Baton Rouge, Louisiana, U.S.A*. Springer Verlag.
- CONTET, Jean-michel, Franck GECHTER et Pablo GRUER (2009c). “Mécanisme décisionnel basé sur la mesure de l’organisation d’un SMA : application à l’évitement d’obstacles”. Dans :

Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents – JFSMA’2009. Hermes Lavoisier Editions.

- CONTET, Jean-michel, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2010a). “An Approach to Compositional Verification of Reactive Multiagent Systems”. Anglais. Dans : *Working Notes of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Workshop on Model Checking and Artificial Intelligence*.
- (2011a). “Reactive Multi-agent approach to local platoon control : stability analysis and experimentations.” Dans : *International Journal of Intelligent Systems Technologies And Application*. DOI : <http://dx.doi.org/10.1504/IJISTA.2011.040348>.
- CONTET, Jean-michel, Franck GECHTER et Ludovic LEFOULON (2013a). “Autonomous emergent painting triggered by music and motion”. Dans : *International Journal of Arts and Technology*.
- COSSENTINO, Massimo, Nicolas GAUD, Vincent HILAIRE, Stéphane GALLAND et Abderrafiaa KOUKAM (2010). “ASPECS : an agent-oriented software process for engineering complex systems”. English. Dans : *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 20.2, p. 260–304. ISSN : 1387-2532. DOI : [10.1007/s10458-009-9099-4](https://doi.org/10.1007/s10458-009-9099-4). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s10458-009-9099-4>.
- DAFFLON, Baudouin, Franck GECHTER, Jean-michel CONTET, Abdeljalil ABBAS TURKI et Pablo GRUER (2011a). “Intelligent crossroads for vehicle platoons reconfiguration”. Dans : *Lecture Notes in Computer Science/Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNCS/LNAI) Vol. 6943 paper from the International Conference on Adaptive and Intelligent Systems ICAIS 2011, Klagenfurt, Austria*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- DAFFLON, Baudouin, Jean-michel CONTET, Franck GECHTER et Pablo GRUER (2012b). “Toward a reactive agent based parking assistance system”. Dans : *International Conference on Tools with Artificial Intelligence*.
- DAFFLON, Baudouin, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (juil. 2013b). “A layered multi-agent model for multi-configuration platoon control”. Anglais. Dans : *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*.
- (sept. 2013d). “Vehicle platoon and obstacle avoidance : a reactive agent approach”. Anglais. Dans : *IET Intelligent Transport Systems* 3, 257–264(7). ISSN : 1751-956X.
- DE WOLF, Tom et Tom HOLVOET (2005). “Emergence versus self-organisation : different concepts but promising when combined”. Dans : *Engineering Self Organising Systems : Methodologies and Applications, Lecture Notes in Computer Science* 3464, p. 1–15. URL : <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/166791>.
- DELLAERT, F., D. FOX, W. BURGARD et S. THRUN (1999). “Monte carlo localization for mobile robots”. Dans : *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- DESSALLES, Jean-Louis, Jacques FERBER et Denis PHAN (2008). “Emergence in Agent based Computational Social Science : Conceptual, Formal and Diagrammatic Analysis”. Anglais. Dans : *Intelligent Complex Adaptative Systems*, p. 24. ISBN : 978-1-59904-717-1. URL : <http://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00344351>.
- DiMARZO-SERUGENDO, G., A. KARAGEORGOS, O.F. RANA et F. ZAMBONELLI (2004). *Engineering Self-Organising Systems : Nature-Inspired Approaches to Software Engineering*. Lecture notes in Artificial intelligence, number 2977 ISBN-3540212019.
- DORIGO, M., G. Di CARO et L.M. GAMBARDELLA (1999). “Ant Algorithms for Discrete Optimization”. Dans : *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*.
- DROGOUL, A. (1993). *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.

- DROGOUL, A., J. FERBER et E. JACOPIN (1991). "Pengi : Applying Eco-Problem Solving for Behavior Modeling in an Abstract Eco-System". Dans : *European Simulation Multiconference*. Sous la dir. d'E. MOSEKILDE, p. 337–342.
- EL-ZAHER, Madeleine (nov. 2013). *Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification*. Ecole Doctorale SPIM.
- EL ZAHER, Madeleine, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Mohammad HAJJAR (2011b). "A new linear platoon model based on reactive multi-agent systems". Dans : *The 23rd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI*. IEEE Computer Society.
- EL ZAHER, Madeleine, Franck GECHTER et Pablo GRUER (2011d). "Convoi de véhicule pour une nouvelle forme de mobilité". Dans : *In Proc. of 1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (Ingedoc 2011)*.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTEL, Franck GECHTER et Pablo GRUER (2011f). "Reconfigurable and adaptable urban transportation systems : the platoon solution". Dans : *the Institution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11), Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghai, China*. Shanghai University Press. ISBN : 978-1-84919-326-9.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTEL, Pablo GRUER et Franck GECHTER (2011h). "Towards a compositional verification approach for multi-agent systems : Application to Platoon system". Dans : *First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for complex systems (V2CS)*.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTEL, Pablo GRUER, Franck GECHTER et Abderrafiaa KOUKAM (2012a). "Compositional verification for reactive multi-agent systems applied to Platoon non collision verification". Dans : *Studia Informatica Universalis*.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTEL, Franck GECHTER et Abderrafiaa KOUKAM (2012c). "Echelon platoon organisation : a distributed approach based on 2-spring virtual links". Dans : *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 7557 papers from the 15th International Conference on Artificial Intelligence : Methodology, Systems, Applications (AIMSA)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33185-5\string_28.
- EL ZAHER, Madeleine, Baudouin DAFFLON, Jean-michel CONTEL et Franck GECHTER (2012e). "Vehicle platoon control with multi-configuration ability". Dans : *Procedia Computer Science CS 9*, p. 1503–1512.
- ELKAIM, Gabriel H. et Robert J. KELBLEY (2006). "Control architecture for segmented trajectory following of a wind-propelled autonomous catamaran". Dans : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.
- ENCARNACAO, P. et A. PASCOAL (2001). "Combined trajectory tracking and path following : an application to the coordinated control of autonomous marine craft". Dans : *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*. T. 1, 964–969 vol.1. DOI : [10.1109/2001.980234](https://doi.org/10.1109/2001.980234).
- FAN, Bo, Jixin PU et Gang LIU (2009). "Multi-agent Decision Making Based on Evidence Reasoning". Dans : *Artificial Intelligence, 2009. JCAI '09. International Joint Conference on*, p. 70–73. DOI : [10.1109/JCAI.2009.23](https://doi.org/10.1109/JCAI.2009.23).
- FERBER, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents, Vers une intelligence collective, InterEditions, or Multi-Agent Systems, an introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, 1999.
- FERBER, J. et E. Jacopin E (1991). "The framework of ECO-problem solving". Dans : *in Decentralized AI 2*. North-Holland, Yves Demazeau et Jean-Pierre Muller Eds.

