



Un modèle multi-agents pour la représentation de l'action située basé sur l'affordance et la stigmergie

Zoubida Afoutni

► To cite this version:

Zoubida Afoutni. Un modèle multi-agents pour la représentation de l'action située basé sur l'affordance et la stigmergie. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Université de la Réunion, 2015. Français. NNT : 2015LARE0027 . tel-01279057

HAL Id: tel-01279057

<https://theses.hal.science/tel-01279057>

Submitted on 25 Feb 2016

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

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



THÈSE

de

Zoubida AFOUTNI

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LA REUNION

Discipline: *Informatique*

Un modèle multi-agents pour la représentation de l'action située basé sur l'affordance et la stigmergie

Soutenue le 25 septembre 2015 devant le jury composé de :

M. Sébastien Picault,	Docteur HDR, Université Lille 1,	Rapporteur
M. Olivier Simonin,	Professeur, INSA de Lyon,	Rapporteur
Mme. Marie-Pierre Gleizes,	Professeur, Université Toulouse 3,	Examineur
M. Fabien Michel,	Docteur HDR, Université Montpellier 2,	Examineur
M. Rémy Courdier,	Professeur, Université de La Réunion,	Co-Directeur de thèse
M. François Guerrin,	Docteur HDR, INRA-CIRAD,	Directeur de thèse

Remerciements

Cette thèse doit beaucoup aux nombreuses personnes qui ont contribué au plan intellectuel et au plan humain, durant mes années de thèse, à l'aboutissement de ce travail. Un grand merci à vous !

Je remercie Messieurs Sébastien Picault et Olivier Simonin de m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter ma thèse. Je remercie également Madame Marie-Pierre Gleizes et Monsieur Fabien Michel d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements aux membres de mon comité de thèse : Fred Garcia, Frédéric Amblard, Christine Aubry, Jean-Marie Paillat, Jonathan Vayssières et Jean-Marie Cellier.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse, François Guerrin, tout d'abord pour m'avoir donné la chance de découvrir La Réunion mais, surtout, pour la qualité de son encadrement, pour ses conseils précieux et pour m'avoir soutenue jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Merci !

Mes sentiments chaleureux de gratitude et de remerciement à mon co-directeur de thèse Rémy Courdier. Merci pour la qualité de ton encadrement, merci de m'avoir encouragée à chaque fois que j'en avais besoin, merci pour ta patience, merci de m'avoir soutenue jusqu'au bout. J'ai découvert au fil des années une personne d'une qualité humaine exceptionnelle, ce qui m'a beaucoup aidé à persévérer durant ma thèse. Merci !

Je remercie les membres de l'UPR Recyclage et Risque du Cirad. J'ai beaucoup apprécié de travailler au sein d'une équipe aussi soudée et agréable. Merci particulièrement à Jean-Marie Paillat, Josie Carpanin et Brigitte Mayor de m'avoir permis de préparer ma thèse dans de bonnes conditions.

Je tiens à remercier aussi les membres de la deuxième équipe dont j'ai fait partie, au laboratoire de Mathématique et informatique (LIM) de l'université de La Réunion. Merci à Denis Payet d'avoir accepté de m'accueillir dans son bureau et de répondre sans hésitation à toutes mes questions. Merci à Joel Kwan d'avoir permis le bon déroulement de ma soutenance mais, aussi, de m'avoir toujours apporté son aide. Merci aux anciens thésards du LIM, Yassine Gangat et Véronique Sébastien, pour les échanges et leurs conseils. Merci à tous les membres de l'équipe qui m'ont apporté leur aide pour mener à bien mes deux ans d'enseignement à l'ESIROI et à l'université de La Réunion.

Un grand merci à Daniel David qui, non seulement, s'est montré courageux en me supportant pendant un an dans le même bureau au Cirad, mais qui n'a pas hésité aussi à m'apporter son aide, que ce soit par les nombreux échanges que nous avons eus, ses relectures de mes rapports et chapitres de thèse, par ses conseils précieux et ses encouragements durant toute la durée de ma thèse. Merci !

Je remercie chaleureusement toutes les personnes formidables que j'ai rencontrées à La Réunion et qui m'ont permis de vivre, en dépit de toutes les difficultés, une belle aventure humaine dont je me souviendrai toujours. La liste est longue mais je tiens à citer Géraud Moussard, Laetitia Albini, Loïc Ajeuné, Aurélie Glachant, Agathe Porllier,

Karine Bonnal, Hélène Magalon. Merci d'avoir été là pour moi, merci pour votre patience, pour vos encouragements répétés, bref, merci pour tout.

Merci à tous mes amis d'Algérie et de tous bords. Une mention spéciale à mon amie depuis toujours, Amina Alik, pour pleins de choses.

Merci à toute ma famille. Un merci spécial à ma soeur Soumeiya Afoutni. Merci à ma mère pour tout depuis toujours.

Une pensée pour terminer ces remerciements pour vous deux qui n'avez pas pu m'accompagner dans cette expérience, mais dont je sais que vous êtes très fiers de votre fille et petite-fille.

Résumé

La modélisation et la simulation des systèmes complexes constitue une solution idéal pour comprendre ces systèmes. En effet, l'expérimentation virtuelle permet, par rapport à l'expérimentation réelle dans le champ d'étude considéré, d'apporter des réponses plus rapides aux questions posées sur ces systèmes, ce qui donne la possibilité de proposer des solutions en un temps adapté au contexte réel.

Ce travail traite la question de la représentation de l'action humaine en prenant en compte sa dimension temporelle et spatiale aux échelles individuelle et collective. Cette question a déjà été traitée dans le domaine de l'intelligence artificielle, en général, et celui des systèmes agricoles, en particulier, qui constitue le domaine d'application de cette thèse. Les modèles proposés jusqu'à présent se basaient principalement sur la théorie de l'action planifiée en ne prenant en compte que la dimension temporelle de l'action. Les limites majeures de ces modèles résident dans leur complexité dans la mesure où il est difficile de pouvoir prédire l'ensemble des changements futurs dans l'environnement de l'acteur. Cela conduit à la nécessité de re-planifier fréquemment les actions afin d'obtenir des résultats cohérents. La deuxième limite réside dans l'écart qu'il peut y avoir entre les résultats des actions simulées et la réalité observée. En effet, un acteur ne réalise pas systématiquement les actions qu'il prévoit selon les situations réelles dans lesquelles il se trouve.

Afin de pallier aux limites des modèles de l'action planifiée, nous avons développé un modèle de l'action humaine qui se base sur la théorie de l'action située. L'action est vue comme un processus doté d'une épaisseur temporelle émergeant des situations créées par l'interaction entre l'acteur et son environnement dans le temps et dans l'espace. Notre modèle combine le concept d'affordance, le concept de stigmergie ainsi que la notion d'émergence.

Nous proposons donc un système multi-agents dans lequel l'espace est explicitement représenté et partitionné en un ensemble de places. Le pilotage de chaque place est attribué à un agent abstrait. Celui-ci représente un observateur capable de détecter à tout instant les affordances émergentes sur sa place ainsi que de déclencher l'action appropriée. Les acteurs sont représentés comme des entités de l'environnement au même titre que les objets passifs. Ces entités de l'environnement portent un ensemble d'informations sur leurs capacités à exécuter ou subir des actions. Ces informations permettent aux agents, grâce aux méta-connaissances qu'ils détiennent de détecter les affordances. Celles-ci, une fois détectées, sont réifiées dans l'environnement et utilisées par les agents

grâce à un mécanisme de sélection d'actions pour déterminer l'action qui sera finalement exécuter. La coordination des actions au niveau collectif se fait par stigmergie : les agents communiquent de façon implicite en utilisant un ensemble de marques qui sont une métaphore des phéromones des colonies de fourmis. Afin de montrer la pertinence du modèle proposé, un prototype appliqué au domaine des systèmes de production agricoles a été implémenté en utilisant la plateforme AnyLogic.

Abstract

Simulation modelling of complex systems nowadays is an ideal solution to get a good understanding of these systems. In effect, compared with real experiments in the field of studies considered, virtual experiments allow one to quickly answer questions about these systems and provide solutions within a delay well adapted to their actual context. This thesis deals with the issue of human action representation, accounting with its temporal and spatial dimensions at individual and collective levels. This question has already been addressed in the field of Artificial intelligence in general and in the one of Agricultural systems in particular, the latter being the application domain of this thesis. The models proposed to date were mainly based upon the theory of planned action, explicitly accounting with the temporal dimension of action only. The main limits of these models lie in their complexity, because the ability to predict all future changes in actors' behaviors is far too difficult. This difficulty leads to the need of frequently re-planning the course of actions in order to get consistent results. The second drawback lies in the discrepancy that may arise between the results of simulated actions and actual observations. In effect, real actors do not realize systematically the actions they forecast according to the situations they actually encounter.

In order to overcome the limits of planning models, we developed a model of human action based on the theory of situated action. Action is there viewed as a process endowed with a temporal thickness and emerging from the situations created by the interaction, through time and space, between the actor and its environment. Our model combines the concepts of affordance and stigmergy as well as the notion of emergence. Therefore we propose a multi-agents system within which space is explicitly represented and partitioned into a set of "places". The control of each place is left to an abstract agent standing for an observer capable of detecting the affordances occurring on its place and trigger appropriate actions. Actors as well as passive objects are represented as "environmental entities". These entities carry information about their capacity of performing or undergoing actions. This information allows the agents to detect affordances thanks to the meta-knowledge they hold. Once detected, these affordances are reified in the environment to be used to determine the action that will eventually be executed. Coordination of actions, at the collective level, is performed through stigmergy : the agents communicate implicitly between them using a set of marks as a metaphor of pheromons in ant colonies. To prove the relevance of the proposed model, a software prototype,

applied to the domain of agricultural production systems, has been implemented with the simulation platform AnyLogic.

Table des matières

Introduction générale	1
Contexte et problématique	1
Motivation	3
Organisation du manuscrit	6
 I Etat de l’art sur la modélisation de l’action	 9
 1 Les théories de l’action	 11
1.1 Théorie de l’activité	12
1.1.1 Activité orientée vers un objet	13
1.1.2 Médiation par artefact	13
1.1.3 Structure hiérarchique d’une activité	15
1.1.4 Internalisation/externalisation	16
1.2 Action planifiée	17
1.2.1 Modèle d’action planifiée	19
1.2.2 Approches de planification	20
1.2.3 Adéquation des approches de planification à nos objectifs	24
1.3 Action située	25
1.3.1 Les principes de l’action planifiée contestés	26
1.3.2 Modèle de l’action située	27
1.4 Conclusion	30

2	Le concept d'affordance	33
2.1	L'affordance selon Gibson	34
2.2	Autres définitions de l'affordance	35
2.2.1	La formalisation de Turvey	35
2.2.2	La formalisation de Stoffregen	36
2.2.3	La formalisation de Chemero	37
2.3	Caractéristiques de l'affordance	38
2.4	Les affordances en simulation multi-agents	39
2.5	Conclusion	42
3	Les systèmes multi-agents	43
3.1	Les systèmes multi-agents	44
3.1.1	Qu'est ce qu'un agent ?	44
3.1.2	Environnement	48
3.1.3	Interaction	51
3.2	Le temps et l'environnement spatial dans les SMA	52
3.2.1	La gestion du temps dans les SMA	52
3.2.2	Représentation de l'espace	55
3.3	Système multi-agents situés	56
3.3.1	Modèle Influence/réaction	57
3.3.2	SMA situé multi-couches (MMASS)	57
3.3.3	Modèle de Brahms	58
3.3.4	Réflexion	59
3.4	Conclusion	60
4	La coordination des actions	63
4.1	Relations de dépendances entre actions	64
4.1.1	Dépendance « producteur/consommateur »	64
4.1.2	Partage de ressources	65
4.1.3	Dépendance de simultanéité	65
4.1.4	Dépendance tâche/sous-tâche	65

4.2	Les formes de coordination	66
4.2.1	Coordination explicite	66
4.2.2	Coordination implicite	70
4.3	Conclusion	76
II	Représentation de l'action	77
5	Positionnement	79
5.1	Quelle théorie adopter ?	79
5.1.1	Action située versus action planifiée dans les systèmes agricoles . .	80
5.1.2	Action située dans le contexte des SMA	83
5.1.3	Représentation de l'action selon Guerrin [Guerrin, 2009]	84
5.1.4	Discussion	87
5.2	Pourquoi et comment sont vues les affordances ?	88
5.2.1	Pourquoi le concept d'affordance ?	88
5.2.2	Comment sont vues les affordances ?	89
5.3	Sur quelle forme de coordination doit-on se baser ?	93
5.3.1	Coordination explicite	93
5.3.2	Coordination implicite	94
5.4	Conclusion	94
6	Un modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel	97
6.1	Éléments structurant le modèle	100
6.1.1	Environnement spatial	100
6.1.2	Entité-environnementale	103
6.2	L'action comme un processus situé	105
6.2.1	Situation	105
6.2.2	L'affordance comme phénomène émergent	106
6.2.3	Représentation de l'action	109
6.3	Architecture d'agents	111
6.3.1	Perception	112

6.3.2	Détection et réification des affordances	113
6.3.3	Sélection d'une action	114
6.3.4	Réalisation de l'action	117
6.4	Coordination d'actions	118
6.4.1	Drapeaux	118
6.4.2	Traces	119
6.4.3	Algorithmes de propagation de trace	121
6.4.4	Dissipation d'une trace	124
6.5	Conclusion	125
7	Implémentation	127
7.1	Plateforme de simulation AnyLogic	128
7.2	Points clés d'implémentation	129
7.2.1	Gestion du temps	130
7.2.2	Les principales classes du modèle	132
7.3	Expérimentation sur la base de cas d'école	139
7.3.1	Détection d'affordance	141
7.3.2	Propagation de traces	145
7.3.3	Déclenchement/exécution d'action	148
7.4	Conclusion	150
8	Conclusion générale	151
8.1	Publications réalisées pendant la thèse	152
8.2	Contribution	153
8.3	Perspectives	155
8.3.1	Perspective sur le plan modélisation	155
8.3.2	Perspectives sur le plan applicatif	156

Introduction générale

Contexte et problématique

Pour comprendre les systèmes complexes, les scientifiques ont largement recours à la modélisation et la simulation. En effet, l'expérimentation virtuelle permet, par rapport à l'expérimentation réelle dans le champ d'étude considéré, d'apporter des réponses plus rapides aux questions posées sur ces systèmes, ce qui donne la possibilité de proposer des solutions en un temps adapté au contexte réel.

Cette thèse propose un modèle de représentation et de simulation d'actions humaines dans le contexte des systèmes de production agricoles (SPA).

Le caractère durable des SPA vus sous leurs dimensions environnementales, économiques et sociales constitue un enjeu majeur pour les agriculteurs et les décideurs publics. La question adressée à la recherche concerne les effets de multiples facteurs de changement auxquels sont confrontés les SPA, les chaînes de causalité y conduisant et les stratégies à mettre en œuvre pour assurer leur durabilité. La réponse à cette question nécessite, d'une part, de définir le cadre de contraintes qui régissent les SPA et, d'autre part, de modéliser et simuler la dynamique de ces systèmes. Celle-ci est bien évidemment fortement influencée par les pratiques des agriculteurs, qui constituent le moteur principal des SPA. Si l'on veut comprendre les SPA afin de les évaluer selon différents critères et envisager les solutions adéquates pour garantir leur durabilité, il faut alors représenter au mieux les actions réalisées par les agriculteurs. En effet, c'est en représentant du mieux possible ce qui est effectivement réalisé, quand et comment cela est fait, que l'on pourra en simuler les impacts de façon réaliste (e.g. consommation de ressources, émissions polluantes, . . .) et, en retour, apprécier l'influence du contexte ainsi modifié sur les pratiques elles-mêmes. La représentation des systèmes agricoles a fait l'objet d'une ontologie développée par [Guerrin, 2008]. Ces travaux, basés sur l'approche de la dynamique des systèmes (DS), représentent un système de production agricole comme un ensemble de stocks reliés par des flux de matières de différentes natures. Les flux peuvent être le produit de processus attribuables à des causes humaines ou naturelles : les flux

« agissables », qui n'ont lieu que s'il y a intervention humaine, et les flux « biophysiques », qui ont lieu même en l'absence d'intervention humaine. Ces deux types de flux interagissent par l'intermédiaire des actions humaines : les pratiques génèrent les flux agissables qui vont déterminer en partie les flux biophysiques conduisant aux produits agricoles et à des émissions vers l'environnement. La gestion du système de production est alors vue comme le contrôle, dans un environnement dynamique, d'un ensemble de stocks et de flux par les activités de l'exploitant.

Inspiré par cette ontologie, un premier cadre de représentation de l'action a été proposé par [Guerrin, 2001, 2004, 2009], où l'action est représentée par une fonction du temps à valeurs binaire. Son déclenchement et sa terminaison ainsi que le cours de son exécution sont sujets à un ensemble de conditions qui constituent le contexte dans lequel l'action peut être exécutée. Ce modèle a fait l'objet d'une implémentation informatique avec la plateforme Vensim et a été utilisé pour simuler les actions humaines dans plusieurs projets concernant la gestion de déchets organiques à l'échelle d'exploitations ou de territoires agricoles : MAGMA [Guerrin, 2001], APPROZUT [Guerrin, 2004], GAMEDE [Vayssières *et al.*, 2009, 2007]. Cependant, ce modèle qui se veut réaliste présente plusieurs limites. En effet, plusieurs éléments clés de l'action n'y sont pas pris en compte de façon explicite, tels que la représentation de l'acteur¹ qui réalise l'action et de l'environnement spatial où celle-ci se déroule. Ceci peut conduire à une simulation peu réaliste de l'ensemble des actions et de leurs effets. Enfin, l'approche de dynamique des systèmes utilisée dans ce cadre de représentation de l'action est appropriée lorsqu'on veut traiter sa dimension temporelle et modéliser la dynamique globale du système. Or, modéliser l'action humaine nécessite de prendre en compte l'acteur qui exécute l'action, ce qui conduit par conséquent à une modélisation plutôt à l'échelle individuelle, locale et spatialisée.

L'objectif de cette thèse est de concevoir un modèle de représentation de l'action humaine qui intègre, non seulement, la dimension temporelle de l'action mais aussi sa dimension spatiale ainsi que la notion d'acteur. Afin de permettre la représentation de systèmes d'activités complexes, tels que ceux rencontrés dans les systèmes de production agricoles étudiés, la représentation de différents modes de coordination de l'action est nécessaire. Afin de répondre à l'objectif de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'approche de modélisation par systèmes multi-agents. Cette approche permet par rapport à la DS de représenter de façon explicite l'environnement spatial, d'intégrer la notion d'acteur par l'intermédiaire de la notion d'agent, de représenter finement la dynamique des différentes entités du système et d'observer à une échelle fine l'évolution du système.

1. Dans le reste de ce manuscrit, nous utilisons le terme acteur lorsqu'on aborde les théories de l'action et d'autres concepts d'un point de vue purement théorique et le terme agent lorsqu'on aborde les travaux liés à la modélisation de l'action dans le domaine de l'intelligence artificielle. La définition de la notion d'agent est présentée dans le chapitre 3.

La problématique de cette thèse est donc fondée essentiellement autour des deux questions suivantes :

- Comment représenter l'action au niveau opérationnel (quelle est l'action en cours ?), en prenant en compte sa dimension temporelle (quand ?) et sa dimension spatiale (où ?) ainsi que la notion d'acteur (qui ?) ?
- Comment coordonner les actions au niveau individuel et au niveau collectif ?

Motivation

Modéliser l'action a été au cœur des problématiques traitées dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) depuis sa naissance. D'ailleurs nous trouvons une sous-discipline à part entière dans l'IA, la planification, qui est centrée sur l'action.

Pourquoi encore traiter la question de la représentation de l'action ?

Nous avons constaté dans une grande partie de la littérature portant sur la représentation de l'action humaine qu'une grande attention est apportée à la modélisation de la décision. Ceci est dû à la conception de l'action la plus répandue, où l'action est divisée en deux phases successives : décider quelle action exécuter, puis exécuter l'action en vue de modifier l'état du système. Ainsi, la plupart des modèles dédiés à la représentation de l'action, particulièrement dans le domaine agricole [Cros *et al.*, 2004, Snow et Lovatt, 2008, Martin *et al.*, 2008, Martin-Clouaire et Rellier, 2009] traitent essentiellement la phase préalable à l'action proprement dite en proposant des modèles centrés sur le processus décisionnel. Ces modèles partent du principe que l'acteur a pour rôle essentiel de prendre au cours du processus de production les décisions nécessaires pour atteindre ses objectifs en prenant en compte différentes contraintes. Modéliser l'action humaine se résume alors à modéliser le processus décisionnel des acteurs dont le produit est généralement un plan d'actions. Nous possédons donc peu de travaux qui traite la deuxième phase, c'est-à-dire celle de l'action proprement dite. Cette étape est d'autant plus importante que c'est à ce niveau qu'il est possible de savoir si l'action décidée auparavant peut être réellement réalisée. En effet, c'est au moment où l'acteur entre en interaction avec son environnement, qu'il peut découvrir les actions qu'il peut exécuter. Ceci est le cas dans beaucoup de systèmes de production, particulièrement dans les systèmes agricoles, difficiles à contrôler ou à anticiper car leur évolution dépend de nombreux facteurs exogènes tels que la météo. C'est donc à ce niveau que le système est réellement influencé par l'action, que les ressources (matérielles, humaines, ...) nécessaires à l'action sont consommées, et ses autres effets produits.

Cette phase de l'action effective, correspond au niveau opérationnel de la gestion du système de production. Les actions du niveau opérationnel sont les actions quotidiennes

qui opèrent à court terme et qui se manifestent pendant l'interaction de l'acteur avec son environnement ou à la suite de cette interaction. Ce sont les actions qui répondent à la question « qu'est ce qui est fait ici et maintenant ? » Et non pas à la question « qu'est ce qui doit être fait ? » qui relève de la décision. L'action du niveau opérationnel est le point manquant dans les modèles de représentation de l'action humaine. En représentant les actions du niveau opérationnel, il serait possible d'évaluer le fossé qu'il peut y avoir entre les stratégies mises en place par les acteurs avant l'exécution des actions et l'évolution réelle du système après les actions faites. Simuler les actions et l'évolution du système de façon assez réaliste permettrait par conséquent de mieux comprendre le système réel étudié.

Par ailleurs, dans le contexte des SMA, le comportement d'un agent est généralement défini par trois étapes : perception, délibération (dans le cas d'agent cognitif) et action. Bien que l'action soit au cœur des architectures d'agents, elle n'est généralement prise en compte que de façon implicite. En effet, toute l'attention est portée aux phases de perception et délibération. L'action se résume à modifier l'état de l'environnement ou l'état interne de l'agent comme si, une fois décidée, sa réalisation devait immédiatement suivre. Elle est plutôt donc considérée comme un événement. Cependant, une action se caractérise par sa durée et est contrainte par la situation de son occurrence. De ce fait, une action peut être interrompue ou annulée. Le résultat de l'action et par conséquent l'évolution du système dépend donc de son déroulement. Si l'action est annulée ou interrompue son effet peut être différent si elle s'est déroulée normalement. Il est plus réaliste donc de considérer l'action plutôt comme un processus possédant un cycle de vie que de la considérer comme un événement.

Ces motivations nous ont amené à revoir la notion d'action elle-même, afin de lui attribuer la place qu'elle doit prendre dans le contexte des SMA et de la modéliser sous un angle différent de celui considéré jusqu'à présent. Il s'agit donc de focaliser l'attention sur l'émergence de l'action au cours de l'interaction acteur/environnement. De ne pas se baser seulement sur le processus de décision mais aussi de prendre en compte comment les acteurs profitent des opportunités d'actions qui se présentent dans les situations dans lesquelles ils se trouvent. On trouve dans le champ de l'anthropologie une large littérature qui postule que toute action est située, dans le sens où les acteurs ne doivent pas systématiquement décider pour agir [Suchman, 1987], mais plutôt qu'ils agissent en réponse à ce qui les entoure. Ils utilisent les « affordances » qui se présentent à eux [Gibson, 1986]. Ce concept d'affordance s'inscrit dans le domaine de la psychologie écologique qui se focalise sur la question de comment les acteurs (humains, animaux) interagissent avec le monde réel. Ainsi, une compréhension de cette interaction peut fournir des indications pour la modélisation de l'action comme un processus émergeant de l'interaction

acteur-environnement. Une affordance, dans son acception d'origine, signifie une potentialité d'action que les objets de l'environnement offrent aux acteurs. En utilisant ce concept, les actions des acteurs sont considérées comme directement couplées avec leur environnement local via le processus de perception. De ce fait, l'acteur économise un effort cognitif considérable et agit en réponse à son environnement ; mieux encore, il s'adapte de façon spontanée à lui.

Dans le même ordre d'idées, nous trouvons dans la littérature sur le comportement des insectes sociaux le concept de stigmergie [Grassé, 1959]. Celui-ci explique une forme de coordination entre les insectes sociaux, basée sur leur communication indirecte par l'intermédiaire de l'environnement. Les insectes, bien qu'ayant des activités très simples, sont capables de construire des œuvres complexes, qui témoignent de l'existence d'un comportement global parfaitement coordonné. Deneubourg [Deneubourg *et al.*, 1990] postule que le comportement des fourmis est médié par des substances chimiques, appelées phéromones, que celles-ci déposent dans leur environnement. Ces phéromones constituent ainsi une source d'information pour leurs autres congénères. Un insecte se base dans son comportement uniquement sur la perception de son environnement local. Le concept de stimergie et la théorie de l'action située sont fortement liés puisqu'ils revendiquent tous les deux le couplage de l'environnement et des actions.

Nous proposons dans cette thèse un modèle de représentation de l'action basé sur les systèmes multi-agents où nous mettons en œuvre le concept d'affordance pour la représentation de l'action à l'échelle individuelle et le concept de stigmergie pour la représentation de l'action au niveau collectif.

Organisation du manuscrit

Première partie : État de l'art sur la modélisation de l'action

Chapitre 1 : Les théories de l'action

Le premier chapitre traite trois théories de l'action : la théorie de l'activité, la théorie de l'action planifiée ainsi que la théorie de l'action située. Le but de ce chapitre est d'identifier les déterminants de l'action selon ces théories. Nous porterons une attention particulière à la théorie de l'action située qui constitue le fondement théorique du modèle de représentation de l'action que nous proposons.

Chapitre 2 : Le concept d'affordance

Le deuxième chapitre est dédié au concept écologique d'affordance. Ce concept aborde l'action sous un angle différent des théories de l'action. Il l'aborde du point de vue de la perception de l'environnement et de l'interaction acteur/environnement. Le but de ce chapitre est de comprendre la manière de coupler les actions des acteurs avec leur environnement local et, par conséquent, comment rendre l'environnement dans un système multi-agents plus « intelligent ».

Chapitre 3 : Les systèmes multi-agents

Le troisième chapitre aborde les concepts fondamentaux de l'approche de modélisation multi-agents.

Chapitre 4 : La coordination des actions

Ce chapitre est réservé à la coordination des actions au sein des systèmes multi-agents. Plus précisément, nous abordons les deux formes de coordination, explicite et implicite, afin d'identifier la plus adéquate à mettre en œuvre dans un modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel.

Deuxième partie : Représentation de l'action

Chapitre 5 : Positionnement

Ce chapitre aborde notre positionnement par rapport aux concepts et théories présentées dans la première partie du manuscrit. Nous développons aussi dans ce chapitre notre propre vision de la modélisation des affordances.

Chapitre 6 : Un modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel

Ce chapitre est dédié à notre modèle multi-agents de représentation de l'action située. Nous présentons en premier lieu, la représentation de l'action à l'échelle individuelle. C'est-à-dire, comment un agent sélectionne et exécute son action en se basant sur la situation qu'il perçoit à un instant t . Pour cela, nous exploitons le concept d'affordance, le concept d'émergence et le formalisme de représentation de l'action de [Guerrin, 2009].

En second lieu, nous présentons l'action à l'échelle collective, c'est-à-dire la coordination des actions des agents. La coordination dans notre modèle est basée uniquement sur le concept de stigmergie.

Chapitre 7 : Implémentation

Nous aborderons dans ce chapitre l'implémentation du prototype qui a été réalisé en utilisant la plateforme de simulation AnyLogic suivie d'un exemple permettant de valider les concepts proposés dans notre modèle.

Chapitre 8 : Conclusion générale.

Première partie

Etat de l'art sur la modélisation de l'action

Chapitre 1

Les théories de l'action

Dès que l'on s'intéresse à la notion d'action, il apparaît une panoplie de théories, dont chacune tente de mettre le doigt sur le caractère énigmatique des déterminants de l'action. Une des plus anciennes et familières théories de l'action est celle qui considère que toute action est déterminée par un but (un état à atteindre) et un plan (la conjonction d'actions nécessaires pour atteindre ce but). Cette théorie, appelée la théorie de l'action planifiée (AP), postule que la planification est une capacité fondamentale pour l'homme et un élément essentiel dans la vie quotidienne [Miller, 1960]. Par exemple, les individus planifient leurs voyages, les entreprises mettent en place un ensemble de plans pour maximiser leurs productions, etc. Cette vision basée sur la rationalité a inspiré plusieurs travaux dans différents domaines, tels que la recherche opérationnelle, l'intelligence artificielle, la psychologie, qui ont fait de la planification leur centre d'intérêt et le moyen indispensable pour représenter et simuler toute action. Il a donc été surtout question de développer des algorithmes de génération de plans, puisque l'action est principalement causée et contrôlée par un plan. A partir des années 80, plusieurs questions sur la pertinence du plan ont émergé, la plus fondamentale étant « Comment peut-on relier le plan (une représentation abstraite de la réalité conçue a priori) aux modalités concrètes de réalisation de l'action ? » Cette question générale a donné naissance à une autre théorie de l'action dite théorie de l'action située (AS) [Suchman, 1987], qui a redéfini les déterminants de l'action en termes de l'interaction *in situ* entre l'acteur et son environnement. Ce postulat est argumenté par le fait qu'une conceptualisation a priori de l'action n'est qu'un raisonnement détaché de la réalité. Cependant, lorsque l'acteur s'engage dans l'action, il n'y a plus ou peu de place pour les mécanismes cognitifs et de raisonnement sur l'action car l'acteur ne fait que saisir les opportunités d'actions offertes à lui par la situation dans laquelle il se trouve. Entre ces deux visions opposées de l'action, nous en trouvons encore une troisième qui découle de l'école soviétique de la psychologie : la théorie de l'activité (TA) [Vygotsky, 1930]. Cette fois-ci, l'action est

vue comme une structure hiérarchique complexe : activité, action, opération. Selon le niveau auquel on se place, les déterminants de l'action varient. Le niveau activité est déterminé par un but, le niveau intermédiaire (action) est déterminé par un plan, tandis qu'au niveau opération ce sont les conditions environnementales qui priment (nous détaillerons la structure hiérarchique de l'activité dans le paragraphe 1.1.3).

Le but de ce chapitre est de faire le tour de ces théories afin de nous permettre de répondre à la question : sur quelle théorie doit-on se baser pour représenter l'action au niveau opérationnel ? Ainsi, nous présentons ces théories en termes d'unité d'analyse et de déterminants de l'action dans l'ordre chronologique de leur apparition dans la littérature : théorie de l'activité, théorie de l'action planifiée, théorie de l'action située. Notre positionnement par rapport à ces théories sera présenté et argumenté dans le chapitre 5.

1.1 Théorie de l'activité

La théorie de l'activité (TA) trouve son origine dans l'école soviétique de la psychologie fondée par L. Vygotski pendant les années 1920 et développée par son successeur A. Leont'ev [Vygotsky, 1930, Leont'ev, 1978]. La TA se veut une théorie visant à créer des ponts entre les principaux courants des sciences humaines : le premier porte son étude sur l'environnement social et le deuxième est centré sur les actions individuelles en faisant l'impasse sur le contexte social. Plus précisément, la TA est un cadre conceptuel, philosophique et interdisciplinaire conçu pour l'étude des différentes formes de pratiques humaines en tant que processus développementaux, combinant le niveau individuel et le niveau social [Kuutti, 1995]. La philosophie générale de la TA est caractérisée par l'intégration de trois perspectives sur l'activité humaine qui sont objective, écologique et socioculturelle [Bourguin, 2000]. Elle se veut ainsi une théorie qui analyse les pratiques humaines dans leur environnement naturel en prenant en compte les facteurs culturels et le développement de l'esprit humain.