- FINTZEL, K., R. BENDAHAN, C. VESTRI, S. BOUGNOUX et T. KAKINAMI (2004). "3D parking assistant system". Dans : *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE*, p. 881–886. DOI : 10.1109/IVS.2004.1336501.
- Fox, D., W. BURGARD, F. DELLAERT et S. THRUN (1999). "Monte carlo localization : Efficient position estimation for mobile robots". Dans : *In Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, Orlando, Floride*.
- (2000). "Particle filters for mobile robot localization". Dans : *Sequential Monte Carlo Methods in Practice Springer Verlag, New York*.
- FRANÇOIS, Etienne, Etienne THUILLIER, Gillian BASSO et Franck GECHTER (2012b). "Gestion Intelligente d'un réseau électrique par un système multi-agent". Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press*,
- GALLAND, Stéphane, Nicolas GAUD, Jonathan DEMANGE et Abderrafiaa KOUKAM (déc. 2009). "Environment Model for Multiagent-Based Simulation of 3D Urban Systems". Dans : *the 7th European Workshop on Multiagent Systems (EUMAS09)*. Paper 36. Ayia Napa, Cyprus.
- GAUD, Nicolas, Franck GECHTER, Stéphane GALLAND et Abderrafiaa KOUKAM (2007a). "Holonic multiagent multilevel simulation : Application to real-time pedestrians simulation in urban environment". Dans : *the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'07)*. Hyderabad India, p. 1275–1280.
- GAUD, Nicolas, Stéphane GALLAND, Franck GECHTER, Vincent HILAIRE et Abderrafiaa KOUKAM (2008a). "Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment". Dans : *Simulation Modelling Practice and Theory* 16.10, p. 1659–1676. DOI : 10.1016/j.smpat.2008.08.015.
- GECHTER, Franck (2002). "Une méthode de localisation d'un robot mobile utilisant une approche multi-agents pour la fusion de données". Dans : *15eme Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique - JJCR 2002*.
- (2011). "Modèle multi-agent réactif pour la fusion de percepts Application à la localisation et au suivi en robotique mobile Informatique," dans : Editions Universitaires Européennes. ISBN : 978-613-1-56427-7.
- GECHTER, Franck et François CHARPILLET (2000). "Vision Based Localisation for a Mobile Robot". Dans : *International Conference on tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*.
- GECHTER, Franck, Vincent THOMAS et François CHARPILLET (2001a). "Localization by Stochastic Vision Based Device". Dans : *In The 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics - SCI 2001 – The 7th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis - ISAS 2001*.
- GECHTER, Franck et François CHARPILLET (2001b). "Markov Based Localization Device for a Mobile Robot." Dans : *Robotics and Automation in Space : A New Space Odyssey - i-SAIRAS 2001*.
- GECHTER, Franck, Vincent THOMAS et François CHARPILLET (2001c). "Utilisation d'un module de vision stochastique pour localiser un robot mobile." Dans : *Troisièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique - JNRR'2001*.
- GECHTER, Franck, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2003). "Une architecture réactive pour la localisation en robotique mobile." Dans : *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents - JFSMA'2003*. Hermès Lavoisier Editions.
- (2004a). "A Reactive Multi-Agent System for Localization and Tracking in Mobile Robotics". Dans : *In 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence - ICTAI'2004*.
- (2004b). "Localizing and Tracking Targets with a Reactive Multi-Agent System". Dans : *Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems - AAMAS'04*.

- (2004c). “Localizing and Tracking Targets with a Reactive Multi-Agent System (Extended version of AAMAS 2004)”. Dans : *Second European Workshop on Multi-Agent Systems - EUMAS'04*.
- (2004d). “Un modèle de résolution de problèmes utilisant des agents réactifs pour la localisation et le suivi.” Dans : *Revue d'intelligence artificielle (RSTI-RIA)* 18.5-6, p. 743–777.
- GECHTER, Franck et Olivier SIMONIN (2005). “Conception de SMA réactifs pour la résolution de problèmes :Une approche basée sur l'environnement”. Dans : *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents - JFSMA '2005*. Hermes Lavoisier Editions.
- GECHTER, Franck, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2006). “A Reactive Agent-Based Problem-Solving Model : Application to Localization and Tracking”. Dans : *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (ACM TAAS)* 1.2, p. 189–222.
- GECHTER, Franck, Jean-michel CONTEL, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2010). “Car-driving assistance using organization measurement of reactive multi-agent system”. Dans : *Procedia Computer Science CS*, p. 317–325.
- (2011a). “A reactive agent based vehicle platoon algorithm with integrated obstacle avoidance ability”. Dans : *Fifth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems SASO 2011*. DOI : <http://doi.ieee.org/10.1109/SASO.2011.24>.
- GECHTER, Franck et Stéphane GALLAND (2011b). “Interactive Whiteboard for Collaborative Work - A Multiagent-based Solution”. Dans : *the 3rd International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2011)*. Noordwijkerhout, Netherlands : SciTePress, p. 270–278. ISBN : 978-989-8425-49-2.
- GECHTER, Franck, Jean-michel CONTEL, Olivier LAMOTTE, Stéphane GALLAND et Abderrafiaa KOUKAM (2012). “Virtual Intelligent Vehicle Urban Simulator : Application to Vehicle Platoon Evaluation”. Dans : *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)* 24, p. 103–114. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.simp.2012.02.001>.
- GECHTER, Franck, David BOUQUAIN, Fei GAO, Abderrafiaa KOUKAM et Abdellatif MIRAOUI (2013). “A Multiagent Model for PEM-Fuel Cell Microscopic Simulation”. Dans : *The European Control Conference ECC13*.
- GIORDANO, D. (1998). “Equivalence of energy, entropy, and thermodynamic potentials in relation to the thermodynamic equilibrium of multitemperature gas mixtures”. English. Dans : *Physical Review E. Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* 58.3-A. Equivalence of energy ;Thermodynamic equilibrium ;Multitemperature gas mixtures ; p. 3098 –3112. ISSN : 1063-651X. URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.58.3098>.
- GRÉGOIRE, Pichard, Martin GEOFFROY, Jean-michel CONTEL, Baudouin DAFFLON et Franck GECHTER (2012b). “Système multi-agents d'évitement d'obstacles”. Dans : *Journée des jeunes chercheurs de l'UTBM (IngéDoc'2012), Belfort, France, 2012, dec 2012*.
- GRUMBERG, Orna et David E. LONG (1991). “Model Checking and Modular Verification”. Dans : *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 16.
- HASSINI, N. et S. ZOUAIRI (2011). “Bayesian decision-making for industrial production facilities and processing”. Dans : *Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), 2011 Saudi International*, p. 1–6. DOI : [10.1109/SIECPC.2011.5876973](https://doi.org/10.1109/SIECPC.2011.5876973).
- HILAIRE, Vincent, Abder KOUKAM, Pablo GRUER et Jean pierre MÜLLER (2001). “Formal Specification and Prototyping of Multi-Agent Systems”. Dans : *IN ESAW '00 : PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENGINEERING SOCIETIES IN THE AGENT WORLD, Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI 1972*. Springer Verlag, p. 114–127.
- HILAIRE, Vincent, Massimo COSSENTINO, Franck GECHTER, Sebastian RODRIGUEZ et Abderrafiaa KOUKAM (2013b). “An approach for the integration of swarm intelligence in MAS : an

- engineering perspective". Dans : *Expert Systems with Applications* 40.4, p. 1323–1332. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.058>.
- HONGQIAO, Yang, Liu XIHUA, Wu FEI et Li WEIZI (2009). "Multi-agent based modeling and simulation of complex system in hospital". Dans : *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IE EM '09. 16th International Conference on*, p. 1759–1763. DOI : <10.1109/ICIEEM.2009.5344312>.
- HOPPE, H. Ulrich, W. LUTHER, Martin MÜHLENBROCK, W. OTTEN et Frank TEWISSEN (1999). "Interactive Presentation Support for an Electronic Lecture Hall - a practice report". Dans : *Advanced Research in Computers and Communications in Education*, p. 923–930. URL : <http://www.collide.info/Members/admin/publications/ICCE99\Hoppe\etal.pdf>.
- HUE, C., J-P. Le CADRE et P. PEREZ (2000). "Tracking Multiple Objects with Particle Filtering". Dans : *Technical Report, INRIA*.
- JUNG, Ho Gi, Chi Gun CHOI, Dong Suk KIM et Pal Joo YOON (2006). "System configuration of intelligent parking assistant system". Dans : *13 th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*.
- JUNG, Ho Gi, Dong Suk KIM, Pal Joo YOON et Jaihie KIM (2007). "Light stripe projection based parking space detection for intelligent parking assist system". Dans : *In : Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium*.
- KANAMORI, R., J. TAKAHASHI et T. ITO (2012). "Evaluation of anticipatory stigmergy strategies for traffic management". Dans : *Vehicular Networking Conference (VNC), 2012 IEEE*, p. 33–39. DOI : <10.1109/VNC.2012.6407442>.
- KODAGODA, K.R.S., W.S. WIJESOMA et E.K. TEOH (2002). "Fuzzy speed and steering control of an AGV". English. Dans : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 10.1. Proportional integral derivative (PID) controllers ; p. 112 –120. ISSN : 1063-6536. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/87.974344>.
- KOMIS, Vassilis, Nikolaos AVOURIS et Christos FIDAS (juin 2002). "Computer-Supported Collaborative Concept Mapping : Study of Synchronous Peer Interaction". Dans : *Education and Information Technologies* 7.2, p. 169–188. ISSN : 1360-2357. DOI : <10.1023/A:1020309927987>. URL : <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020309927987>.
- KOREN, Y. et J. BORENSTEIN (1991). "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation". Dans : *IEEE Conference on Robotics and Automation*, p. 1398–1404.
- KULLBACK, S (1959). *Information Theory and Statistics*. Sous la dir. de WILEY.
- LAMOTTE, Olivier, Stéphane GALLAND, Jean-michel CONTEL et Franck GECHTER (2010a). "Submicroscopic and Physics Simulation of Autonomous and Intelligent Vehicles in Virtual Reality". Dans : *2nd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL10)*. Nice, France : IEEE CPS.
- LATOMBE, J-C. (1991). *Robot Motion Planning*. Boston, MA : Kluwer academic publishers.
- LEE, G.D. et S.W. KIM (2002). "A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm". English. Dans : *Mechatronics* 12.1. Control algorithms ; p. 97 –118. ISSN : 0957-4158. URL : [http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158\(00\)00063-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158(00)00063-5).
- LEE, Hyeongcheol et Masayoshi TOMIZUKA (2003). "Adaptive vehicle traction force control for intelligent vehicle highway systems (IVHSs)". English. Dans : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 50.1, p. 37 –47. ISSN : 0278-0046. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2002.807677>.
- LOZENGUEZ, Guillaume, Lounis ADOUANE, Aurélie BEYNIER, Abdel-Illah MOUADDIB et Philippe MARTINET (2011). "Calcul distribué de politiques d'exploration pour une flotte de robots mobiles". Dans : *JFSMA*, p. 117–126.
- LYAPUNOV, A. M. (1992). *The general problem of the stability of the motion*. Taylor & Francis.

- MA, Wanjing et Xiaoguang YANG (2007). "A Passive Transit Signal Priority Approach for Bus Rapid Transit System". Dans : *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, p. 413–418. DOI : 10.1109/ITSC.2007.4357625.
- MASOUD, Samer A. et Ahmad A. MASOUD (2000). *Constrained Motion Control Using Vector Potential Fields*.
- MATKO, Drago, Gregor KLANCAR, Saso BLAZIC, Franck GECHTER, Olivier SIMONIN, Jean-michel CONTEL et Pablo GRUER (2008b). "Control Strategy for Wheeled Mobile Robots Platoons". Dans : *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Funchal, Madeira, Portugal May 2008. INSTICC Press, p. 145–150.
- MATSUDA, S. (2006). "A Neural Network Model for the Decision-Making Process Based on ANP". Dans : *Neural Networks, 2006. IJCNN '06. International Joint Conference on*, p. 1421–1426. DOI : 10.1109/IJCNN.2006.246860.
- MEMMI, Daniel (1996). "Emergence et niveaux d'explication". Dans :
- MILLER, Alan J. (1963). *A Computer control system for traffic networks / Alan J. Miller*. English. University of Birmingham, Graduate School in Highway et Traffic Engineering Birmingham, England, 45 p.;
- MINGUEZ, Javier, Associate MEMBER et Luis MONTANO (2004). "Nearness Diagram (ND) Navigation : Collision Avoidance in Troublesome Scenarios". Dans : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 20, p. 2004.
- MONCION, T., Patrick AMAR et Guillaume HUTZLER (2010). "Automatic characterization of emergent phenomena in complex systems". English. Dans : *Journal of Biological Physics and Chemistry* 10, p. 16–23. URL : <http://hal.inria.fr/hal-00644627>.
- MOUJAHED, Sana, Olivier SIMONIN et Abderrafiaa KOUKAM (2009). "Location problems optimization by a self-organizing multiagent approach". Dans : *Multiagent and Grid Systems* 5.1, p. 59–74.
- MRJEAN (1997). "Emergence et SMA". Dans : *JFIADSMA*. Nice, p. 323–342.
- MUKHOPADHYAY, S. et Haiying WANG (1999). "Distributed decomposition architectures for neural decision-makers". Dans : *Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on*. T. 3, 2635–2640 vol.3. DOI : 10.1109/CDC.1999.831326.
- MULLER, J-P. (1998). "Vers une methodologie de conception de systemes multi-agents de resolution de probleme par emergence". Dans : *JFIADSMA '98*, p. 355–371.
- MURA, G. (2011). "The Open Metaplastic Platform for Cyber Art". Dans : *Cyberworlds (CW), 2011 International Conference on*, p. 173–180. DOI : 10.1109/CW.2011.42.
- NAGEL, Ernst (1961). *The structure of Science*. New York : Ed. Harcourt Brace World.
- NAIM, S. et H. HAGRAS (2012). "A hybrid approach for Multi-Criteria Group Decision Making based on interval type-2 fuzzy logic and Intuitionistic Fuzzy evaluation". Dans : *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2012 IEEE International Conference on*, p. 1–8. DOI : 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251212.
- NIETO, Alexis, David VIAL et Franck GECHTER (2012a). "Visualisation d'un train de véhicules hybride (réel/virtuel) en réalité augmentée". Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l'UTBM (IngéDoc 2012), Doceo, UTBM, UTBM Press*.
- NOGUEIRA, Sergio, Franck GECHTER, Yassine RUCHEK, Abderrafiaa KOUKAM et François CHARPILLET (2005b). "Perception environment for vehicle autonomous navigation". Dans : *The Biennial on DSP for In-Vehicle and Mobile Systems*.
- (2006b). "Environment perception for vehicle autonomous navigation in urban areas". Dans : *Digital Signal Processing for In-Vehicle and Mobile Systems II*. Springer-Verlag Ed., p. ,
- NOGUEIRA, Sergio, Yassine RUCHEK, Franck GECHTER, Abderrafiaa KOUKAM et François CHARPILLET (2007b). "An artificial vision based environment perception system". Dans : *Advances for In-Vehicle and Mobile Systems - Challenges for International Standards*. Sous