Le principe fondamental de la TA est celui de l'unité de la conscience et de l'activité. La conscience se réfère à l'esprit humain en général et l'activité à l'interaction avec la réalité objective. De ce point de vue, l'activité se caractérise à la fois par sa dimension interne (esprit) et sa dimension externe (interaction). La relation entre ces deux dimensions est réciproque dans le sens où l'une transforme l'autre. L'activité humaine est gouvernée par plusieurs caractéristiques, les plus novatrices étant celles développées par Vygotski [Vygotsky, 1930] : toute activité est orientée d'un sujet (acteur) vers un objet et est médiée par un artefact (figure 1.1).

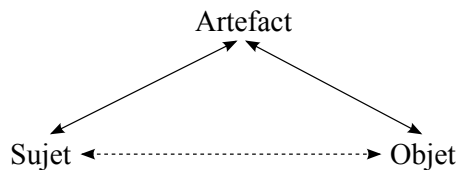


FIGURE 1.1 : La relation de médiation au niveau individuel entre le sujet et l'objet [Kuutti, 1995]. Les traits épais représentent la notion de médiation et le trait en pointillé indique la relation entre le sujet et l'objet.

1.1.1 Activité orientée vers un objet

Une activité est toujours dirigée vers un objet. Ce dernier est ce qui motive l'activité. Il peut être un objet matériel, mais il peut aussi être moins tangible (comme un plan) ou totalement intangible (comme une idée). Il est important de préciser que l'objet de l'activité ne constitue pas l'objectif ou le but de l'activité mais plutôt la motivation qui a conduit à l'activité. Par exemple, une infirmière a comme objet de son activité de prendre soin des patients. Ceci motive l'infirmière à effectuer des prises de sang, de mesurer la tension artérielle du patient, etc. Le but de son activité est la guérison du patient et non pas de prendre soin de son patient. Les activités se distinguent les unes des autres par leurs objets. Derrière cet objet, se trouve un désir ou un besoin qui peut être satisfait en réalisant l'activité [Nardi, 1995].

1.1.2 Médiation par artefact

Selon Vygotsky [Vygotsky, 1930], pour accomplir une activité, les acteurs font systématiquement appel à des artefacts. Ces derniers peuvent être matériels, tels que des machines, des instruments, des outils ou conceptuels (des outils pour penser) tels que des règles, les conventions, les plans, etc. L'utilisation de ces artefacts spécifiques à la culture de l'acteur considéré, façonne la manière dont les acteurs agissent. À travers le processus d'internalisation (cf. paragraphe 1.1.4) ils influencent grandement la nature du développement mental. De ce fait, les artefacts jouent plusieurs rôles dans le développement de l'activité : ils permettent de réaliser l'activité et de contraindre sa réalisation. D'autre part, les artefacts ont tendance à être transformés, modifiés ou adaptés en fonction des besoins de l'acteur durant l'activité. Nous pouvons remarquer ici une relation réflexive : d'une part les artefacts influencent l'activité, d'autre part, l'activité participe à leurs transformations. Par conséquent, les activités des acteurs créent de nouvelles conditions qui sont susceptibles d'influencer les activités futures. Il est important de mentionner que le concept de médiation par artefact est considéré comme étant le plus novateur de cette théorie. Il a permis de marquer une rupture avec l'idée que les activités se construisent seulement dans l'esprit et qu'elles sont complètement

détachées de l'extérieur. Ainsi, Engeström postule que « *The idea is that humans can control their own behavior—not 'from the inside', on the basis of biological urges, but 'from the outside', using and creating artifacts. This perspective is not only optimistic concerning human self-determination. It is an invitation to serious study of artifacts as integral and inseparable components of human functioning* » ([Engeström, 1999a] cité dans [Kuutti, 1995]).

Cette structure montre la relation entre un sujet et un objet qui est médié par l'outil que constitue l'artefact. Le sujet est l'acteur qui comprend l'objet de l'activité. L'objet est ce qui motive l'activité tandis que l'artefact est tout ce qui est utilisé dans le processus de transformation de l'objet. Cette structure est trop simple pour répondre aux besoins d'une prise en compte des relations entre un acteur et son environnement dans une activité. Pour cela [Engeström, 1999b] a ajouté une troisième composante à cette structure : la communauté (ceux qui partagent le même objet). Deux nouvelles relations sont alors formées : objet-communauté et communauté-sujet comme le montre la figure 1.4.

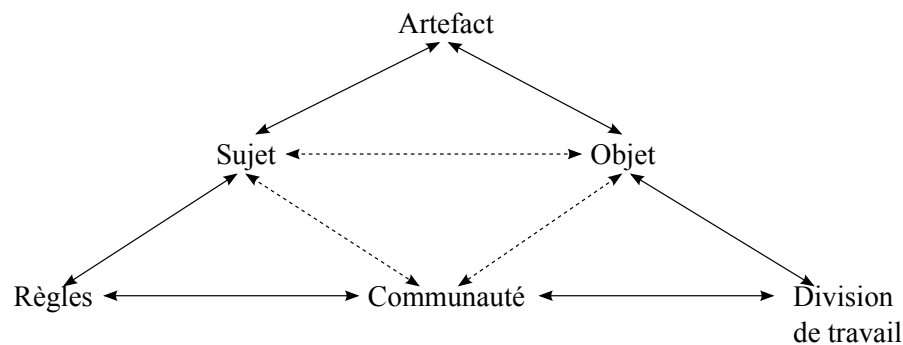


FIGURE 1.2 : Les structures de base de l'activité [Kuutti, 1995]. Les traits pleins représentent la notion de médiation et les traits pointillés indiquent la relation entre le sujet, l'objet et la communauté.

Ce modèle systémique contient trois relations mutuelles entre le sujet, l'objet et la communauté. La relation entre le sujet et l'objet est médiée par des *artefacts*, la relation entre le sujet et la communauté est médiée par des *règles* (ces règles ne constituent pas des artefacts car elles ne sont pas utilisées pour transformer l'objet de l'activité mais pour réguler la relation entre le sujet et la communauté) et la relation entre l'objet et la communauté est assurée par la *division du travail*. Les règles couvrent les normes explicites et implicites, les conventions et les relations sociales au sein d'une communauté. La division du travail fait référence à l'organisation explicite et implicite d'une communauté liée au processus de transformation de l'objet.

En plus des deux concepts de base introduit par Vygotski, Leont'ev [Leont'ev, 1978] a développé la deuxième génération de la TA où il a introduit deux autres concepts : la structure hiérarchique de l'activité et le concept d'internalisation/externalisation.

1.1.3 Structure hiérarchique d'une activité

L'activité est vue comme un système hiérarchique complexe comportant trois niveaux : activité, action et opération, (figure 1.3). L'activité est la racine de cette structure elle est motivée par un objet, la transformation de cet objet passe par un ensemble d'actions qui sont orientées vers un but conscient, une action à son tour est accomplie à travers un ensemble d'opérations qui sont déclenchées par un ensemble de conditions.

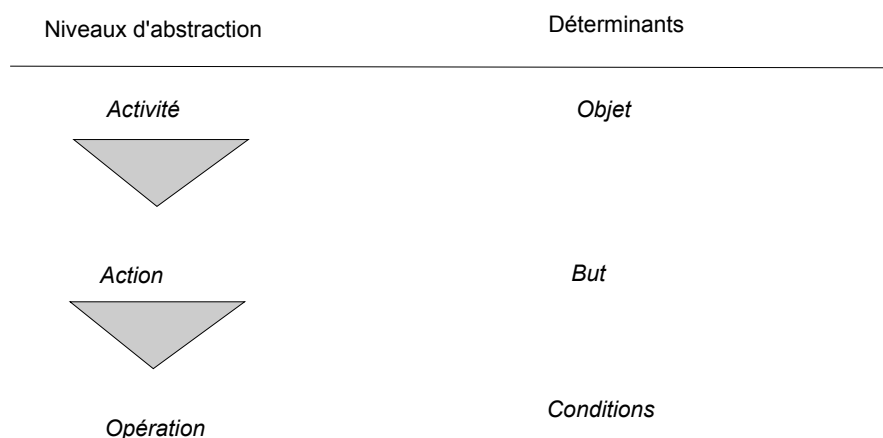


FIGURE 1.3 : Structure hiérarchique de l'activité.

Activité. Une activité est toujours motivée et se réalise à travers une série d'actions. Bardram [Bardram, 1997], précise qu'une activité est différente d'une action même si l'activité est constituée d'une seule action. Par exemple, pour un médecin spécialiste l'activité de diagnostic d'un patient peut être réalisée de différentes façons. Il peut utiliser le diagnostic présent dans le dossier du patient déjà effectué par le médecin généraliste. Ou bien il peut faire son propre diagnostic, en faisant appel aux examens cliniques (analyse de sang, radiographie, etc.). Dans cet exemple, il existe différentes actions médiées par des outils (comme le dossier du patient, les connaissances médicales du médecin) qui permettent de réaliser l'activité de diagnostic du patient.

Action. Une action peut être individuelle ou collective, elle est dirigée vers un but conscient et immédiat. Ce but est toujours contraint par l'objet de l'activité qui joue le rôle du contexte dans lequel l'action est créée. En dehors de son activité, une action ne peut être comprise. Une action peut participer à l'accomplissement de différentes activités [Bardram, 1997]. Elle peut donc avoir plusieurs interprétations de la part du sujet (l'acteur), chaque interprétation étant liée à une activité spécifique. Avant que l'action soit réalisée, elle est planifiée dans l'esprit de l'acteur, cette phase étant appelée « orientation ». Plus le plan établi est performant, plus le but de l'action a des chances

d'être atteint. Dans le cas contraire, l'acteur est contraint de revoir son plan et entre dans une phase d'analyse et d'apprentissage lui permettant de modifier son plan pour atteindre son but. Ce schéma de l'action est très proche des concepts cognitifs de mémoire de travail et de modèle mental que nous allons aborder dans la section 1.2.

Opération. Une action est accomplie via un ensemble d'opérations qui sont inconscientes. Ce sont des routines qui sont exécutées spontanément. Une opération peut être vue comme une action qui a été réalisée à une fréquence suffisante pour qu'elle devienne une routine où l'acteur n'a plus besoin de réfléchir, de planifier avant d'agir. Le seul facteur qui peut contraindre l'exécution d'une opération est ses conditions environnementales nécessaires à sa réalisation. Ainsi, Nardi [Nardi, 1995] donne l'exemple de la manipulation du levier de vitesses dans une voiture. Lorsqu'un acteur apprend à conduire, changer de vitesse est une action consciente, l'acteur a besoin de planifier son action. Cependant, avec la pratique cette action devient une opération car le changement de vitesse devient un automatisme. Néanmoins, lorsque les conditions courantes changent, si l'acteur n'est pas familiarisé avec ces nouvelles conditions alors l'opération peut redevenir une action car, selon la TA, l'acteur a besoin à nouveau de formuler un but et de reconsidérer son action dans la nouvelle situation et, par conséquent, de planifier à nouveau pour déterminer l'ensemble des opérations à réaliser.

Cette structure hiérarchique de l'activité est donc qualifiée de dynamique, et les limites entre les trois niveaux sont floues. Une action peut devenir une opération lorsqu'elle devient automatique. Inversement, une opération peut se transformer en action lorsque les conditions de sa réalisation deviennent difficiles à appréhender. Une action peut devenir une activité, lorsque son but devient le motif global de tout le système d'actions.

1.1.4 Internalisation/externalisation

La théorie de l'activité différencie les activités internes et les activités externes d'un acteur. L'internalisation est la transformation de l'activité externe dans l'esprit de l'acteur. Elle fournit les moyens aux acteurs d'interagir avec la réalité sans changer leur environnement. Il s'agit de la simulation mentale, de l'imagination, de la considération de solutions ou de plans alternatifs concernant l'activité extérieure. L'externalisation est la transformation de l'activité interne en une activité externe, c'est la concrétisation de l'activité interne qui engendre un changement dans l'environnement. La théorie de l'activité souligne qu'une activité interne ne peut être comprise si elle est analysée séparément de l'activité externe. Ceci est dû à la relation de réciprocité qui lie les deux activités. En d'autres termes, l'activité interne fournit un cadre général pour l'activité externe. L'activité externe transforme l'activité interne car elle permet à l'acteur d'augmenter

son expérience et sa compréhension de son environnement. Par conséquent ses processus mentaux se développent via l'utilisation des artefacts et l'observation du résultat de son activité externe.

Pour résumer, dans la TA l'acteur est, non seulement physiquement mais, aussi, culturellement et historiquement situé dans l'environnement. Ce dernier est crucial car l'activité d'un acteur n'est pas vue seulement comme le produit d'un processus mental mais elle est aussi guidée en grande partie par l'environnement dans lequel les artefacts et l'objet de l'activité résident. Le concept le plus novateur dans la TA est la médiation par artefact qui guide le comportement d'un acteur et participe au développement de ses processus mentaux.

Par ailleurs, l'aspect qui nous intéresse le plus dans cette théorie est la structure hiérarchique de l'activité. L'énoncé de cette structure, dans une première approche, permet d'ores et déjà de considérer des apports intéressants pour le niveau de l'action considéré dans nos travaux. En particulier, l'action au plus bas niveau (opération) se détache complètement de toute conscience ou but, et devient un acte régi par l'interaction de l'acteur avec son environnement. Ainsi, c'est à ce niveau que l'action transforme le système et cette même transformation va contraindre la suite de ses opérations futures. Nous pouvons remarquer une rétro-influence de ce niveau (opération) sur les autres niveaux du système d'activité. Car c'est à ce niveau qu'il est possible de valider le modèle d'action défini dans le niveau intermédiaire et ainsi de reconsidérer l'activité en sa totalité s'il s'avère que ce modèle ne peut mener au résultat attendu. Une première conclusion serait de considérer que les deux premiers niveaux de l'activité sont plutôt des étapes abstraites théoriques, le niveau le plus haut (activité) ayant pour rôle de mettre en place une stratégie à plus ou moins long terme, tandis que le niveau intermédiaire (action) a pour rôle de donner un cadre général au déroulement de l'ensemble des actions sans pour autant spécifier les détails concernant l'évolution du système ou les événements futurs. Le niveau le plus bas (opération) est celui qui permet finalement de répondre à l'une des questions posées dans ce travail, à savoir : « qu'est ce qui se fait maintenant et ici ? ».

1.2 Action planifiée

Nous trouvons dans le champ de la psychologie [Miller, 1960], des sciences sociales, de l'intelligence artificielle une panoplie de travaux qui considèrent que tout acteur planifie ses actions avant d'agir. Une action intelligente, selon ces courants, vise toujours à résoudre un problème par un processus de planification. Les actions sont dirigées vers un but, causées par celui-ci, et connectées aux connaissances sur le but. Pour atteindre ce

but il est impératif de construire un plan, défini par [Miller, 1960] comme étant « *any hierarchical process in the organism that can control the order in which a sequence of operations is to be performed* ». Cette définition met en avant deux caractéristiques du plan : sa structure hiérarchique et son rôle de contrôleur de l'action. La structure hiérarchique du plan est le résultat d'une conceptualisation de l'action (qui se reflète au niveau mental) selon différents niveaux hiérarchiques allant du niveau global ou stratégique jusqu'au niveau opérationnel en passant par le niveau tactique. Cette décomposition hiérarchique des actions et leur ordonnancement permettent d'obtenir un plan composé d'un ensemble de sous-plans. Le plan et les sous-plans permettent à la fois de piloter et d'exécuter les actions.

Le caractère du plan comme contrôleur de l'action est démontré par des boucles de rétroaction. Ces dernières jouent un rôle essentiel dans la réponse aux perturbations environnementales. Chaque plan et sous-plan est accompagné d'une boucle de rétroaction appelée TOTE qui signifie Test-Operate-Test-Exit [Miller, 1960]. Le fonctionnement de cette boucle est le suivant : il s'agit de tester si une action peut être réalisée à partir de l'état courant du système et du but ; s'il y a congruence, l'action est activée. Cette phase décrit en détail ce que l'acteur doit effectuer. Une fois l'action réalisée, le résultat sera encore une fois comparé au but (troisième phase de test). Si la configuration actuelle du système est compatible avec celle qui doit être obtenue (le but) alors l'action est terminée et une autre action peut éventuellement être entamée. Pour construire le plan, l'acteur a besoin d'une image. Ce sont des représentations symboliques complexes sur l'acteur lui-même et son environnement ainsi que les buts qu'il poursuit. Ces représentations symboliques sont les données qui alimentent le processus cognitif ou mental qui est à l'origine de la génération de plans.

L'unité d'analyse de l'action planifiée est donc l'esprit humain. Ainsi, Norman [Norman, 1993] postule que « *...there is a lot of action in the world at large and within sociocultural groups, but cognitive processing occurs within the heads of individuals. So, all we have to do is understand the internal mental processes and the nature of the input/output transformations of individuals, and we will have covered everything that matters* ».