- la dir. d'Huseyin ABUT, John h. L. HANSEN et Kazuya TAKEDA. Springer. Chap. 4. ISBN : 978-0-387-33503-2.
- NOGUEIRA, Sergio, Jean-michel CONTET, Yassine RUICHEK et Franck GECHTER (2007d). "WiFi based remote control system with video feedback for intelligent vehicle". Dans : *The Biennial on Digital Signal Processing for In-Vehicle and Mobile Systems*. Istanbul, Turkey.
- NWANA, Hyacinth S., Divine T. NDUMU, Lyndon C. LEE et Martlesham HEATH (1998). "ZEUS : An Advanced Tool-Kit for Engineering Distributed Multi-Agent Systems". Dans : *PAAM*, p. 377–391.
- PAPAGEORGIOU, M., C. DIAKAKI, V. DINOPOULOU, A. KOTSIALOS et Yibing WANG (2003). "Review of road traffic control strategies". Dans : *Proceedings of the IEEE* 91.12, p. 2043–2067. ISSN : 0018-9219. DOI : 10.1109/JPROC.2003.819610.
- PARASURAMAN, S., V. GANAPATHY et B. SHIRINZADEH (2003). "Fuzzy decision mechanism combined with neuro-fuzzy controller for behavior based robot navigation". Dans : *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*. T. 3, 2410–2416 Vol.3. DOI : 10.1109/IECON.2003.1280622.
- PARK, Wan-Joo, Byung-Sung KIM, Dong-Eun SEO, Dong-Suk KIM et Kuae-Hi LEE (2008). "Parking space detection using ultrasonic sensor in parking assistance system". Dans : *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, p. 1039–1044. DOI : 10.1109/IVS.2008.4621296.
- PARUNAK, H.V.D. (1997). "Go to the Ant : Engineering Principles from Natural Agent Systems". Dans : *Annals of Operations Research*.
- PARUNAK, H.V.D. et S. BRUECKNER (2001). "Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems". Dans : *International Conference on Autonomous Agents*.
- PETROV, Plamen (2008). "A mathematical model for control of an autonomous vehicle convoy". Dans : *Lateral (steering)* 5, p. 8.
- PIKE, Lee (2007). "Model checking for the practical verificationist : a user's perspective on SAL". Dans : *Automated Software Engineering*.
- RAMOS, V. et F. ALMEIDA (2000). "Artificial Ant Colonies in Digital Image Habitats. A Mass Behaviour Effect Study on Pattern Recognition". Dans : *ANTS'2000*, p. 113–116.
- REYNOLDS, C.W. (1987). "Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model, in Computer Graphics". Dans : *SIGGRAPH Conference Proceedings*, p. 25–34.
- RUSSELL, Stuart J. et Peter NORVIG (2010). *Artificial Intelligence - A Modern Approach* (3. internat. ed.) Pearson Education, p. I–XVIII, 1–1132. ISBN : 978-0-13-207148-2.
- SAFEPLATOON, Madeleine EL-ZAHER, Baudouin DAFFLON, Jean-Michel CONTET, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2013). *Livrable D32 : Résultats de vérification : cas des approches locales*. Projet ANR VTT SafePlatoon.
- SCHEUER., A. (1998). "Planification de chemins à courbure continue pour robot mobile non holonome". Thèse de doct. Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- SCHNEIDER, D. K. (1994). *Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle*. Thèse de l'Unité Technologie de Formation et Apprentissage - Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education - Université de Genève.
- SHANNON, C.E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication". Dans : *The Bell System Technical Journal* 27, p. 379–423 623–656.
- SIMMONS, Reid (1996). "The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance". Dans : *In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3375–3382.
- SIMONIN, O. (2000). "Modeling Self Satisfaction and Altruism to handle Action Selection and Reactive Cooperation". Dans : *proceedings Supplement SAB 2000, The Sixth International Conference on the Simulation of Adaptative Behavior FROM ANIMALS TO ANIMATS 6 (Paris, France)*, p. 314–323.

- SIMONIN, O. et J. FERBER (2001). "Modélisation des satisfactions personnelle et interactive d'agents situés coopératifs". Dans : *JFIADSMA '2001, 9eme journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents*. Montreal.
- SIMONIN, Olivier et Franck GECHTER (2005a). "An environment-based principle to design reactive multi-agent systems for problem solving". Dans : *Environments for Multi-Agent Systems E4MAS (AAMAS 2005 Workshop)*.
- (2006a). "An Environment-Based Methodology to Design Reactive Multi-agent Systems for Problem Solving". Dans : *(Lecture Notes in Artificial Intelligence) LNAI Vol. 3830 : Environment for Multiagent Systems II (revised and selected papers of Environment for Multi Agent Systems (E4MAS) 2005)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 32–49.
- SMITH, Graeme et Luke WILDMAN (2005). *Model Checking Z Specifications Using SAL*. Springer Berlin, Heidelberg.
- STIRLING, W. (1991). "A model for multiple agent decision making". Dans : *Systems, Man, and Cybernetics, 1991. 'Decision Aiding for Complex Systems, Conference Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, 2073–2078 vol.3. DOI : 10.1109/ICSMC.1991.169981.
- SUHR, Jae Kyu, Ho Gi JUNG, Kwanghyuk BAE et Jaihie KIM (fév. 2010). "Automatic free parking space detection by using motion stereo-based 3D reconstruction". Dans : *Mach. Vision Appl.* 21.2, p. 163–176. ISSN : 0932-8092. DOI : 10.1007/s00138-008-0156-9. URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-008-0156-9>.
- TAN, Kar han (1997). "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robot control". Dans : *Autonomous Robots* 4, p. 387–403.
- TECCHIA, F., C. LOSCOS, R. CONRY et Y. CHRYSANTHOU (2001). "Agent Behaviour Simulator (ABS) : A Platform for Urban Behaviour Development". Dans : *GTEC'2001*.
- TELES, L.F. et A.S. ZIM (2009). "Digital inclusion and Cyberart : The case of project Projea transiarte tube". Dans : *Innovations for Digital Inclusions, 2009. K-IDI 2009. ITU-T Kaleidoscope* : p. 1–7.
- THARAKUNNEL, K. et S. BHATTACHARYYA (2007). "Leader-Follower semi-Markov Decision Problems : Theoretical Framework and Approximate Solution". Dans : *Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2007. ADPRL 2007. IEEE International Symposium on*, p. 111–118. DOI : 10.1109/ADPRL.2007.368177.
- THERAULAZ, Guy et Eric BONABEAU (1999). "A Brief History of Stimergy". Dans : *Artificial Life* 5.2, p. 97–116.
- ULIERU, M. et A. GERA (2002). "Emergent holarchies for e-health applications : a case in glaucoma diagnosis". Dans : *Proc. IEEE 2002 28th Annual Conf IECON 02 [Industrial Electronics Society of the].* T. 4, p. 2957–2961. DOI : 10.1109/IECON.2002.1182866.
- WANG, Li (2012). "Dynamic modeling for decision-making process based on the Bayesian theory". Dans : *Modelling, Identification Control (ICMIC), 2012 Proceedings of International Conference on*, p. 371–376.
- WEYNS, Danny, H. Van Dyke PARUNAK, Fabien MICHEL, Tom HOLVOET et Jacques FERBER (2004). "Environments for Multiagent Systems State-of-the-Art and Research Challenges". Dans : *E4MAS*, p. 1–47.
- XENOS, Michalis, Nikolaos AVOURIS, Vassilis KOMIS, Dimitris STAVRINOUDIS et Meletis MARGARITIS (2004). "Synchronous Collaboration in Distance Education : A Case Study on a Computer Science Course". Dans : *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies. ICALT '04*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, p. 500–504. ISBN : 0-7695-2181-9. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1018423.1020040>.
- YAMINS, Daniel (2005a). "Towards a theory of "local to global" in distributed multi-agent systems (I)". Dans : *AAMAS*, p. 183–190.

- YAMINS, Daniel (2005b). "Towards a theory of "local to global" in distributed multi-agent systems (II)". Dans : *AAMAS*, p. 191–198.
- YANG, Sibo, Franck GECHTER et Abderrafiaa KOUKAM (2008a). "Application of Reactive Multi-agent System to Vehicle Collision Avoidance". Dans : *The 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI, Dayton, Ohio, USA*. IEEE Computer Society, p. 197–204.
- YI, Soo-Yeong et Kil-To CHONG (2005). "Impedance control for a vehicle platoon system". English. Dans : *Mechatronics (UK)* 15.5, p. 627 –38. ISSN : 0957-4158. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2004.12.002>.
- ZEGHAL, K. et J. FERBER (1994). "A reactive approach for distributed air traffic control". Dans : *proceedings of Avignon94*, p. 381–390.
- ZHAO, Peng, S. SURYANARAYANAN et M.G. SIMOES (2010). "An Energy Management System for Building Structures Using a Multi-Agent Decision-Making Control Methodology". Dans : *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 IEEE*, p. 1–8. DOI : [10.1109/IAS.2010.5615412](https://doi.org/10.1109/IAS.2010.5615412).
- ZHOU, Yifan, Lin MA, J. MATHEW, Yong SUN et R. WOLFF (2010). "Maintenance decision-making using a continuous-state partially observable semi-Markov decision process". Dans : *Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM '10*. P. 1–8. DOI : [10.1109/PHM.2010.5413427](https://doi.org/10.1109/PHM.2010.5413427).