En résumé les principes de base de l'action planifiée sont :

- le but pour lequel l'action est envisagée ;
- la représentation symbolique du monde ;
- le plan qui permet d'atteindre le but ;
- le processus cognitif qui produit le plan (planification).

En intelligence artificielle plusieurs travaux se sont inspirés de cette théorie pour construire des modèles d'action planifiée, afin de construire des systèmes intelligents pour simuler les actions dans différents domaines tels que la robotique, l'industrie,

l'agronomie, etc. Dans ce qui suit nous allons présenter le modèle de l'action planifiée rapporté par Brooks [Brooks, 1991a] appelé Sense(perception)-Model(modélisation)-Plan(planification)-Act(action) (SMPA), qui a été utilisé dans le domaine de la robotique. Il convient de préciser que Brooks a critiqué ce modèle (cf. chapitre 3 section 3.1.1), qui était l'archétype des travaux effectués à cette époque par la plupart des laboratoires de recherche en robotique afin de montrer ses limites. Mais le SMPA bien que dénommé ainsi par Brooks lui-même [Brooks, 1991a] ne constitue pas une proposition de cet auteur. Celui-ci fut au contraire un promoteur convaincu d'une approche d'agents résolument réactifs, au moins en robotique (voir son article dans *Artificial Intelligence Journal* de la même année [Brooks, 1991b]) Nous avons néanmoins choisi de présenter ce modèle SMPA, car il englobe les principaux concepts de l'action planifiée.

1.2.1 Modèle d'action planifiée

Perception. Le cycle commence par la perception des données sensibles relatives à l'état courant de l'environnement. Les entrées de la fonction « perception » sont les effets physiques de l'environnement sur le système. Les aspects de l'environnement qui ont besoin d'être détectés dépendent du degré de détail du modèle de l'environnement.

Modélisation. Cette étape consiste à fournir l'état courant de l'environnement sous la forme d'une représentation symbolique. Il s'agit d'associer aux différents objets de l'environnement des symboles et les relations qui existent entre eux, en utilisant, par exemple la logique du premier ordre. En d'autres termes, les entrées de ce processus sont les informations acquises via le processus de perception et la sortie est l'état de l'environnement sous forme d'une représentation symbolique.

Planification. Cette étape est la plus importante dans le modèle de l'action planifiée. Il s'agit, à partir de l'état courant de l'environnement et du but à atteindre (représenté aussi sous une forme symbolique) de produire une séquence d'actions, qui, si elles sont exécutées dans l'ordre prévu devrait conduire à une transformation de l'environnement vers l'état souhaité. Ainsi, la planification a fait l'objet d'une discipline à part entière dans le domaine de l'intelligence artificielle. Par conséquent, il existe une large littérature sur les algorithmes de planification [Garcia, 2004], dont nous allons présenter quelques-uns de façon succincte dans le paragraphe 1.2.2.

Action. Une fois le plan construit, il est exécuté par l'effecteur. L'exécution de cet ensemble d'actions est censée influencer l'état de l'agent et transformer l'état de l'environnement en l'état souhaité. Dans le cas où l'effet de l'action qui se concrétise par le

nouvel état de l'environnement ne correspond pas à l'état souhaité, l'agent retourne à la première phase du cycle afin de replanifier sa séquence d'actions.

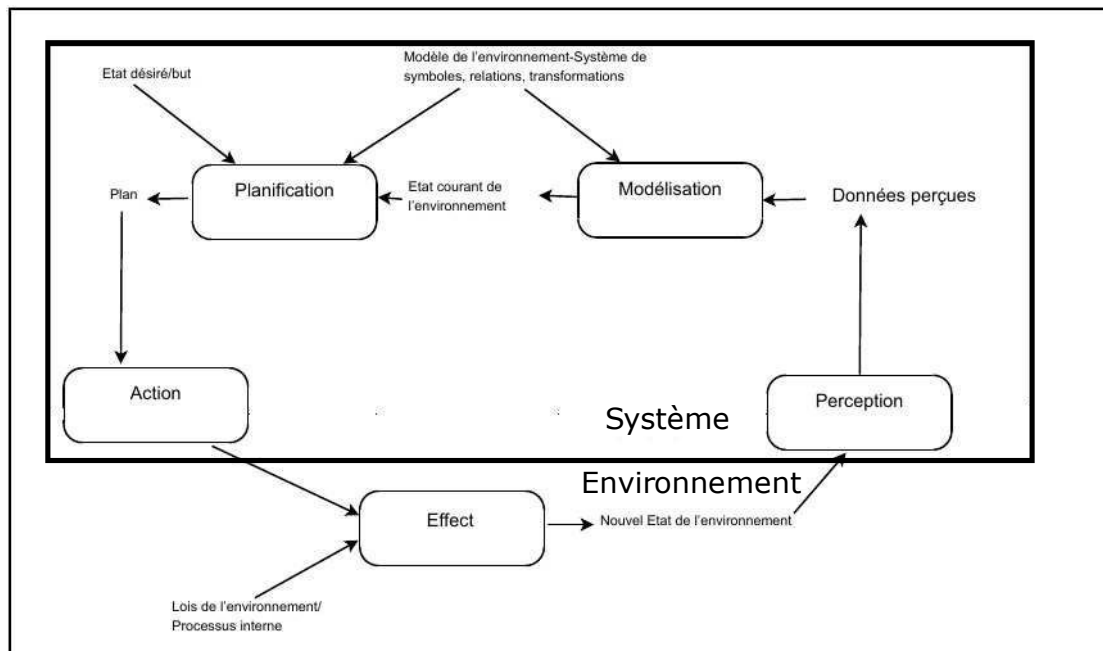


FIGURE 1.4 : Le Modèle SMPA d'après [Johnston, 1998].

1.2.2 Approches de planification

« *Planning is the reasoning side of acting* » [Ghallab et al., 2004]. La planification est un processus de délibération permettant de sélectionner et d'organiser les actions par anticipation de leurs résultats. La sortie de ce processus est un plan dont la composante principale est un ensemble d'actions. Cette dernière est définie par ses pré-conditions (qu'est-ce qui doit être vrai pour déclencher une action?), ses effets (qu'est-ce qui doit être vrai après son exécution?) et sa décomposition (quelles sont les sous-actions qui la composent?) [Allen, 1984]. Nous trouvons dans la littérature deux écoles de planification : les approches de planification classiques, qui opèrent en deux phases (i) la production du plan (ii) l'exécution du plan, et la planification non classique qui opère en entrelaçant l'étape de planification et l'étape d'exécution [Peot et Smith, 1992, Georgeff et Lansky, 1986]. Par conséquent les étapes *planification* et *action* dans le modèle SMPA sont parfois regroupées en une seule étape. Nous allons d'abord examiner plus en détail l'approche classique de planification (cf. 1.2.2.1) puis les approches de planification non-classiques (cf. 1.2.2.2).

1.2.2.1 La planification classique

Les premiers planificateurs classiques sont nés avec GPS (General Problem Solver) [Newell et Simon, 1963] et STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver) [Fikes et Nilsson, 1972] développés au début des années 60 qui sont basés sur l'approche d'analyse par les moyens et les fins d'Aristote (MEA) pour déterminer le plan. De façon générale le planificateur examine l'état final qui représente le but et tente de déterminer l'ensemble des actions qui permettront d'atteindre ce but. Cela produit de nouveaux sous-buts qu'il tente de résoudre et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il atteigne l'état initial. Ces premiers planificateurs présentent plusieurs inconvénients :

- le plan généré est un plan linéaire, où l'ensemble des actions sont exécutées dans un ordre séquentiel. Or, certains problèmes ne nécessitent pas un tel plan car les actions qui permettent d'atteindre le but peuvent ou doivent s'exécuter de façon parallèle.
- le plan est généré à partir d'un état de l'environnement à un instant donné et ne prend pas en compte l'évolution de l'environnement et les événements imprévus qui peuvent survenir pendant l'exécution du plan.
- le temps de recherche de la solution (i.e. la génération du plan) peut être très long. En effet, comme la taille de l'espace de recherche des algorithmes de planification croît de façon exponentielle avec la complexité de la tâche pour laquelle on cherche à établir un plan, on obtient un espace de recherche extrêmement large, ce qui donne des temps de recherche d'autant plus longs.

Pour pallier ces inconvénients, les auteurs de la communauté se sont dirigés vers une autre approche dite de planification non linéaire.

Planification non linéaire. La planification non linéaire vise à construire des plans qui soient partiellement ordonnés. En effet, certains problèmes ne nécessitent pas que les actions soient exécutées d'une façon séquentielle. Ce type de planificateur repose sur la méthode de moindre-engagement (least-commitment planning) [Etzioni et Weld, 1994], qui consiste à retarder le plus possible l'ordonnancement entre les actions et à ne déterminer aucune contrainte de séquentialité sauf quand cela s'avère indispensable pour l'exécution du plan. Les avantages principaux de ces plans sont que l'ordre d'exécution des actions qui restent non ordonnées peut être choisi ultérieurement (en fonction, par exemple, de contraintes supplémentaires imposées par l'exécution) ou que ces actions peuvent éventuellement être exécutées en parallèle. Même si cette approche permet de pallier quelques inconvénients de la planification linéaire, il reste néanmoins le problème du temps de recherche de plan qui s'avère toujours long avec cette approche.

Par conséquent, une autre approche de planification, dite planification hiérarchique a émergé.

Planification hiérarchique. La planification hiérarchique a été utilisée à l'origine pour réduire la taille de l'espace de recherche du plan. Il s'agit de produire un plan comportant les actions élémentaires par affinement successif du plan initial suivant différents niveaux de détails ou d'abstraction. ABSTRIPS [Sacerdoti, 1974] est le premier planificateur qui a été développé en utilisant la méthode hiérarchique. La hiérarchisation dans ABSTRIPS consiste à attribuer des valeurs aux pré-conditions des règles d'action décrivant pour chaque action sa difficulté à être réalisée. Ces valeurs sont déterminées par le concepteur de la base de connaissances en fonction de l'effort (nombre d'actions) qui semble nécessaire pour obtenir la satisfaction de la pré-condition considérée. A chaque étape de planification, ABSTRIPS ne considère que les pré-conditions dont les valeurs sont les plus élevées. Il génère le plan complet à ce niveau tout en ignorant les pré-conditions dont les valeurs sont moins élevées. Ce plan sera repris par la suite et affiné en prenant en compte les pré-conditions de niveau inférieur et ainsi de suite jusqu'à obtenir un plan final ne contenant que des actions primitives. L'inconvénient principal de cette approche de planification est qu'elle ne peut prendre en compte qu'un nombre limité d'incertitudes car il n'est pas possible d'anticiper tous les imprévus possibles.

1.2.2.2 Au delà des approches classiques

Un des problèmes majeurs des approches de planification classiques, est la non prise en compte des changements qui peuvent surgir dans l'environnement. Ces approches de planification procèdent généralement en deux phases [Georgeff et Lansky, 1986] : la première consiste à construire le plan et la deuxième consiste en son exécution. L'exécution est souvent contrôlée pour s'assurer que le plan permet d'atteindre le but visé. Dans le cas contraire (si le plan actuel n'a pas abouti à l'objectif), on revient à la phase de construction pour tenter de modifier le plan. Cette replanification présente plusieurs inconvénients. Dans la majorité des domaines, une grande partie des informations nécessaires à l'accomplissement d'un objectif n'est acquise que durant la phase d'exécution du plan. Par exemple, planifier une trajectoire pour se rendre d'un point A à un point B, dépend fortement des événements rencontrés en chemin. Aussi, les approches classiques de planification restent coûteuses en terme de temps de calcul car elles sont amenées à replanifier souvent. Ces types d'approches peuvent être adéquats dans le cas d'un environnement statique dont la connaissance est totale, mais ils sont inadéquats dans le cas d'un environnement qui évolue dynamiquement, indépendamment du planificateur, dont la planification doit être calculée en un laps de temps fini et dont les

objectifs changent en cours d'exécution. Pour cela, d'autres approches de planification ont été proposées où, cette fois-ci, l'algorithme de planification ne prend pas seulement en compte l'état initial et le but à atteindre, mais aussi les observations sur l'évolution de l'environnement pendant l'exécution du plan. Parmi ces approches, nous trouvons la planification conditionnelle et la planification réactive.

Planification conditionnelle. Cette approche a été développée dans l'optique de prendre en compte les incertitudes de l'environnement. Avant l'exécution d'un plan ou d'une action, le planificateur teste l'environnement pour s'assurer que la séquence d'actions qu'il s'apprête à réaliser est appropriée à la situation courante (état de l'environnement courant). Cependant, il ne s'agit pas de replanifier lors de l'exécution mais plutôt de développer lors de la phase de planification un ensemble de plans alternatifs pour pallier un certain nombre d'incertitudes. Ainsi, lors de la phase d'exécution, les cas d'incertitudes traités en phase de planification peuvent être pris en compte sans être obligé de replanifier. Parmi les planificateurs conditionnels, nous pouvons citer CNLP [Peot et Smith, 1992], qui permet de générer un plan non-linéaire et Warplan-C [Warren, 1996], qui produit des plans linéaires.

Planification réactive. Contrairement à la planification conditionnelle où les incertitudes sont prises en compte lors de la conception du plan, la planification réactive consiste à entrelacer la phase de construction du plan et la phase de son exécution. Dans ce type de système la décision pour exécuter une action est différée le plus longtemps possible, ce qui permet à l'agent d'acquérir le plus d'informations possibles avant d'agir. Parmi ces systèmes nous trouvons le système de raisonnement procédural PRS (procedural reasoning system) [Georgeff et Lansky, 1986]. PRS présente une approche de planification réactive basée sur l'approche BDI (Beliefs, Desires, Intentions. Nous reviendrons sur cette approche dans le chapitre 3, paragraphe 3.1.1) qui permet d'offrir à l'agent la capacité d'agir de façon appropriée dans un environnement dynamique. Le plan n'est plus défini à l'avance et modifié si besoin, mais il est généré pendant son exécution même. A un instant donné, PRS génère seulement un plan partiel en fonction de l'état du monde qui permet d'atteindre le prochain sous-but ou de réagir à certaines situations. Georgeff donne l'exemple d'un robot dans une station spatiale qui joue le rôle d'assistant astronaute. Si on lui demande d'apporter un objet (e.g., une clé), le robot doit déterminer où se trouve l'objet et planifier son chemin pour l'atteindre. Si pendant l'exécution de son plan le robot détecte un dysfonctionnement d'une lampe pour l'un des réacteurs du système de contrôle de stabilisation de la station spatiale, dans ce cas, il peut juger que la priorité n'est plus de trouver la clé mais de réparer le dysfonctionnement. Pour cela le robot doit non seulement être capable de planifier et d'exécuter

son plan mais aussi de l'interrompre voire de l'abandonner quand les circonstances le demandent. Cette réactivité permet de relativiser l'importance du plan préétabli, qui est le reproche principal adressé à la planification classique. Depuis l'apparition de cette approche, plusieurs planificateurs sont apparus tels que : Universal plans [Schoppers, 1987], The SPARK agent framework [Morley et Myers, 2004].

1.2.3 Adéquation des approches de planification à nos objectifs

En se replaçant dans notre problématique qui consiste principalement à représenter l'action au niveau opérationnel, nous devons préciser que les systèmes pris en considération, en l'occurrence les systèmes agricoles sont contrôlés en partie par les pratiques agricoles, mais aussi par des flux biophysiques [Guerrin, 2009] et d'autres facteurs difficiles à prévoir tels que la météo. Ceci démontre que leurs évolutions peuvent être difficiles à anticiper. Par conséquent, de prime abord, nous pouvons écarter les approches de planification classiques.

L'approche de planification conditionnelle permet de prendre en compte les incertitudes et les éventuels imprévus. Cependant, elle se base sur l'anticipation de ces événements, ce qui requiert du système sur lequel on agit qu'il soit peu évolutif, car il n'est pas possible d'envisager tous les cas d'incertitudes possibles lors de la conception du plan. De plus, pour le peu de situations qui peuvent être anticipées, ces plans sont coûteux à générer et à manipuler. Cette approche est donc également exclue pour les systèmes agricoles auxquels on s'intéresse.