Chapitre 8

Curriculum Vitae

8.1 Curriculum Vitae

8.1.1 Etat civil

38 ans, nationalité française, marié, 3 enfants

8.1.2 Parcours académique

2003	Doctorat en Informatique Université Henri Poincaré Nancy 1, LORIA/INRIA, Nancy, France.
1999	Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, (ENSPS), classement : 7/85
1999	DEA Photonique et images, option : Traitement d'images, Université Louis Pasteur (Strasbourg), mention : bien, classement : 1 ^{er} /15
1997	Licence de Physique, Université Louis Pasteur (Strasbourg), mention : assez-bien
1996	Deug A Sciences et structure de la matière, option : Mathématiques, Université Henri Poincaré Nancy 1
1993	Baccalauréat C, mention : assez-bien , Lycée de la Malgrange, Jarville

8.1.3 Parcours Professionnel

depuis 2004	Maître de Conférences, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société : Laboratoire Systèmes et Transports (IRTES-SeT EA 7274).
depuis 2012	Membre de la Fédération de Laboratoires sur la pile à combustible FCLAB FR-CNRS 3539
2003-2004	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Supérieure d'Informatique et Automatique de Lorraine (ESIAL), Nancy (France)
2002-2003	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Lorraine (IUFM), Metz (France)
1999-2002	Allocataire de Recherche MENRT INRIA Lorraine/LORIA UMR 7503 Projet MAchines Intelligentes et Autonomes (MAIA)
1999-2002	Moniteur à l'Université Henri Poincaré Nancy 1

8.1.4 Eléments Remarquables

Thèses encadrées :

1 thèse soutenue, 4 thèses en cours

Publications depuis le recrutement

10 revues, 3 chapitres de livres, 23 conférences internationales, 7 conférences nationales.

Participation à des projets de Recherche

1 projet Européen, 2 projets nationaux, 1 projet interne, 3 contrats de transfert.

Bénéficiaire de la Prime d'Excellence Scientifique (PES) depuis 2010

8.2 Insertion dans l'équipe de recherche

8.2.1 Participation et responsabilités dans le cadre de projets de recherche

- **Projet ANR VTT SafePlatoon** (ANR-10-VPTT-011) (2011-2014) (Montant Total : 825 306 euros, Financement IRTES-SeT : 248 969 euros)
 - Responsable (avec Pablo Gruer) du Workpackage 3 sur la Vérification.
 - Membre de l'équipe de coordination et de recherche du projet
- **Projet FCE/FUI CRISTAL** Cellule de Recherche Industrielle en Systèmes de Transports Automatisés Légers (2007-2009) (<http://projet-cristal.net>) (Montant Total : 1 800 000 euros, Partie Laboratoire : 654 968,25 euros, Financement IRTES-SeT : 133 000 euros)
 - Coordinateur de l'équipe de développement du simulateur VIVUS (Virtual Intelligent Vehicle Urban Simulator) Composition : 2 doctorants, 1 ingénieur de Recherche, 2 ingénieurs d'études
- **European Research Project CATS** (City Alternative Transport System) Small Scale Collaborative Project. (2010-2013) (Financement IRTES-SeT : 50 000 euros)
 - Coordinateur de l'équipe de développement du démonstrateur virtuel Composition : 1 doctorant, 1 ingénieur de Recherche
- **Projet BQE : Tableau Blanc Interactif** Projet Interne UTBM (2008-2009) (Montant Total : 9700 euros)
 - Coordinateur du projet

8.2.2 Valorisation

J'ai assumé la responsabilité des projets de valorisation suivants :

- **Utilisation d'agents pour la création de peintures numériques.** (6 mois (2009))
 - Partenaire : Espace Gantner - Conseil Général de Belfort - Montant : 1500 euros
 - Résultats : 1 revue internationale
- **Sphericall : Démonstrateur interactif utilisant les systèmes multi-agent** (6 mois (2010))
 - Partenaire : Tharsis Software - Montant : 2000 euros
 - Résultats : Participation au festival OFFF (Paris juin 2010 - <http://www.youtube.com/watch?v=iDEkBE6Cb>), 1 revue internationale en cours de soumission
- **Assistant de navigation 3D pour avions Ultra Légers Motorisés (ULM)** (6 mois (2012))
 - Partenaire : Tecnomade - Montant : 2000 euros

8.2.3 Expertise, participation à des comités de programme et de lecture

Expertise

- 2009-2010 **ANR-JST Expert** pour le programme international entre l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et la Japan Science and Technology Agency (JST) « Information and Communication Science and Technologies (ICT) »

Comité de programme

- 2010-2013 Membre du comité de programme de IADIS International Conference Intelligent Systems And Agents (<http://www.isa-conf.org/>)

Comités de lecture

- 2007 Conférence **IECON 2007** - 33rd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics
- 2008 Journal **IEEE Transactions on Control Systems Technology**.
- 2009-2013 Journal **Simulation Modelling Practice and Theory SIMPAT**.
- 2010 Journal **ACM Transactions on Adaptive and Autonomous Systems (TAAS)**.
- 2013 Conférence European Control Conference (ECC'13).

8.2.4 Prix et conférences invité

- Depuis 2010, Bénéficiaire de la **Prime d'Excellence Scientifique**.
- 2008 **Médaille d'Argent du concours YEAR** (Young European Arena of Research) : avec Jean-Michel Contet et Pablo Gruer : catégorie Future Vision. Jean-Michel Contet, Franck Gechter, Pablo Gruer. « New platoon-based transportation systems. ».
- 2012 dans le cadre du projet Safeplatoon **nomin  aux Mechatronic Award**. (<http://www.emm-mechatronics.eu/>)
- 2009 Conférencier invité dans le cadre du séminaire du laboratoire Leprince Ringuet Ecole Polytechnique/CNRS (UMR 7638) : Systèmes multiagents et perspectives pour la reconstruction d' v nements de physique des hautes énergies.

8.3 Encadrement et co-encadrement d'étudiants

8.3.1 Thèse soutenue

- Etudiant : **Jean-Michel CONTEL**
- Date de début : septembre 2006.
- Date de Soutenance : **4 décembre 2009**
- Sujet : *Modèles multi-agents réactifs pour la navigation multi-véhicules : Spécification Formelle et Vérification*
- Taux d'encadrement : 50%
- Autre encadrant : Pr. Pablo Gruer (50%)

8.3.2 Thèses en cours

- Etudiant : **Madeleine EL-ZAHER**
- Date de début : décembre 2010.
- Date de Soutenance prévue : **22 novembre 2013**
- Sujet : *Modèles multi-agents réactifs pour la prise de décision : Application à la navigation autonome pendant les phases de transitions pour le platooning.*
- Taux d'encadrement : 40%
- Autres encadrants : Pr. Pablo Gruer (30%), Pr. Mohammad Hajjar (30%)
- Etudiant : **Baudouin DAFFLON**
- Date de début : décembre 2011.
- Date de Soutenance prévue : **octobre 2014**
- Sujets : Systèmes Multi-Agent Réactifs pour la Navigation Multi-Véhicules en Formation : Spécification, Vérification et Applications.
- Taux d'encadrement : 33%
- Autres encadrants : Pr. Pablo Gruer (33%), Dr. Jean-Michel Contet (33%)
- Etudiant : **Bofei CHEN**
- Date de début : octobre 2013.
- Date de Soutenance prévue : **octobre 2016**
- Sujets : Multi-agent model for hybrid (local/global) car platoon control.
- Taux d'encadrement : 50%
- Autres encadrants : Pr. Pablo Gruer (50%)
- Etudiant : **Feng YANG**
- Date de début : octobre 2013.
- Date de Soutenance prévue : **octobre 2016**
- Sujets : Adaptive PEM Fuel Cell multi-physic simulation based on multi-agent paradigm
- Taux d'encadrement : 33%
- Autres encadrants : Pr. Abder Koukam (33%), Dr. Fei Gao (33%)