La planification réactive présente plus de souplesse et est moins coûteuse que la planification conditionnelle quant à la génération de plans. En effet, l'approche réactive ne génère pas un plan unique complexe mais produit plutôt, pour chaque situation rencontrée, un plan partiel (action ou séquence d'actions) à réaliser. Cependant, la réévaluation de chaque état de l'environnement ou situation requiert un usage important des données issues de la perception qui peuvent mettre du temps à être traitées. Ceci peut être acceptable pour des domaines de taille restreinte mais s'avère moins approprié pour des systèmes complexes. Néanmoins, cette approche semble la plus adéquate conceptuellement pour notre problématique du fait que l'action est considérée comme couplée à son environnement. Nous allons voir dans la section suivante une autre théorie de l'action qui clarifie l'importance de la relation entre l'action, l'acteur et son environnement.

1.3 Action située

Le point commun entre la théorie de l'activité (TA) et l'action planifiée (AP) est la notion de plan et le processus cognitif permettant de le générer. Cependant, ces deux théories divergent sensiblement quant à la connexion causale entre le plan et l'action. Dans la TA, le plan est vu comme un des contrôleurs de l'action, mais au niveau le plus bas (opération), le plan cède sa place aux conditions environnementales qui contraignent les opérations. Dans l'AP, le plan est indispensable à la réalisation de l'action. Dans cette section, nous allons présenter une vision de l'action qui diffère complètement des deux premières où cette fois-ci, le déterminant de l'action est orienté vers l'interaction acteur/-situation. Cette théorie vient principalement contester la vision planifiée de l'action.

La réflexion sur la notion d'action située trouve en partie ses origines dans les travaux de Dreyfus [Dreyfus, 1972]. Dreyfus après avoir critiqué la vision de l'intelligence comme un système symbolique de traitement de l'information, a proposé une autre vision d'un comportement intelligent qui se base sur les deux principes suivants : (i) le rôle du corps dans l'exercice de l'intelligence, (ii) la situation, conduite ordonnée sans recours à des règles et fonction des besoins de l'être humain. Cependant, la théorie de l'action située a été approfondie par Lucy Suchman et vulgarisée grâce à la publication de son livre *Plans and situated actions* [Suchman, 1987]. L'action située a émergé comme alternative à la notion d'action planifiée. Suchman a remis en cause cette vision en postulant que pour comprendre et représenter l'action humaine, il faudrait étudier comment les acteurs utilisent les circonstances qui les entourent pour réaliser une action intelligente. Plus précisément l'unité d'analyse de l'action située est la relation entre la situation et l'action. La thèse principale défendue par le courant de l'action située est qu'une action ne peut être comprise en dehors de sa situation réelle. C'est pourquoi, il a été proposé de s'intéresser à l'observation des situations dans lesquelles s'insère l'action réelle. Ceci permet d'expliquer la relation entre l'action, les ressources et les contraintes offertes par les circonstances physiques et sociales que rencontre l'acteur [Suchman, 1987]. Ainsi, contrairement à l'action planifiée où l'action est contrôlée par un plan, dans l'action située c'est la situation qui cause et contraint l'action. Cependant, la vision de l'action située ne refuse pas la notion de plan mais, plutôt, clarifie son rôle, lorsque celui de la situation est reconnu. Le plan est considéré comme une ressource qui permet aussi de guider l'action sans pour autant la contrôler totalement. Suchman, dans son exemple de la descente de rivière en canoë, présente le cas d'un canoéiste sur le point de descendre une série de rapides. Le canoéiste peut être amené à planifier son parcours à l'avance. Cependant, lorsqu'il s'engage dans la descente, son plan ne pourra pas être appliqué tel qu'il a été établi car les contingences qui apparaîtront au cours de l'action sont imprévisibles au départ. Ici le plan sert de cadre général pour entamer la descente, il spécifie les actions

de façon globale. Les détails des actions restent inconnus jusqu'au moment où l'acteur entre en interaction avec son environnement (« est en situation »). L'autre particularité de cette théorie est que, de façon paradoxale, le but (déterminant essentiel dans l'AP) d'une action émerge pendant celle-ci. C'est un résultat de l'action et non une donnée a priori. Ceci est argumenté par le fait que l'action même ne pouvant être connue a priori, il est donc difficile de définir son but comme intangible. La question qui peut être posée ici est : « quel est le rôle du but, s'il n'est pas utilisé pour guider l'action ? » Le but dans l'action située sert à expliquer a posteriori ce qui s'est passé, c'est-à-dire les actions qui ont été exécutées et leur logique d'exécution. Une autre question peut être posée : s'il n'y a pas de but défini à l'avance, comment peut-on savoir si l'action est terminée ? Supprimer ou modifier la notion de but peut certes paraître non familière mais, dans la théorie de l'action située, l'exécution d'une action modifie la situation dans laquelle elle se trouve. Lorsque la situation n'est plus favorable à l'exécution de l'action en cours, celle-ci prend fin et une autre action peut éventuellement émerger, si la situation lui devient favorable. Par conséquent, selon les partisans de l'action située, le but n'est pas un déterminant de l'action, il peut la guider accessoirement mais il ne participe pas essentiellement à sa construction.

1.3.1 Les principes de l'action planifiée contestés

Les tenants du courant situé contestent trois principes essentiels dans la description des actions selon le courant de l'action planifiée [Quéré, 1997] : l'approche symboliste de la cognition, la perception et la modélisation de l'action

L'approche symboliste de la cognition : mentalisme, représentationnalisme et computationnalisme.

- Mentalisme : l'esprit n'est plus vu comme un organe interne détaché du monde externe ;
- Représentationalisme : l'AS conteste la cognition vue comme une représentation interne du monde externe ; un comportement intelligent ne peut être médié par une représentation symbolique portant sur les buts par exemple ;
- computationnalisme : il s'agit de remettre en cause l'idée que penser c'est calculer, raisonner, inférer.

La perception : vue par les cognitivistes classiques comme indirecte. En effet, du fait que l'esprit n'est pas en contact direct avec le monde extérieur mais reçoit des informations via des organes sensoriels, ces informations étant incompréhensibles en l'état, il faudrait alors une représentation interne et un processus d'interprétation permettant d'inférer le sens des informations reçues. Ainsi, la perception aussi

fait l'objet d'un processus complexe qui a comme siège l'esprit. L'AS revendique qu'au contraire la perception est un processus direct, intuitif, ne nécessitant ni représentation préalable ni raisonnement ou délibération.

La modélisation de l'action : l'AS remet en cause la modélisation de l'action sous forme de plan comme nous l'avons vu dans la section précédente et sa réalisation comme une résolution de problème : « *All human activity is purposeful. But not every goal is a problem to be solved* » [Clancey, 2002].

1.3.2 Modèle de l'action située

Si les notions de plan, but et raisonnement sont contestées quels sont alors les concepts développés par le courant de l'action située pour représenter l'action humaine ? Dans le modèle situé, certains concepts que l'on trouve dans l'AP tels que, la perception et l'action sont toujours présents mais selon une autre conception. Néanmoins, d'autres qui sont considérés bien spécifiques à la planification sont écartés, en particulier la représentation symbolique de l'environnement, le plan et le processus de raisonnement. Ces derniers sont remplacés par les concepts de situation et d'interaction acteur/environnement. L'idée de base est d'implémenter une boucle de rétroaction entre la perception et l'action sans faire intervenir l'étape de modélisation de l'environnement et de raisonnement (planification dans le modèle SMPA). Cependant, contrairement à l'AP où il est possible de trouver un modèle « générique » tel que celui présenté dans la section 1.2.1, dans l'AS il n'existe pas de consensus entre les tenants de l'AS et, par conséquent, il n'existe pas de modèle générique de l'action située. Pour cela, nous allons donner dans ce qui suit la définition des concepts clés d'un modèle de l'AS.

1.3.2.1 Situation

Le concept le plus novateur de cette théorie est sans doute la notion de situation. McCarthy [McCarthy et Hayes, 1969] définit la situation comme étant « *a limited portion of the world over some location and time* ». La situation de ce point de vue est une capture de l'état de l'environnement à un instant donné et dans une localisation donnée. Cependant, cette définition n'est pas complète car elle ne fait pas référence à l'acteur impliqué dans cette situation. Or, la différence principale entre la notion de situation et la notion d'état de l'environnement utilisé dans l'AP, est que la situation c'est l'état de l'environnement du point de vue de l'acteur qui interagit avec celui-ci, créant ainsi la situation à laquelle il participe. C'est ce caractère de subjectivité qui marque la plus importante différence entre l'état de l'environnement utilisé dans la vision de l'action

planifiée et la situation dans l'action située. Ceci signifie que deux acteurs de même nature au même endroit géographique et au même instant ne perçoivent pas forcément leur situation de la même manière. Il en résulte que leurs actions peuvent être différentes. Le fait de considérer la situation ainsi, a un impact considérable sur la modélisation de l'action. En effet, des éléments autres que l'ensemble des objets qui constituent l'environnement et la relation entre eux viennent s'ajouter. Parmi ces éléments nous pouvons parler des capacités d'action de l'acteur ou encore de ce qui est pertinent à prendre en compte pour réaliser une action dans cette situation. La situation n'est donc pas « objective » et ne peut être représentée en faisant abstraction de l'acteur. Un autre aspect important de la situation est son caractère temporel. Une situation n'est pas vue juste comme une capture à un instant t mais comme quelque chose dotée d'une épaisseur temporelle [Quéré, 1997], dans le sens où elle possède une date de début, une durée et une date de fin. La situation n'est donc pas figée, bien au contraire, elle évolue, elle se transforme suite aux actions des acteurs.

1.3.2.2 Représentation des connaissances

Un des arguments des tenants de l'action située est que la représentation de l'action ne nécessite pas la médiation d'une représentation symbolique des connaissances. Cependant, ce postulat ne signifie pas l'élimination totale de toute représentation mais plutôt ce qui est remis en cause c'est la façon dont l'environnement est représenté. Ainsi, Agre [Agre, 1997] revendique que les représentations ne nécessitent pas d'être symboliques mais plutôt déictique ou indexicale (deictic, indexical- functional). Les termes indexicaux comme « ici », « maintenant », « après-demain » requièrent des connaissances sur la localisation et l'époque de l'acteur pour permettre de déterminer leurs significations. En d'autres termes ce sont des descriptions des caractéristiques de l'environnement du point de vue de l'acteur. L'aspect fonctionnel de ce type de représentation signifie que les objets de l'environnement sont représentés en relation avec les actions que l'acteur veut entreprendre. Ce type de représentation a été utilisé dans la conception du fameux simulateur « Pengi » développé par Agre et Chapman [Agre et Chapman, 1987] et qui s'est avéré intéressant en permettant d'éviter les problèmes liés à la manipulation symbolique des connaissances.

1.3.2.3 Perception

L'action se situe ici dans l'interaction entre l'acteur et l'environnement. Le processus de perception dans l'AS n'est plus vu comme une tâche cognitive complexe mais plutôt

comme une tâche simple via laquelle l'acteur se procure l'information sur ce qui l'entoure directement. L'étape d'interprétation des percepts utilisée dans le modèle planifié a été remplacée par la redistribution des informations nécessaires pour l'action dans l'environnement. La théorie de l'action située repose donc sur une théorie de perception directe. Le chapitre 2 est dédié à cette théorie de perception directe et la manière dont les indicateurs pour l'action peuvent être représentés.

1.3.2.4 Action

Dans les modèles d'action située, les actions sont déclenchées en réponse à la situation à laquelle participe l'acteur. La connexion causale entre le plan et l'action a été donc remplacée par la situation et l'action. Cependant, ce postulat a introduit une confusion que nous trouvons souvent dans la littérature entre l'action située et l'action réactive définie généralement par le schéma stimulus/réponse. Cette confusion est due à deux facteurs : d'une part à l'importance du rôle de l'environnement dans la construction de l'action avancée par le courant situé. D'autres part, à la volonté excessive de « certains » tenants du courant situé de marquer la différence avec le modèle de l'action planifiée.

Pour répondre au premier point, il existe une différence entre la notion de situation et d'environnement. Cette différence peut être expliquée par le postulat de Lave [Lave, 1988] concernant la donnée et le créé. Pour définir la situation, Lave utilise deux concepts : *l'arena* et le *setting*.

L'arena, fait référence à l'environnement objectif, c'est la situation « donnée ». Le *setting*, représente la situation construite du fait de l'action de l'acteur et telle qu'elle est comprise par l'acteur qui « la crée ». Lorsqu'on définit une action uniquement en lien avec l'environnement objectif (*l'arena*) sans faire intervenir l'acteur, ceci conduit à une action réactive. Dans ce cas, l'environnement est le seul contrôleur de l'action. Cependant, lorsqu'on définit l'action en lien à la fois avec l'environnement et l'acteur, la notion de subjectivité apparaît et l'action qui émerge est singulière : unique et propre à l'acteur en question. L'environnement dans ce cas est considéré comme l'ensemble des ressources pour l'action et non comme son contrôleur.

Concernant le deuxième point, suite aux nombreuses critiques attribuées à la cognition classique, toute notion de mémoire, représentation ou encore raisonnement a été rejetée. Ce qui a donné naissance à de nombreuses architectures où le comportement du système est défini par un ensemble de règles de type « stimulus/réponse ». Cependant, l'existence d'une mémoire ou d'un état interne ne suppose pas forcément qu'un système utilise une représentation symbolique. D'ailleurs la théorie de l'action située ne rejette pas la notion de plan et par conséquent ne peut rejeter la notion de mémoire [Suchman, 1987, Clancey, 1997, 2002].

Finalement, une action réactive n'est qu'un type particulier d'action située. Pour représenter une action de façon située, il ne s'agit pas simplement de définir une structure contenant toutes les actions possibles en réponse aux situations qui peuvent être rencontrées mais plutôt, il s'agit de concevoir comment l'on peut représenter une situation en cours du point de vue de l'acteur qui y est impliqué, pour, finalement, détecter l'action qui émerge.

En résumé l'action située se base sur les principes suivants :

- une action est vue comme un processus qui émerge de l'interaction acteur/environnement ;
- la situation est vue comme propre à chaque agent interagissant avec son environnement ;
- il existe une connexion directe entre les informations perçues et l'action. Ce processus ne fait pas usage de représentations symboliques (but, état actuel du monde, anticipation des états futurs, ou raisonnement sur les actions).
- les plans ou toute autre représentation a priori de l'action ne constituent qu'une ressource pour l'action, non son déterminant.

1.4 Conclusion

Ce tour d'horizon a été motivé par notre préoccupation à comprendre les déterminants de l'action. Dans la théorie de l'activité, il s'agit d'une conceptualisation à plusieurs niveaux. Le niveau activité est déterminé par son motif, le niveau action est déterminé par le plan tandis que le niveau opération est déterminé par l'environnement. Nous trouvons une similarité entre cette hiérarchisation de l'activité avec les niveaux de décision définis en gestion de production : le niveau stratégique, tactique et opérationnel. Au niveau stratégique, son rôle est de déterminer les objectifs à long terme. Au niveau tactique, elle consiste à définir l'ensemble des actions et les ressources nécessaires à leur exécution. Le niveau opérationnel représente l'horizon à court terme où l'on concrétise ce qui a été décidé auparavant. Les deux premiers niveaux ont fait l'objet de nombreux modèles de l'action, ils ont montré leurs avantages et leurs limites. Parmi les limites de ces modèles, l'écart qui peut exister entre ce qui est simulé et la réalité [Vayssières *et al.*, 2007]. Ceci est dû au peu d'intérêt donné au niveau opérationnel [Clancey, 2002, Johnston, 1998]. C'est-à-dire aux actions concrètes qui opèrent plutôt à court terme et en situation réelle. Le niveau opérationnel de la théorie de l'activité nous a permis déjà de prendre conscience de l'importance de l'influence de l'environnement sur les actions et de relativiser l'importance de la notion de but, plan et mécanismes cognitifs du niveau de l'action, par définition planifiée et essentiellement utilisés dans le modèle classique de

l'action planifiée.

Pour la théorie de l'action planifiée, les déterminants de l'action sont principalement le plan, le but et le mécanisme cognitif sous-jacent. Bien que cette vision reste la plus classique, elle est difficilement adaptée aux systèmes dont les dynamiques sont difficiles à contrôler parce que soumises à de nombreux aléas par définition quasi-imprévisibles. Les nouvelles approches de planification réactive en sont témoins. L'action située propose de voir l'action comme un processus qui émerge *in situ* de l'interaction entre l'acteur et son environnement. L'accent cette fois est mis sur les situations créées conjointement par l'acteur et son environnement et qui causent l'action. Cette théorie met en lumière les actions dont le caractère *ad-hoc* et improvisé est présent. Par ailleurs, du moment qu'elle ne rejette pas la notion de plan, elle permet aussi d'englober les types d'actions rationnelles défendues par le courant planifié.