8.3.3 Encadrement de stagiaire de Master et de projet de fin d'études

- **Bertrand Benoit** : *Adaptation de paramètres dans les systèmes multi-agent réactifs : application à la robotique mobile.* Février-Juin 2004 (50% Franck Gechter, 50% Vincent Chevrier)

- **Jean-Michel Contet**, *Accroche immatérielle (platooning) en utilisant les concepts d'agents réactifs*. Février-juillet 2006. (100% Franck Gechter)
- **Kossi Sitsope Alonyo**, *Integration d'AROCCAM dans le simulateur VIVUS*. Avril-Septembre 2011. (33% Franck Gechter, 33% Pablo Gruer, 33% Jean-Michel Contet)
- **Baudouin Dafflon**, *Pôles d'échanges intelligents pour la re-configuration de trains de véhicules : Simulation 3D et Application sur véhicules réels*. Août 2011- Janvier 2012. (33% Franck Gechter, 33% Pablo Gruer, 33% Jean-Michel Contet)

8.3.4 Encadrement d'ingénieurs sur des projets de recherche au laboratoire

- **Santo Inzerillo** : Ingénieur d'étude et de recherche travaillant dans le cadre du projet CRISTAL (Cellule de Recherche Industrielle en Systèmes de Transports Automatisés Légers) (<http://projet-cristal.net>). Période du 17 mars 2008 au 20 septembre 2008.
- **Alexandre Willaume** : Ingénieur d'étude et de recherche travaillant dans le cadre du projet CRISTAL. Période du 1er avril 2009 au 30 novembre 2009

8.4 Participation à des tâches administratives d'intérêt collectif et activités d'enseignement

8.4.1 Tâches administratives d'intérêt collectif

Participation aux Conseils

- 2008-2012 - **Membre élu du conseil scientifique** (collège des enseignants chercheurs) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).
- 2005-2007 - **Membre élu du bureau de département Génie Informatique** de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- 2005-2009 - **Membre du bureau de département Tronc Commun** de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Représentant du département Génie Informatique.

Animation/Coordination d'activités de recherche

- depuis 2008 : J'anime et coordonne l'ensemble des travaux et projets de l'axe **modèles multi-agents pour la navigation multi-véhicule**.
- depuis 2006 : **Co-Responsable de la plateforme Robots Autonomes** du laboratoire IRTES-SeT. <http://set.utbm.fr/index.php?pge=260&lang=fr>

Participation à des tâches administratives d'intérêt collectif

- 2005-2006 **Membre de la commission de recrutement** du département Génie Informatique de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).
- 2008-2012 - **Membre du Conseil d'Administration des Ressources Informatiques (CARI)** de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).
- 2009-2012 **Membre de la commission Mobilité/Travail collaboratif** du Conseil d'Administration des Ressources Informatiques (CARI) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).

Responsabilités Pédagogiques

- depuis 2005 **Responsable de l'UV LO43** : Conception et Programmation Orientée Objet.
- 2005-2008 **Responsable de l'UV LO11** : Initiation à la programmation.
- depuis 2006 **Responsable de l'UV TX52** : Travaux de Laboratoire
- depuis 2013 **Responsable de l'UV LP24** : Initiation to Object Oriented Programming (UV en anglais)

8.4.2 Activités d'enseignement

Intelligence et vie artificielle (Niveau Master) Cours 10 h/an TD/TP 10h/an

- **VI51 Artificial Life** (UV en Anglais) : Markov Models, Markov Decision Processes, Particle Filtering (Département Informatique - Cours 4h/an - TD/TP 4h/an) depuis 2008.
- **IA54 Systèmes Multi-Agent** : Systèmes multi-agent réactifs d'inspiration physique et biologique, mesure et caractérisation de phénomènes émergents (Département Informatique - Cours 6h/an - TD/TP 6h/an) depuis 2006

Langages de Programmation (Niveau Licence) Cours 70h/an TD/TP 50h/an

- **LO11 Initiation à l'algorithme et à la programmation** (*responsable de 2005 à 2008*) : langage C (Département Tronc Commun - cours 24h/an - TD/TP 24h/an) depuis 2004
- **LO43 Conception et Programmation Orientée Objet** (*responsable depuis 2005*) : langage C++ , UML, langage Java (Département Informatique - Cours 24h/an - TD/TP 26h/an) depuis 2004
- **LP24 Initiation to Object Oriented Programming** (UV en Anglais) (*responsable depuis 2013*) : Java language. (Département Tronc Commun - cours 24h/an) depuis 2013
- **GL40-GL53 Interface Homme Machine** (Département Informatique - Cours 6h/an - TD/TP 10h/an) de 2008 à 2011.

Traitement du signal, traitement d'image et reconnaissance des formes (Niveau Master) Cours 15h/an TD/TP 15h/an

- **IN52 Traitement d'image** : Modèle numérique de l'image, Traitement élémentaires,... (Département Informatique - Cours 2h/an - TD/TP 12h/an) de 2004 à 2008
- **IN54 Reconnaissance des Formes** : Introduction à la reconnaissance des formes, Filtre de Kalman, Analyse en Composantes Principales,... (Département Informatique - Cours 4h/an - TD/TP 4h/an) depuis 2004
- **VI50 Réalité Virtuelle** : Dispositifs pour la réalité virtuelle, moteur de Physique,... (Département Informatique - Cours 6h/an) de 2008 à 2011
- **IN41 Traitement du signal** : Filtres analogiques et numériques (Département Informatique - Cours 10h/an - TD/TP 16h/an) de 2007 à 2008
- **SM54 Regulation de traffic** : Utilisation des dispositifs imageurs dans le cadre de la régulation de traffic, algorithmes et applications (Département Energie et Environnement - Cours 4h/an - TD/TP 2h/an) depuis 2009
- **Master AHPM** : (Université de Franche-Comté - Cours 8h/an) de 2009 à 2012

Thermodynamique (Niveau Licence) Cours 20h/an

- **ER41 Initiation à la thermodynamique** (Département Energie et Environnement - Cours 20h/year) depuis 2013

Encadrement de travaux d'initiation à la recherche Cours 20h/an
(Niveau Master)

- **TX52 Travaux de Laboratoire** (*responsable depuis 2006*) : Les travaux de laboratoire (TX) sont des projets proposés et encadrés par un enseignant-chercheur. Ces projets sont confiés à des élèves ingénieurs UTBM et comptent pour une unité de valeur, dans le cursus de l'étudiant. Les sujets de TX sont motivés par des retombées pratiques des travaux de recherche.

Depuis 2004, j'ai encadré 86 étudiants (environ 10 étudiants/an).

8.5 Liste des publications

Revues Internationales avec comité de lecture

- BASSO, Gillian, Nicolas GAUD, **Franck GECHTER**, Vincent HILAIRE et Fabrice LAURI (2013a). “A Framework for Qualifying and Evaluating Smart Grids Approaches : Focus on Multi-Agent Technologies”. Anglais. Dans : *International Journal of Smart Grid and Renewable Energy*.
- CONTET, Jean-michel, **Franck GECHTER**, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2011b). “Reactive Multi-agent approach to local platoon control : stability analysis and experiments.” Dans : *International Journal of Intelligent Systems Technologies And Application*. DOI : <http://dx.doi.org/10.1504/IJISTA.2011.040348>.
- CONTET, Jean-michel, **Franck GECHTER** et Ludovic LEFOULON (2013b). “Autonomous emergent painting triggered by music and motion”. Dans : *International Journal of Arts and Technology*.
- DAFFLON, Baudouin, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (sept. 2013c). “Vehicle platoon and obstacle avoidance : a reactive agent approach”. Anglais. Dans : *IET Intelligent Transport Systems* 3, 257–264(7). ISSN : 1751-956X.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTET, Pablo GRUER, **Franck GECHTER** et Abderrafiaa KOUKAM (2012b). “Compositional verification for reactive multi-agent systems applied to Platoon non collision verification”. Dans : *Studia Informatica Universalis*.
- EL ZAHER, Madeleine, Baudouin DAFFLON, Jean-michel CONTET et **Franck GECHTER** (2012f). “Vehicle platoon control with multi-configuration ability”. Dans : *Procedia Computer Science CS* 9, p. 1503–1512.
- GAUD, Nicolas, Stéphane GALLAND, **Franck GECHTER**, Vincent HILAIRE et Abderrafiaa KOUKAM (2008b). “Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment”. Dans : *Simulation Modelling Practice and Theory* 16.10, p. 1659–1676. DOI : <10.1016/j.smpat.2008.08.015>.
- HILAIRE, Vincent, Massimo COSENTINO, **Franck GECHTER**, Sebastian RODRIGUEZ et Abderrafiaa KOUKAM (2013a). “An approach for the integration of swarm intelligence in MAS : an engineering perspective”. Dans : *Expert Systems with Applications* 40.4, p. 1323–1332. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.058>.
- GECHTER, Franck**, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2006). “A Reactive Agent-Based Problem-Solving Model : Application to Localization and Tracking”. Dans : *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (ACM TAAS)* 1.2, p. 189–222.
- GECHTER, Franck**, Jean-michel CONTET, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2010). “Car-driving assistance using organization measurement of reactive multi-agent system”. Dans : *Procedia Computer Science CS*, p. 317–325.
- GECHTER, Franck**, Jean-michel CONTET, Olivier LAMOTTE, Stéphane GALLAND et Abderrafiaa KOUKAM (2012). “Virtual Intelligent Vehicle Urban Simulator : Application to Vehicle Platoon Evaluation”. Dans : *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)* 24, p. 103–114. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.smpat.2012.02.001>.

Revues Francophones avec comité de lecture

CHEVRIER, Vincent et **Franck GECHTER** (2003a). "Une architecture réactive pour la localisation en robotique mobile". Dans : *Technique et Science Informatiques* 22.4, p. 345–358.

GECHTER, Franck, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2004d). "Un modèle de résolution de problèmes utilisant des agents réactifs pour la localisation et le suivi." Dans : *Revue d'intelligence artificielle (RSTI-RIA)* 18.5-6, p. 743–777.

Livre et Chapitre de Livre

NOGUEIRA, Sergio, **Franck GECHTER**, Yassine RUCHEK, Abderrafiaa KOUKAM et François CHARPILLET (2006a). "Environment perception for vehicle autonomous navigation in urban areas". Dans : *Digital Signal Processing for In-Vehicle and Mobile Systems II*. Springer-Verlag Ed., p. ,

NOGUEIRA, Sergio, Yassine RUCHEK, **Franck GECHTER**, Abderrafiaa KOUKAM et François CHARPILLET (2007a). "An artificial vision based environment perception system". Dans : *Advances for In-Vehicle and Mobile Systems - Challenges for International Standards*. Sous la dir. d'Huseyin ABUT, John h. L. HANSEN et Kazuya TAKEDA. Springer. Chap. 4. ISBN : 978-0-387-33503-2.

GECHTER, Franck (2011). "Modèle multi-agent réactif pour la fusion de percepts Application à la localisation et au suivi en robotique mobile Informatique," dans : Editions Universitaires Européennes. ISBN : 978-613-1-56427-7.

Papiers de conférences internationales avec comité de lecture publiés dans Lecture Notes (Springer)

CONTET, Jean-michel, **Franck GECHTER**, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2009a). "Bending Virtual Spring-Damper : A Solution to Improve Local Platoon Control". Anglais. Dans : *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) Vol. 5544, paper from the International Conference on Computational Science 2009 (ICCS 2009), Baton Rouge, Louisiana, U.S.A.* Springer Verlag.

DAFFLON, Baudouin, **Franck GECHTER**, Jean-michel CONTET, Abdeljalil ABBAS TURKI et Pablo GRUER (2011b). "Intelligent crossroads for vehicle platoons reconfiguration". Dans : *Lecture Notes in Computer Science/Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNCS/LNAI) Vol. 6943 paper from the International Conference on Adaptive and Intelligent Systems ICAIS 2011, Klagenfurt, Austria*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTET, **Franck GECHTER** et Abderrafiaa KOUKAM (2012d). "Echelon platoon organisation : a distributed approach based on 2-spring virtual links". Dans : *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 7557 papers from the 15th International Conference on Artificial Intelligence : Methodology, Systems, Applications (AIMSA)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33185-5_28.

SIMONIN, Olivier et **Franck GECHTER** (2006b). "An Environment-Based Methodology to Design Reactive Multi-agent Systems for Problem Solving". Dans : *(Lecture Notes in Artificial Intelligence) LNAI Vol. 3830 : Environment for Multiagent Systems II (revised and selected papers of Environment for Multi Agent Systems (E4MAS) 2005)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 32–49.

Conférences Internationales avec comité de lecture

- CONTET, Jean-michel, **Franck GECHTER**, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2006a). “Multiagent system model for vehicle platooning with merge and split capabilities”. Anglais. Dans : *the 3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents – ICARA*. Palmerston North, New Zealand, p. 41–46.
- (2007a). “Application of reactive multiagent system to linear vehicle platoon”. Dans : *In 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence – ICTAI’2007*. Volume 2, Grèce, Patras, october 29-31. IEEE Computer Society, p. 67–70.
- (2007c). “Physics inspired multiagent system for vehicle platooning”. Anglais. Dans : *International conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), IFAAMAS*. Honolulu, Hawaï USA, p. 349–351.
- (2008a). “Evaluation of global system state thanks to local phenomenona”. Anglais. Dans : *Biennial European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*. Grèce, Patras, june 21-27.
- (2010b). “An Approach to Compositional Verification of Reactive Multiagent Systems”. Anglais. Dans : *Working Notes of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Workshop on Model Checking and Artificial Intelligence*.
- DAFFLON, Baudouin, Jean-michel CONTET, **Franck GECHTER** et Pablo GRUER (2012a). “Toward a reactive agent based parking assistance system”. Dans : *International Conference on Tools with Artificial Intelligence*.
- DAFFLON, Baudouin, Franck GECHTER, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (juil. 2013a). “A layered multi-agent model for multi-configuration platoon control”. Anglais. Dans : *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*.
- EL ZAHER, Madeleine, **Franck GECHTER**, Pablo GRUER et Mohammad HAJJAR (2011a). “A new linear platoon model based on reactive multi-agent systems”. Dans : *The 23rd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI*. IEEE Computer Society.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTET, **Franck GECHTER** et Pablo GRUER (2011e). “Reconfigurable and adaptable urban transportation systems : the platoon solution”. Dans : *the Institution of Engineering and Technology Conference on Smart and Sustainable City 2011 (ICSSC11), Institute Engineering and Technology and Shanghai University, Shanghai, China*. Shanghai University Press. ISBN : 978-1-84919-326-9.
- EL ZAHER, Madeleine, Jean-michel CONTET, Pablo GRUER et **Franck GECHTER** (2011g). “Towards a compositional verification approach for multi-agent systems : Application to Platoon system”. Dans : *First International workshop on Verification and Validation of multi-agent models for complex systems (V2CS)*.
- GAUD, Nicolas, **Franck GECHTER**, Stéphane GALLAND et Abderrafiaa KOUKAM (2007b). “Holonic multiagent multilevel simulation : Application to real-time pedestrians simulation in urban environment”. Dans : *the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI’07)*. Hyderabad India, p. 1275–1280.
- LAMOTTE, Olivier, Stéphane GALLAND, Jean-michel CONTET et **Franck GECHTER** (2010b). “Submicroscopic and Physics Simulation of Autonomous and Intelligent Vehicles in Virtual Reality”. Dans : *2nd International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL10)*. Nice, France : IEEE CPS.
- MATKO, Drago, Gregor KLANCAR, Saso BLAZIC, **Franck GECHTER**, Olivier SIMONIN, Jean-michel CONTET et Pablo GRUER (2008a). “Control Strategy for Wheeled Mobile Robots Platoons”. Dans : *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Funchal, Madiera, Portugal May 2008. INSTICC Press, p. 145–150.