La théorie de l'action située et la théorie de l'action planifiée proposent deux visions opposées de l'action. Nous retrouvons ces deux visions au sein de la théorie de l'activité. En effet, l'action selon la théorie de l'action planifiée correspond finalement au niveau action de la théorie de l'activité, tandis que l'action selon la théorie de l'action située peut être assimilée au niveau opérationnel de la théorie de l'activité.

Comme nous l'avons indiqué en introduction, notre contribution vise à représenter les actions humaines au niveau opérationnel. L'acteur à ce niveau, agit principalement en fonction de la situation à laquelle il participe. En effet, pendant les actions quotidiennes, les stratégies, les plans et toutes descriptions des modalités de l'action deviennent un cadre abstrait et théorique pour la conduite des actions. L'acteur est contraint de s'adapter et de répondre à ce qui l'entoure. Pour cela, nous nous basons dans ce travail sur la théorie de l'action située. Notre but est de modéliser l'action au niveau opérationnel de façon située. Nous argumenterons ce positionnement plus en détail dans le chapitre 5.

Chapitre 2

Le concept d’affordance

Nous avons vu dans le chapitre précédent trois théories différentes de l’action. Nous avons conclu que la vision située de l’action est a priori la mieux adaptée pour modéliser l’action au niveau opérationnel. Ainsi, Suchman [Suchman, 1987, 2003] postule que les ressources de l’action sont ancrées dans l’environnement. La question qui peut être posée ici est comment peut-on modéliser l’action en exploitant les ressources présentes dans l’environnement ? Une approche possible est d’invoquer le concept d’affordance de Gibson [Gibson, 1986] et d’aborder la notion de situation dans cette perspective. Gibson postule que l’environnement contient des indices appelés *affordance* qui fournissent les possibilités d’actions qui se présentent de façon spontanée à l’acteur [Gibson, 1986]. Les affordances étant signifiantes et directement perçues par l’acteur, le dispensent d’un traitement lourd des informations nécessaires à l’action et lui permettent d’adopter un comportement en adéquation avec son environnement [Quéré, 1997]. Dans ce qui suit nous présentons le concept d’affordance selon Gibson ainsi que les caractéristiques des affordances pertinentes pour la représentation de l’action située. Nous présentons ensuite différentes manières de représenter l’affordance selon différents points de vue publiés dans la littérature [Turvey, 1992, Chemero, 2003, Stoffregen, 2003]. Le concept d’affordance a été utilisé dans de nombreux travaux dans le domaine des SMA, notamment pour des problématiques liées à la navigation de piétons [Raubal et Moratz, 2008], pour la simulation du trafic routier [Ksontini, 2013] ou pour la simulation de l’interaction agent-environnement appliquée aux opérations militaires [Papasimeon, 2009]. Pour clarifier le concept d’affordance, nous nous limitons dans ce chapitre à présenter les travaux de [Raubal et Moratz, 2008] et de [Papasimeon, 2009].

2.1 L'affordance selon Gibson

Le concept d'affordance trouve son origine dans les travaux du psychologue gestaltiste Koffka [Koffka, 1935]. Koffka postule que percevoir un objet c'est percevoir aussi bien ses caractéristiques physiques (sa couleur, sa forme géométrique...) que sa signification et sa valeur.

« *Each thing says what it is and what he ought to do with it : a fruit says, Eat me ; water says, Drink me ; thunder says, Fear me, and woman says, Love me* » [Koffka, 1935, p. 7].

Cependant, ce concept caractérisé « *d'écologique* » a été approfondi par Gibson pendant ses travaux sur la vision comme perception directe [Gibson, 1986]. L'hypothèse de la perception directe est que ce processus n'a nullement besoin d'une représentation symbolique de l'environnement dans l'esprit de l'acteur, ni d'un mécanisme d'inférence permettant d'extraire le sens des percepts. Bien au contraire, une sollicitation provenant de l'environnement est perçue de façon directe compte tenu des caractéristiques de l'acteur. Ainsi, Gibson postule « *When I assert that perception of the environment is direct, I mean that it is not mediated by retinal pictures, neural pictures, or mental pictures* » [Gibson, 1986, p. 147]. En se basant sur cette conception de la perception, Gibson introduit le terme *affordance* qui vient du verbe anglais *to afford* qui signifie *s'offrir, se permettre, fournir*. Une affordance dans son acception d'origine, fait référence à l'ensemble des possibilités d'action offertes à l'acteur par les objets situés dans son environnement. Ce concept considère que l'acteur et son environnement constituent un couple complémentaire. L'étude des comportements des acteurs ne doit pas se faire indépendamment de leur environnement.

Par exemple, une surface rigide et horizontale « *afforde* » un acteur à marcher, une chaise *afforde* une personne à s'asseoir tandis qu'elle *affordrait* une fourmi à y grimper. Bref, l'environnement est rempli d'objets qui peuvent afforder un acteur à réaliser différentes actions.

Par ailleurs, bien qu'il y ait un consensus sur ce qu'on entend par affordance au sein de la communauté de la psychologie écologique, il existe un débat autour de la question « *où se situe exactement l'affordance dans le couple acteur/environnement ?* » ainsi que sur sa nature exacte [Luyat et Regia-Corte, 2009]. La section suivante présente quelques définitions du concept d'affordance que nous avons recensées dans la littérature. Nous porterons une attention particulière à la question de l'emplacement des affordances au niveau du couple acteur/environnement. La réponse à cette question a un impact sur la modélisation des affordances et, par conséquent, sur la représentation de l'action.

2.2 Autres définitions de l'affordance

2.2.1 La formalisation de Turvey

Turvey [Turvey, 1992] est l'un des premiers auteurs à avoir tenté d'éclaircir le concept d'affordance. Il définit l'affordance comme étant un ensemble de caractéristiques « *dispositionnelles* » (dispositional en anglais) des objets de l'environnement qui sont latentes ou possibles. Dispositionnelle, signifie que les objets de l'environnement manifestent certaines propriétés à un instant donné en fonction des circonstances courantes. L'affordance se réalise si un acteur possède une capacité d'action² qui complète celle de l'objet de l'environnement. Ainsi, Turvey propose le formalisme suivant :

Supposons un système W_{pq} composé d'un ensemble d'acteurs Z et d'un ensemble d'objets X . p et q sont respectivement des propriétés de X et Z . p est dite une affordance de X et q une effectivité (capacité d'action) de Z , si et seulement si il existe une troisième propriété r tel que :

- i) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ possède r
- ii) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ ne possède ni q ni p
- iii) ni X ni Z ne possède r ,

où j est la fonction de juxtaposition qui, à partir des propriétés p et q de l'environnement et de l'acteur définit l'action r à entreprendre. Pour Turvey, l'action r va être forcément réalisée lorsqu'il existe une propriété de l'environnement qui « *matche* » avec une capacité d'action de l'acteur. Cependant ceci est en contradiction avec le concept d'affordance de Gibson, pour qui une affordance est une action possible en soi. Il en résulte, qu'elle peut être réalisée ou non. De plus, il est possible qu'un acteur se trouve face à plusieurs affordances dans la même situation, alors qu'au moins certaines de ces actions ne peuvent probablement pas être réalisées en même temps. Ainsi, la définition de Turvey considère l'affordance comme une propriété intrinsèque de l'environnement qui, combinée à la capacité de l'acteur donne lieu à une action. Cependant nous trouvons un consensus général au sein de la communauté de la psychologie écologique comme quoi une affordance concerne le système acteur/environnement qui constitue l'unité d'analyse de ce concept [Gibson, 1986, 1977, Stoffregen, 2003, Sahin *et al.*, 2007]. Par conséquent, la définition de Turvey est problématique car elle manifeste des difficultés au niveau de la spécification et de la perception directe de l'affordance [Stoffregen, 2003]. En effet, la formalisation de Turvey ne donne pas d'information sur la spécification de la complémentarité des propriétés de l'acteur (capacités d'action) et de l'environnement (affordances). Aussi, la perception directe des propriétés de l'environnement n'impliquerait pas une perception directe de la complémentarité des propriétés de l'acteur et de

2. L'auteur utilise le terme *effectivity* que nous avons traduit par capacité d'action.

l'environnement qui constitue la condition de réalisation de l'action correspondante à l'affordance en question [Luyat et Regia-Corte, 2009]. Ceci est évidemment contradictoire avec le concept de Gibson qui se base principalement sur la perception directe. Ces lacunes dans la formalisation de Turvey ont conduit d'autres auteurs tels que Stoffregen et Chemero à proposer d'autres formalisations.

2.2.2 La formalisation de Stoffregen

Stoffregen [Stoffregen, 2003] considère une affordance comme étant une propriété qui émerge du système acteur-environnement. Le système acteur-environnement de son point de vue possède des propriétés qui diffèrent qualitativement des propriétés de l'acteur et de l'environnement pris séparément. Ainsi, le formalisme proposé par Stoffregen est le suivant :

Supposons un système W_{pq} composé d'un ensemble d'acteurs Z et d'un ensemble d'objets X . p et q sont respectivement des propriétés de X et Z . La relation entre p et q , notée p/q , définit une propriété h de plus haut niveau (une propriété du système acteur-environnement). h est dite l'affordance du système W_{pq} si et seulement si

- i) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ possède h
- ii) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ ne possède ni q ni p
- iii) ni X ni Z ne possède h ,

Il est à noter que la variable h dans ce formalisme n'est pas l'action à réaliser (notée r dans la définition de Turvey) mais une affordance, indicateur d'action éventuellement possible. L'action proprement dite est le résultat de la conjonction de l'affordance et des intentions de l'acteur.

Soit $W_{pq} = m(h, i)$ composé de différentes affordances h (par exemple, c : l'opportunité de monter un escalier ; e : l'opportunité de prendre un repas ; f : l'opportunité de résoudre une équation mathématique) et les intentions i (ex., s : aller à l'étage ; l : manger ; b : faire son devoir de maths). Ainsi, un comportement donné C (par exemple, monter un escalier) émerge si et seulement si une affordance (c) et son intention complémentaire (s) co-apparaissent en même temps et au même endroit. m est une fonction de *choix psychologique*. Stoffregen ne donne pas de détail sur cette fonction de choix psychologique, qui doit être alors définie par le concepteur du modèle.

Stoffregen introduit donc deux niveaux dans le concept d'affordance : le premier permet de faire émerger l'affordance elle-même, tandis que le deuxième permet de réaliser l'action en fonction de l'intention de l'acteur. Bien que cette définition apporte plus

d'éléments sur la façon dont plusieurs affordances peuvent être filtrées, elle nous renvoie au débat sur la notion d'action et d'intention. L'action est-elle forcément précédée par une intention consciente? Si on se place dans le courant qui revendique qu'une action n'est pas forcément précédée par une intention [Livet, 2005], cette formalisation de l'affordance ne prend pas en compte tout type d'action.

2.2.3 La formalisation de Chemero

Chemero [Chemero, 2001, 2003] rejoint Stoffregen dans son postulat que les affordances émergent du système acteur-environnement. Cependant, il considère une affordance non pas comme une propriété du couple acteur-environnement, qui permet de prédire si une action peut surgir dans le futur, mais comme une relation entre les capacités de l'acteur et la situation où il se trouve. C'est cette relation qui fait émerger directement l'action possible. Chemero propose donc la formalisation suivante : $Afford-\phi(situation, capacity)$, où ϕ est l'action possible induite par l'affordance.

En proposant cette définition, Chemero clarifie les aspects de l'environnement et de l'acteur qui sont impliqués dans la relation $Afford(\phi)$. Il introduit deux expressions : *environmental relata* et *organism (acteur) relata*.

Environmental relata renvoie à la situation qui entoure l'acteur et non pas aux propriétés relatives aux objets de l'environnement. Pour clarifier son idée Chemero [Chemero, 2001] donne l'exemple des phrases suivantes « il pleut », « il fait froid ici », « c'est l'heure de diner ». Selon Chemero, ces phrases nous informent d'une propriété qui est attribuée à l'environnement sans être assignée à un objet particulier. Remarquons que finalement la notion de « *environmental relata* » rejoint le concept d'indexicalité utilisé par [Agre et Chapman, 1987] dans leur architecture de Pengi pour représenter la situation (cf. Chapitre 1, paragraphe 1.3.2.2).

Organismal relata renvoie aux caractéristiques de l'acteur, par exemple, ses capacités d'action.

Contrairement à Turvey qui considère que les affordances sont rattachées à l'environnement, la formalisation de Chemero met en avant une propriété importante de l'affordance à savoir son caractère relationnel. C'est-à-dire, les affordances n'existent pas en dehors d'une mise en relation entre un acteur et une situation singulière. A partir de ces formalisations, nous pouvons remarquer un ensemble de propriétés clés d'une affordance qui sont pertinentes pour la représentation de l'action. En particulier, une affordance est orientée action, elle possède un caractère relationnel, elle est signifiante et sa perception est directe.

2.3 Caractéristiques de l'affordance

L'affordance est orientée vers l'action. L'idée centrale du concept d'affordance est l'influence de l'environnement sur l'orientation et la détermination des actions des acteurs. Capturer cette caractéristique et l'utiliser pour représenter les actions de façon générale et, plus précisément, dans les systèmes agricoles est important car les objets font partie de ce qu'on appelle « situation » dans ce travail. Par conséquent, le concept d'affordance offre un moyen de représenter la situation et son influence sur les actions.

L'affordance est signifiante. Une affordance est par nature signifiante. Percevoir un objet, c'est percevoir ce qu'il est possible de faire avec en termes d'actions. Cette caractéristique est importante, car tout acteur a un comportement couplé avec le monde qui l'entoure, ce qui conduit à son adaptation à son environnement de façon spontanée. Notons que cette caractéristique est l'essence même de la notion d'action située [Suchman, 1987].

L'affordance est directement perçue. Contrairement à la notion de perception indirecte qui se base sur l'idée que les objets de l'environnement n'ont pas un sens intrinsèque mais découle d'un processus mental [Shaw, 2003, Jones, 2003], le concept d'affordance considère que l'acteur perçoit directement les possibilités d'actions dans son environnement. Nous trouvons aussi cette vision chez [Brooks, 1991b, Suchman, 2003] qui considèrent que l'acteur n'a pas systématiquement besoin de représenter son monde pour le comprendre et agir en conséquence.

Dans le contexte de ce travail, ces propriétés ont été choisies car elles représentent les caractéristiques les plus importantes de ce concept et elles répondent à notre problématique de représentation de l'action de façon située au niveau opérationnel. En effet, le fait de considérer qu'une affordance est une action possible dictée par l'environnement est dans le même ordre d'idée que la vision située de l'action qui postule que la situation offre et contraint ce qu'il est possible de faire. De plus, le caractère relationnel de l'affordance implique que chaque situation est unique pour chaque acteur et sa perception est subjective. Enfin, considérer que la perception est directe résout les difficultés liées à la représentation symbolique de l'environnement et le mécanisme cognitif pour déduire le sens de ce qui est perçu (cf. Chapitre 1, section 3).

La section suivante présente quelques travaux basés sur les affordances dans le contexte des systèmes multi-agents. Chacun de ces travaux est basé sur une des visions du concept d'affordance présentées dans la section 2.2. Ceci afin de définir les avantages et les inconvénients des formalisations des affordances dans la littérature dans le contexte des

systèmes multi-agents et de proposer notre propre vision de l'affordance dans notre modèle de représentation de l'action.

2.4 Les affordances en simulation multi-agents

Les affordances en modélisation et simulation selon Raubal.

Dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG) et de la navigation des agents dans les lieux publics tels que les aéroports, Raubal [Raubal, 2001a,b, Raubal et Moratz, 2008] utilise une architecture multi-agents basée sur des agents cognitifs et le concept d'affordance pour modéliser les sémantiques que peuvent avoir différents endroits dans l'aéroport par rapport aux voyageurs. Les agents représentent ainsi les voyageurs et les affordances sont des annotations attachées aux différentes entités spatiales (comptoirs d'enregistrement, portes d'embarquement, hall des arrivées, etc.). Par exemple, une affordance sous forme d'action « go-to » attachée à l'entité « hall des arrivées » affine un agent voyageur à se diriger vers ce hall et par conséquent lui permet de trouver son chemin rapidement. Un exemple de passage du contrôle des passeports et le choix d'un chemin après ce passage est décrit en détail dans [Raubal, 2001b].

Ainsi, le modèle d'affordance de Raubal diffère qualitativement du concept d'affordance que nous avons présenté dans les sections précédentes. En effet, l'auteur se base sur la vision des affordances de Norman [Norman, 1993], qui considère que la perception d'une affordance ne peut être directe mais médiée par un processus cognitif. Pour cela, Raubal considère trois catégories d'affordance : l'affordance physique, l'affordance socio-institutionnelle et l'affordance mentale.

- Affordance physique : ce sont les affordances telles qu'elles ont été définies par Gibson, c'est-à-dire les opportunités d'actions offertes à l'agent par les objets de l'environnement.
- Affordance socio-institutionnelle : bien que dans certains cas, l'environnement peut nous afforder à réaliser certaines actions, ces actions ne peuvent pas être réalisées du fait de contraintes socio-institutionnelles qui annulent l'affordance physique. Les auteurs donnent l'exemple, d'un agent qui voudrait se rendre dans un établissement public, lorsqu'il rencontre la porte d'entrée, elle affine à l'ouvrir pour entrer dans l'établissement. Cependant si l'heure actuelle ne correspond pas aux horaires d'ouvertures, l'agent ne peut être affiné par l'action « ouvrir la porte ».
- Affordance mentale : les affordances physiques et socio-institutionnelles sont la source des affordances mentales. Lors de l'exécution d'une tâche, un agent peut se trouver dans des situations différentes, quand il perçoit différentes affordances physiques et socio-institutionnelles. Par exemple, un lieu de transport public peut

afforder un agent à monter dans un bus, acheter un ticket, etc. De façon générale, de telles situations offrent aux agents des affordances mentales pour décider quelle est l'affordance perçue à réaliser en fonction de leurs buts. La relation entre les trois catégories d'affordances a été montrée dans un modèle fonctionnel présenté dans [Raubal et Moratz, 2008].

Ce travail se situe dans la vision de Turvey [Turvey, 1992] sur les affordances, c'est-à-dire que les affordances physiques sont des propriétés liées aux objets de l'environnement. Ces propriétés sont modélisées sous forme d'annotations statiques. Ainsi, la première limitation qu'on peut relever dans ce travail est le manque de flexibilité du modèle. En effet, puisque les affordances physiques sont attachées aux objets de l'environnement et les affordances socio-institutionnelles et mentales font parties de l'architecture de l'agent si l'on veut simuler d'autres actions il va falloir remettre en cause à la fois la conception de l'environnement et les agents. Aussi, les affordances sont considérées comme statiques, par conséquent elles sont détachées de la situation (elle n'évoluent pas en fonction de la situation) et ne changent pas quels que soient les buts des agents. Cependant, l'avantage de ce travail est qu'il montre d'une part une solution possible d'implémenter une affordance sous forme d'annotation. D'autre part l'affordance n'est pas limitée aux propriétés physiques des entités spatiales mais incluent également la dimension sociale.

Les affordances en modélisation et simulation selon Papasimeon.

Dans Papasimeon [Papasimeon, 2009], l'auteur présente un modèle de l'interaction agent-environnement dans la simulation multi-agents, basé sur les affordances et l'architecture BDI (Belief, Desire, Intention) dans le cadre des opérations militaires. Dans ce travail, une affordance est considérée comme une relation entre l'agent et son environnement. Ainsi, l'auteur se base sur la formalisation de Chemero [Chemero, 2003] et propose la formalisation suivante : $\phi_{ij}(t) = \phi(i, j, t)$

ϕ_{ij} , est l'affordance que fournit une entité j à l'agent i à un instant t . Concrètement, une affordance est à la fois représentée sous forme d'annotation dynamique et sa détection est implémentée sous forme de règle conditions/actions. Les conditions spécifient les propriétés que doivent avoir l'agent et l'objet pour que l'affordance se manifeste. L'exemple

suivant illustre la relation d’affordance entre deux entités [Papasimeon, 2009].

$$\begin{aligned}
& \forall \alpha : Agent; \varepsilon : Entity | \\
& IsType(\alpha, Tank) \wedge HasStatus(\alpha, Alive) \wedge IsType(\varepsilon, Tank) \\
& \wedge HasStatus(\varepsilon, Alive) \wedge OnOpposingSides(\alpha, \varepsilon) \wedge IsVisible(\alpha, \varepsilon) \\
& \wedge IsClosestEnemyTank(\alpha, \varepsilon) \wedge HasIntention(\alpha, Intercept) \\
& \wedge IsIntercepting(\alpha, \varepsilon) \wedge \neg HasFireSolution(\alpha, \varepsilon) \\
& \wedge HasCapability(\alpha, ObtainFireSolutionCapability) \\
& \bullet affords(\alpha, \varepsilon, ObtainFireSolution)
\end{aligned}$$

Cet exemple montre les conditions sous lesquelles une affordance *obtenir une solution de tir* contre un Tank ε de la part d’un autre Tank α émerge. Cette représentation contient trois types d’informations [Kubera, 2010] :

1. les propriétés liées à l’agent α et l’entité ε nécessaires pour l’émergence de l’affordance . Par exemple, « $HasStatus(\varepsilon, Alive)$ » qui spécifie que le Tank ε doit être « en vie » ;
2. les propriétés définissant les capacités d’actions que l’agent doit posséder pour pouvoir percevoir l’affordance *Obtenir une solution de tir* Par exemple $HasCapability(\alpha, ObtainFireSolutionCapability)$;
3. les conditions nécessaires pour que cette affordance puisse se réaliser. Par exemple, $IsClosestEnemyTank(\alpha, \varepsilon)$ montre que le tir sur tank ε peut se faire que s’il est proche de l’agent.

L’avantage de cette représentation est qu’elle capture l’aspect relationnel des affordances. Cependant comme cela a été indiqué dans [Kubera, 2010], l’inconvénient de cette représentation est que l’auteur mélange ce qui relève des informations nécessaires à l’émergence de l’affordance (les points 1 et 2) et ce qui relève des conditions nécessaires pour que cette affordance puisse se réaliser en action dans la situation courante (le point 3). Concernant notre travail il est important de séparer les informations liées à la détection d’une affordance, des conditions de réalisation de l’action correspondante. En effet, certaines conditions de réalisation d’une action relèvent d’un aspect stratégique (un choix fait par l’acteur ou des contraintes imposées par la nature du système étudié) mais qui ne contraignent pas la détection d’une affordance.

Par ailleurs, du point de vue de la conception d’un système multi-agents Papasimeon se pose la question de l’endroit (au niveau de quel composant) dans l’architecture du système où les affordances peuvent être calculées tout en évitant les problèmes de complexité et en respectant les caractéristiques des affordances. Pour cela, il propose deux solutions :

- la première consiste à implémenter les affordances dans la mémoire procédurale des agents. Il en résulte que les agents sont responsables de la perception des entités de l'environnement, la génération des affordances disponibles, l'évaluation de ces affordances, et de décider quelle affordance prendre en compte. Avec cette solution certaines caractéristiques intéressantes des affordances ne peuvent être respectées, par exemple, la perception directe de l'affordance et l'aspect relationnel.
- La deuxième solution consiste à calculer les affordances pour tous les agents du système au niveau de l'environnement (ici l'environnement doit être compris au sens des systèmes multi-agents). L'inconvénient de cette solution est la perte d'une caractéristique importante d'un agent à savoir son autonomie.

Nous pouvons citer d'autres travaux qui se basent sur le concept d'affordance, notamment dans le domaine de l'apprentissage. Dans [Viezzer et Nieuwenhuis, 2005] les auteurs ont développé une architecture d'agents leur permettant d'apprendre automatiquement les fonctionnalités d'un objet dans l'environnement. Dans le même ordre d'idée nous trouvons les travaux de [Sequeira *et al.*, 2007] qui se basent sur les affordances pour permettre aux agents d'apprendre les différentes interactions possibles avec les objets de l'environnement en se basant sur les interactions précédentes.

2.5 Conclusion

Le concept d'affordance prend comme unité d'analyse le système acteur-environnement. Cette relation est à l'origine de l'émergence d'un ensemble d'affordances. La perception de ces affordances est vue comme une lecture spécifique de l'environnement de la part de l'acteur qui est contrainte par ses capacités d'actions. C'est cette lecture filtrée de l'environnement qui lui permet de mener in situ, une action. Ainsi, la notion d'affordance fournit une solution élégante pour représenter les prémisses de l'action en se basant sur l'interaction agent/environnement. Les solutions actuelles, offrent différentes façons de concevoir les affordances chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Toutefois, afin de profiter de ce concept pour une représentation située de l'action tout en évitant les inconvénients des solutions basées sur les affordances que nous avons présentées dans la section 2.4. nous proposons dans le chapitre 5, une nouvelle façon de voir les affordances dont la en œuvre sera présenté dans le chapitre 6.

Chapitre 3

Les systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents (SMA) sont issus de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Cette dernière constitue le remède aux inconvénients de l'intelligence artificielle classique (centralisée) où la résolution d'un problème était assignée à un seul programme complexe qui s'avère difficile à élaborer et à maintenir. L'IAD au contraire, décompose un problème en un ensemble de sous-problèmes, chacun étant attribué à un solveur pour le résoudre. Les solveurs sont amenés à communiquer des informations entre eux pour résoudre le problème global. Un système multi-agents est aussi un système qui a pour vocation de pouvoir s'exécuter en environnement informatique distribué, il est composé d'un ensemble d'entités appelées *agents*. Cependant, contrairement à l'IAD qui s'est focalisée sur la résolution de problèmes, les systèmes multi-agents ont un champ d'application beaucoup plus large. Dans [Boissier *et al.*, 2004], les auteurs définissent principalement 3 domaines d'applications des SMA :

1. La simulation afin de modéliser, observer, expliquer ou prédire le comportement de systèmes réels complexes.
2. Les applications dans lesquelles les agents dits « assistants » jouent le rôle d'êtres humains. La notion d'agent simplifie la conception de ces systèmes et amène de nouvelles problématiques centrées utilisateur telles que la communication, la sécurité, etc.
3. La résolution de problèmes, telle qu'elle avait été définie en intelligence artificielle, étendue à un contexte distribué.

Ce travail se situe dans le premier domaine d'application des SMA : nous utilisons les systèmes multi-agents pour pouvoir modéliser et simuler les activités humaines dans les systèmes agricoles. Ce chapitre fait un bref état de l'art sur les principes de base des SMA et de la simulation multi-agents.

3.1 Les systèmes multi-agents

Demazeau [Demazeau, 1995], dans son approche VOYELLES (AOEI), définit un système multi-agents comme un ensemble d'agents (A) potentiellement organisés (O) qui interagissent (I) dans un environnement (E) commun. Cette définition fait ressortir les caractéristiques fondamentales d'un système multi-agents : interaction et organisation. Le développement d'un système multi-agents passe alors par quatre aspects fondamentaux :

- la spécification des agents et leur comportement ;
- la définition de l'environnement qui représente le milieu dans lequel les agents évoluent ;
- l'élaboration des moyens par lesquels les agents interagissent ;
- l'organisation, c'est-à-dire les moyens utilisés pour structurer l'ensemble des entités.

Cette définition suppose que toute entité du système est un agent. Or, d'autres types d'entités peuvent exister dans le système sans pour autant avoir un comportement autonome et proactif (ces deux caractéristiques constituent les propriétés clés d'un agent, voir ci-dessous la définition d'un agent). Afin de compléter cette définition, nous nous référons à la définition de Ferber [Ferber, 1995], selon qui un système multi-agents est caractérisé par :

- *un ensemble d'objets. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, à tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans l'espace. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents ;*
- *un ensemble de relations qui unissent les objets entre eux ;*
- *un ensemble d'opérations (actions) permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets ;*
- *des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'Univers.*

Nous présentons dans ce qui suit les concepts de base d'un SMA.

3.1.1 Qu'est ce qu'un agent ?

Bien que l'approche de modélisation orientée agent et système multi-agents ait fait ses preuves dans plusieurs domaines tels que la robotique, la sociologie, l'écologie, etc. la question de la définition d'un agent reste encore embarrassante. Néanmoins, toutes les

définitions proposées par la communauté des SMA insistent sur une propriété clé d'un agent à savoir son *autonomie*.

Ainsi, [Ferber, 1995] considère un agent comme « *une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents* ».

De son côté Jennings [Jennings *et al.*, 1998], définissent un agent comme étant « *un système informatique, situé dans un environnement, capable d'agir de façon autonome et flexible pour atteindre son objectif* ».

Précisons chacun des termes importants de ces définitions :

- *situé* signifie que l'agent perçoit son environnement et qu'il est capable de le modifier ;
- *autonome*, signifie qu'un agent est en mesure d'agir sans contrôle ou intervention externe et qu'il est capable de contrôler son état interne ainsi que ses actions ;
- *flexible*, signifie qu'un agent doit pouvoir avoir un comportement : (i) réactif, c'est-à-dire répondre en temps opportun aux changements de son environnement (ii) proactif, c'est-à-dire manifester un comportement guidé par ses propres buts et pouvoir, par conséquent, prendre l'initiative d'agir indépendamment de son environnement (iii) social, en pouvant interagir avec d'autres agents pour atteindre son but et éventuellement les aider dans leurs activités.

De ces définitions ressortent les propriétés clés d'un agent : en plus de l'autonomie, la capacité d'agir et la capacité de perception (figure 3.1). Dans le cadre de cette thèse nous adoptons la définition proposée par [Ferber, 1995]. Cette définition fournit les principales caractéristiques d'un agent sans pour autant limiter la notion d'agent à un type particulier (voir ci-après les architectures d'agents).

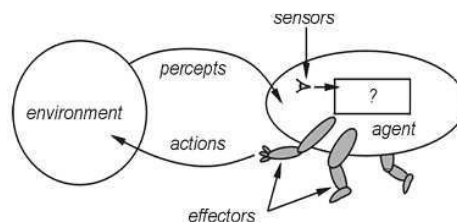


FIGURE 3.1 : Interaction entre un agent et son environnement [Russell et Norvig, 2003].

Les différentes écoles de pensée sur la conception de l'action que nous avons présentées dans le chapitre 1 ont donné naissance à deux architectures différentes d'agent : les architectures cognitives et les architectures réactives.

Architecture cognitive. Un agent cognitif est caractérisé par sa capacité à raisonner sur les connaissances qu'il perçoit de son environnement et des autres agents, de mémoriser les situations, d'anticiper les résultats des actions et, par conséquent, de prévoir des événements futurs et de planifier ses propres actions. L'architecture la plus représentative du type d'agent cognitif est sans doute l'architecture BDI « Belief, Desires, Intention » [Rao et Georgeff, 1995]. Cette architecture trouve ses inspirations dans les travaux sur le raisonnement pratique [Wooldridge, 1999]. Le raisonnement pratique implique deux processus : décider à tout moment quel est le but à atteindre (délibération) ; et spécifier comment atteindre ce but (planification).

L'algorithme suivant présente le fonctionnement de base d'un agent BDI.

algorithme 1 BDI interpreter

```

B ← B_init;
I ← I_init;
/** boucle infinie **/
tant que true faire
    getPerception(perc) ;
    B ← belief_revision(B, perc) ;
    D ← options(B, I) ;
    I ← filter(B, D, I) ;
    plan = find_plan (B, I) ;
    execute(plan) ;
fin tant que

```

En résumé, un agent BDI met à jour de façon continue ses croyances en fonction des informations qui lui proviennent de son environnement via la fonction *getPerception()*. A partir de ses croyances et de ses intentions formulées auparavant, il génère une liste d'options ou d'objectifs qu'il juge capable d'atteindre en utilisant la fonction *options(B, I)*. Cette liste fera l'objet par la suite d'un processus de filtrage *filter(B,D,I)* qui permet de maintenir ou d'annuler les intentions formulées auparavant ou de déterminer de nouvelles intentions. Enfin, en se basant sur ces dernières, l'agent calcule son plan d'actions avec la fonction *find_plan (B, I)*.

L'approche BDI a fait l'objet de plusieurs implémentations, les plus connues sont PRS [Georgeff et Lansky, 1986] et son successeur dMARS [d'Inverno *et al.*, 1997].