- NOGUEIRA, Sergio, **Franck GECHTER**, Yassine RUCHEK, Abderrafiaa KOUKAM et François CHARPILLET (2005a). "Perception environment for vehicle autonomous navigation". Dans : *The Biennial on DSP for In-Vehicle and Mobile Systems*.
- NOGUEIRA, Sergio, Jean-michel CONTEL, Yassine RUCHEK et **Franck GECHTER** (2007c). "WiFi based remote control system with video feedback for intelligent vehicle". Dans : *The Biennial on Digital Signal Processing for In-Vehicle and Mobile Systems*. Istanbul, Turkey.
- SIMONIN, Olivier et **Franck GECHTER** (2005b). "An environment-based principle to design reactive multi-agent systems for problem solving". Dans : *Environments for Multi-Agent Systems E4MAS (AAMAS 2005 Workshop)*.
- GECHTER, Franck** et François CHARPILLET (2000). "Vision Based Localisation for a Mobile Robot". Dans : *International Conference on tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*.
- GECHTER, Franck**, Vincent THOMAS et François CHARPILLET (2001a). "Localization by Stochastic Vision Based Device". Dans : *In The 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics - SCI 2001 – The 7th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis - ISAS 2001*.
- GECHTER, Franck** et François CHARPILLET (2001b). "Markov Based Localization Device for a Mobile Robot." Dans : *Robotics and Automation in Space : A New Space Odyssey - i-SAIRAS 2001*.
- GECHTER, Franck**, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2004a). "A Reactive Multi-Agent System for Localization and Tracking in Mobile Robotics". Dans : *In 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence - ICTAI'2004*.
- (2004b). "Localizing and Tracking Targets with a Reactive Multi-Agent System". Dans : *Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems - AAMAS'04*.
 - (2004c). "Localizing and Tracking Targets with a Reactive Multi-Agent System (Extended version of AAMAS 2004)". Dans : *Second European Workshop on Multi-Agent Systems - EUMAS'04*.
- GECHTER, Franck**, Jean-michel CONTEL, Pablo GRUER et Abderrafiaa KOUKAM (2011a). "A reactive agent based vehicle platoon algorithm with integrated obstacle avoidance ability". Dans : *Fifth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems SASO 2011*. DOI : <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/SASO.2011.24>.
- GECHTER, Franck** et Stéphane GALLAND (2011b). "Interactive Whiteboard for Collaborative Work - A Multiagent-based Solution". Dans : *the 3rd International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2011)*. Noordwijkerhout, Netherlands : SciTePress, p. 270–278. ISBN : 978-989-8425-49-2.
- GECHTER, Franck**, David BOUQUAIN, Fei GAO, Abderrafiaa KOUKAM et Abdellatif MIRAOUI (2013). "A Multiagent Model for PEM-Fuel Cell Microscopic Simulation". Dans : *The European Control Conference ECC13*.
- YANG, Sibo, **Franck GECHTER** et Abderrafiaa KOUKAM (2008b). "Application of Reactive Multi-agent System to Vehicle Collision Avoidance". Dans : *The 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence ICTAI, Dayton, Ohio, USA*. IEEE Computer Society, p. 197–204.

Conférences Francophones avec comité de lecture

- CONTEL, Jean-michel, **Franck GECHTER** et Pablo GRUER (2009d). "Mécanisme décisionnel basé sur la mesure de l'organisation d'un SMA : application à l'évitement d'obstacles".

Dans : *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents – JFSMA’2009*. Hermes Lavoisier Editions.

GECHTER, Franck (2002). “Une méthode de localisation d’un robot mobile utilisant une approche multi-agents pour la fusion de données”. Dans : *15eme Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique - JJCR 2002*.

GECHTER, Franck, Vincent THOMAS et François CHARPILLET (2001c). “Utilisation d’un module de vision stochastique pour localiser un robot mobile.” Dans : *Troisièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique - JNRR’2001*.

GECHTER, Franck, Vincent CHEVRIER et François CHARPILLET (2003). “Une architecture réactive pour la localisation en robotique mobile.” Dans : *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents - JFSMA’2003*. Hermes Lavoisier Editions.

GECHTER, Franck et Olivier SIMONIN (2005). “Conception de SMA réactifs pour la résolution de problèmes : Une approche basée sur l’environnement”. Dans : *Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents - JFSMA’2005*. Hermes Lavoisier Editions.

Autres Publications

ADOUANE, Lounis, Romuald AUFRÈRE, Pierre AVANZINI, Guillaume BRESSON, Roland CHA-PUIS, Jean-Pierre DERUTIN, Eric ROYER, Benoit THUILLOT, M Vita VENTURA, Baudouin DAFFLON, Madeleine El ZAHER, **Franck GECHTER**, Maxime GUERIAU, Pablo GRUER, Abderrafiaa KOUKAM, Christophe DEBAIN, Roland LENAIN et Monir BENCHOAIB (2013a). “SafePlatoon : Sûreté de Convois de Véhicules Autonomes”. Dans : *Journées Nationales des Communications dans les Transport (JNCT)*.

BASIC, Dino, Jean-michel CONTEL et **Franck GECHTER** (2012b). “Visualisation de données capteurs d’un véhicule intelligent avec une tablette tactile”. Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l’UTBM (IngéDoc 2012)*, Doceo, UTBM, UTBM Press.

EL ZAHER, Madeleine, **Franck GECHTER** et Pablo GRUER (2011c). “Convoi de véhicule pour une nouvelle forme de mobilité”. Dans : *In Proc. of 1ères Journées des Jeunes Chercheurs de l’UTBM (Ingedoc 2011)*.

FRANÇOIS, Etienne, Etienne THUILLIER, Gillian BASSO et **Franck GECHTER** (2012a). “Gestion Intelligente d’un réseau électrique par un système multi-agent”. Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l’UTBM (IngéDoc 2012)*, Doceo, UTBM, UTBM Press,

GRÉGOIRE, Pichard, Martin GEOFFROY, Jean-michel CONTEL, Baudouin DAFFLON et **Franck GECHTER** (2012a). “Système multi-agents d’évitement d’obstacles”. Dans : *Journée des jeunes chercheurs de l’UTBM (IngéDoc’2012)*, Belfort, France, 2012, dec 2012.

NIETO, Alexis, David VIAL et **Franck GECHTER** (2012b). “Visualisation d’un train de véhicules hybride (réel/virtuel) en réalité augmentée”. Dans : *2èmes Journées des Jeunes Chercheurs de l’UTBM (IngéDoc 2012)*, Doceo, UTBM, UTBM Press.