Architecture réactive. Au milieu des années 80 les chercheurs dans le domaine de l'IA ont été confrontés à la question de comment concevoir des agents autonomes fournissant un comportement robuste face à un environnement incertain et imprévisible [Brooks, 1991b]. La réponse à cette question a donné naissance aux architectures réactives. Ainsi, l'idée d'un agent réactif vient principalement des travaux de Brooks [Brooks et Connell, 1986, Brooks, 1991b], qui s'est opposé aux modèles symboliques en intelligence artificielle classique. Brooks sous le slogan « *the world is the best model of itself* » postule qu'un agent n'a pas besoin de construire et de maintenir un modèle de l'environnement, ni d'avoir des processus de raisonnement et de planification pour manifester un comportement intelligent. Un agent peut tout simplement percevoir son environnement via ses capteurs et agir en conséquence via ses effecteurs. Pour tout ce qui a trait à l'intelligence, elle est le fruit des interactions dynamiques entre un agent et son environnement local, y compris d'autres agents. L'exemple des colonies de fourmis en est la preuve [Drogoul, 1993]. Le comportement d'un agent réactif est donc de type « stimulus-réponse » ou « condition-action ». Plusieurs architectures d'agent suivant ce courant de pensée ont émergé depuis les années 80. La plus représentative est l'architecture de subsomption, figure 3.2 [Brooks et Connell, 1986].

Un agent réactif possède ainsi plusieurs caractéristiques [Brooks, 1991b] :

- situé (situatedness en anglais) : un agent est situé dans l'environnement, il ne manipule pas des descriptions abstraites de celui-ci mais base plutôt son comportement sur la perception directe qu'il en a localement ;
- incarné (embodiment en anglais) : un agent possède un corps et est en interaction directe avec son environnement par son intermédiaire ;
- intelligence : l'intelligence d'un agent n'est pas limitée à son architecture interne mais aussi à son couplage direct avec l'environnement.
- émergence : enfin, l'intelligence de tout le système émerge de l'interaction de l'agent avec son environnement et d'une interaction indirecte entre l'ensemble des agents.

Les architectures réactives ont montré leurs performances principalement dans le domaine de la robotique, mais elles souffrent de plusieurs problèmes. Principalement, elles sont des solutions très spécifiques au domaine de leurs applications et sont difficilement réutilisables. De plus, du fait qu'un agent réactif ne possède ni mémoire ni processus de raisonnement, leur construction est difficile car il faudrait soit prévoir toutes les situations possibles afin de coder tous les comportements possibles de l'agent ou bien leurs fournir suffisamment de connaissances dans leur environnement local pour qu'ils puissent décider des actions à mener [Maes, 1990, Wooldridge, 1999].

Il convient de préciser que les agents réactifs sont souvent considérés comme agissant selon la vision de l'action située. Ceci car cette approche favorise le couplage direct entre

la perception et l'action ainsi que l'interaction dynamique de l'agent avec son environnement. Nous allons revenir dans le chapitre 5 sur notre positionnement par rapport aux agents réactifs et leurs inconvénients.

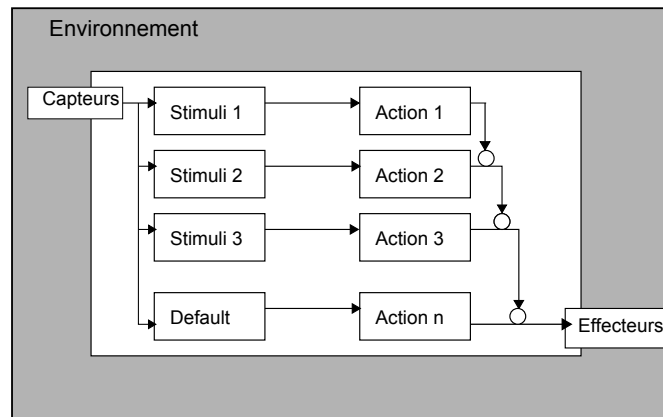


FIGURE 3.2 : Architecture de subsomption.

A partir de ces deux architectures d'agents qui sont diamétralement opposées, une troisième architecture d'agent, dite architecture hybride a émergé dont le but est de profiter des avantages de ces deux approches et de trouver un juste milieu [Malcolm et Smithers, 1990, Müller, 1994, Andriamasinoro et Courdier, 2004]. Une architecture hybride combine un sous-système délibératif avec un sous-système réactif. Le sous-système délibératif permet de représenter les connaissances à utiliser dans la planification des actions avant leur exécution, tandis que le sous-système réactif maintient la réactivité, la robustesse et la flexibilité de l'agent en cours d'action. Ainsi, une des questions qui font l'objet de recherches actives dans les architectures hybrides est comment lier le sous-système de planification et le sous-système réactif? Pour cela certaines approches introduisent une troisième couche entre les deux sous-systèmes dans le but de les coordonner.

3.1.2 Environnement

Bien qu'il n'existe pas encore de consensus sur la définition d'agent nous retrouvons néanmoins dans toutes les définitions le terme « environnement ». Quand la notion d'agent et de systèmes multi-agents a émergé la communauté de ce domaine s'est plutôt concentrée sur la conception de l'architecture interne de l'agent. On considérait que l'intelligence doit être incarnée dans l'agent lui-même. Avec l'apparition des architectures d'agents réactifs, la notion d'environnement a commencé à prendre plus d'ampleur. En effet, l'environnement fournit le support d'actions aux agents, une source d'informations via leurs perceptions et le milieu des interactions entre les agents. Par conséquent,

il serait plus judicieux et avantageux de s'intéresser à cette composante des systèmes multi-agents et à sa conception au même titre qu'on s'intéresse à l'agent et à l'interaction dans les SMA. De plus, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 concernant les affordances, le courant de la psychologie écologique [Gibson, 1986] défend l'idée que les possibilités d'action des agents sont pré-inscrites dans leur environnement. L'inspiration biologique [Grassé, 1959], de son côté, défend l'idée que l'environnement peut être utilisé comme un moyen de coordination implicite entre les agents (cf. chapitre 3, section 4.2.2.1). Aussi, les SMA qui modélisent des entités spatiales ne peuvent pas faire l'impasse d'une représentation explicite de l'environnement ; par exemple dans le domaine des systèmes agricoles, pour représenter la dimension spatiale d'une action, nous devons représenter l'espace agricole (ex. parcelle), sa dynamique, les différents outils et objets qui s'y trouvent (ex. tracteur).

Par ailleurs, comme indiqué dans [Weyns *et al.*, 2005], le terme environnement possède plusieurs significations. Dans [Helleboogh *et al.*, 2007], les auteurs parlent de l'environnement simulé et de l'environnement de simulation. L'environnement simulé constitue une partie du modèle et représente l'environnement réel dans lequel les agents sont situés. L'environnement de simulation représente l'infrastructure dans laquelle s'exécutent les programmes liés aux agents de la simulation. Dans [Weyns *et al.*, 2005], les auteurs parlent d'environnement d'application qui correspond à l'environnement simulé dans [Helleboogh *et al.*, 2007], et de la plateforme d'application qui correspond à l'environnement de simulation dans [Helleboogh *et al.*, 2007]. Ils ont introduit un troisième type d'environnement qui est l'infrastructure physique (figure 3.3).

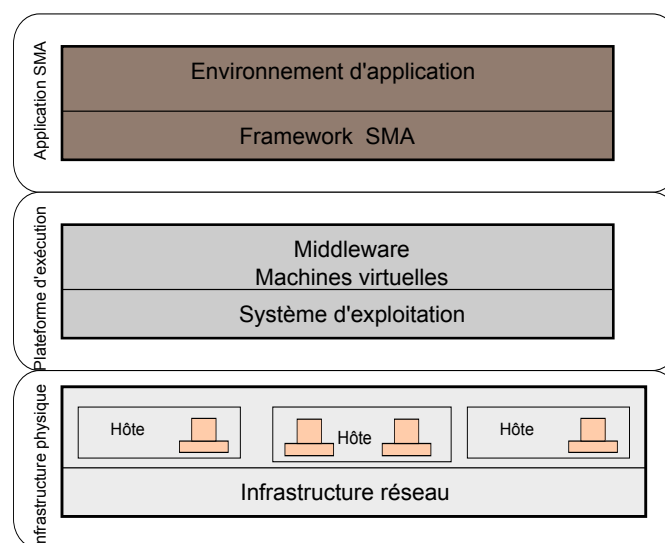


FIGURE 3.3 : Modèle 3-couches pour les SMA [Weyns *et al.*, 2005].

Dans ce travail, nous sommes concernés par la modélisation des actions de façon située,

nous nous restreignons donc à l'environnement d'application (ou l'environnement simulé) dans les SMA. Par conséquent, le terme environnement utilisé dans le reste de ce manuscrit fait référence à l'environnement d'application, celui qui représente l'environnement des acteurs du système réel modélisé.

3.1.2.1 Modèles d'environnement

La définition de l'environnement dépend fortement du domaine d'application ou de la nature du problème pour lequel le système a été conçu. Par conséquent, il est difficile de donner une définition générique. Nous allons rapporter ici quelques définitions en s'appuyant sur l'état de l'art sur l'environnement dans les SMA présenté dans [Odell *et al.*, 2003, Weyns *et al.*, 2005].

L'environnement selon [Russell et Norvig, 2003]. Russell and Norvig définissent l'environnement comme étant un programme générique, qui fournit les percepts aux agents et reçoit en retour leurs actions. Le programme met à jour par la suite l'état de l'environnement en fonction des actions des agents et d'autres processus dynamiques qui surviennent dans l'environnement. Selon ces auteurs, l'environnement représente la relation de base entre les agents et leur milieu d'interaction.

L'environnement selon [Odell *et al.*, 2003]. Ces auteurs définissent l'environnement comme une entité qui fournit les conditions d'existence de toutes les autres entités agent ou objet. Ils distinguent deux types d'environnement : l'environnement physique et l'environnement de communication. L'environnement physique est régi par les lois, les règles, les contraintes, les stratégies qui gouvernent l'existence physique des entités. L'environnement de communication, fournit les principes, processus et structures qui permettent la transmission d'informations entre agents.

L'environnement selon [Ferber, 1995]. Ferber définit l'environnement comme un espace E doté d'une métrique, dans lequel sont situées les entités (agents et objets) du système. Les actions des agents sont sujettes aux lois de l'univers qui déterminent les effets des actions dans l'environnement. L'environnement est doté de processus qui déterminent sa réaction aux actions des agents. Une différence fondamentale entre cette définition et celle donnée par [Odell *et al.*, 2003] réside dans le fait que l'environnement ne possède pas seulement des processus internes mais aussi des processus qui définissent comment il doit réagir aux actions des agents. L'action d'un agent ne modifie pas forcément l'environnement.

L'environnement selon [Weyns *et al.*, 2007]. L'environnement est une abstraction du premier ordre. En d'autres termes l'environnement est une entité à part entière dans les SMA qui possède ses propres fonctions et fournit les conditions d'existence des agents. En se basant sur cette définition, [Weyns *et al.*, 2007] identifient un certain nombre de fonctions de l'environnement dans un SMA.

3.1.2.2 Fonction de l'environnement

Selon [Weyns *et al.*, 2007], l'environnement doit être responsable de la structuration des agents physiquement, socialement ainsi que de la communication entre les agents. L'environnement doit être aussi en mesure de gérer l'accès aux ressources ainsi que de fournir des services aux agents. Par exemple, dans le modèle DS (Domino-Smart)³ [David *et al.*, 2007], l'environnement contient des filtres qu'on peut considérer comme des services qui permettent de fournir aux agents l'ensemble des cellules spatiales sur lesquelles ils peuvent agir de façon optimale. Aussi, l'environnement peut imposer des règles pour l'évolution de l'ensemble des entités du système. Les règles peuvent être imposées par le domaine de modélisation lui-même ou définies par le concepteur en fonction de ses besoins. Par exemple, dans la simulation du trafic routier [Meignan *et al.*, 2007], les auteurs considèrent l'environnement non pas seulement comme un espace commun aux agents mais aussi comme imposant des contraintes aux actions et interactions des agents (e.g. un agent bus et un agent voyageur peuvent interagir seulement quand ils sont localisés dans le même arrêt de bus cette contrainte est fournie et vérifiée par l'environnement). Enfin, l'environnement possède ses propres processus internes qui évoluent indépendamment des actions des agents et dont il est responsable.

3.1.3 Interaction

Les définitions du concept d'agent présentées précédemment font ressortir deux types d'interactions dans les SMA : l'interaction d'un agent avec son environnement et l'interaction d'un agent avec les autres agents du système. Le premier type d'interaction se fait via la perception de l'agent et sa capacité à agir. Le deuxième type d'interaction constitue la « glue » qui relie l'ensemble des agents. Sans cet aspect, un agent seul se trouve prisonnier de son cycle de perception, délibération (dans le cas d'agents cognitifs), action. Par conséquent, il ne serait pas possible de produire un comportement collectif alors que c'est précisément l'objectif d'un système multi-agents.

Selon Ferber [Ferber, 1995] : « *pour un agent, interagir avec un autre constitue à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes. C'est en effet parce qu'ils*

3. DS est un modèle permettant simuler l'évolution de la population et des territoires à La Réunion.

coopèrent que des agents peuvent accomplir plus que la somme de leurs actions, mais c'est aussi à cause de leur multitude qu'ils doivent coordonner leurs actions et résoudre des conflits »

Dans la littérature nous trouvons plusieurs termes utilisés pour désigner les formes ou les schémas d'interaction entre les agents :

- collaboration : quand il s'agit de répartir des tâches entre un ensemble d'agents ;
- coopération : lorsque les agents sont conçus afin d'atteindre un but commun ;
- coordination : lorsqu'il s'agit de gérer les dépendances entre les actions des agents ;
- compétition : lorsque chaque agent (ou un groupe d'agents) poursuit son propre but en tentant de le satisfaire de façon optimale tout en se coordonnant avec les autres agents.

Bien que ces schémas d'interaction soient parfois différenciés dans la littérature, nous rejoignons l'avis de [Malone et Crowston, 1994] en considérant que la coopération, la collaboration, la compétition constituent différents schémas de la coordination. La coordination des actions des agents constitue une partie de la problématique de cette thèse. Pour cela nous avons réservé le chapitre 4 pour faire un état de l'art sur la coordination et les différentes formes de sa mise en œuvre.

3.2 Le temps et l'environnement spatial dans les SMA

Dans cette section nous allons aborder la gestion du temps et les modèles de représentation de l'espace dans les systèmes multi-agents.

3.2.1 La gestion du temps dans les SMA

La gestion du temps dans la simulation constitue un enjeu majeur pour le modélisateur, la cohérence des résultats du modèle repose en partie sur la gestion de temps de simulation. Dans la simulation 3 notions de temps, en général, sont différenciées [Fianyo *et al.*, 1998] :

- le temps réel qui est le temps dans lequel le phénomène réel est observé ;
- le temps virtuel ou simulé qui correspond à la représentation du temps réel par le simulateur ;
- le temps d'exécution qui correspond au temps réel que le simulateur a utilisé pour construire les résultats de la simulation ;

Une des conditions principales à respecter dans les simulations est la règle de causalité qui stipule que les événements futurs du monde virtuel ne doivent pas influencer ceux du passé. En d'autres termes, lorsqu'un événement E1 cause un événement E2, ce dernier doit être traité après le premier au niveau du temps d'exécution. Lorsque l'on veut implémenter un modèle et le simuler, nous devons faire un choix de gestion du temps virtuel et du temps d'exécution ; le premier étant le temps que l'on veut représenter et le dernier dépendant de la plateforme matérielle et logicielle de simulation choisie. Généralement deux façons de représenter le temps dans la simulation multi-agents sont utilisées : approche à pas de temps constant et approche événementielle.

3.2.1.1 Approche à pas de temps constant

Dans la simulation à pas de temps constant, le temps est avancé en incrémentant sa valeur d'une durée constante Δt . La représentation du temps est ainsi discrétisée selon des intervalles de temps fixes. Tous les agents sont activés à chaque pas de temps (dans un ordre fixe ou aléatoire) afin d'exécuter le code correspondant à leurs comportements (perception / (délibération) / action). L'exécution de l'action choisie par chaque agent influe immédiatement les variables de l'environnement. Par conséquent, l'environnement sera perçu ensuite modifié (de façon instantanée) dans le même pas de temps par l'ensemble des agents.

Cette approche possède l'avantage de la simplicité d'implémentation. Cependant, elle manifeste plusieurs inconvénients qui ont un impact majeur sur la cohérence des résultats de la simulation [Michel, 2004]. En effet, du fait que le déclenchement du comportement d'un agent peut engendrer un changement immédiat dans l'environnement, à un pas de temps la situation d'un agent inclue le résultat des actions des agents qui ont été activé avant lui. En d'autres termes, selon l'ordre de l'activation d'un agent, sa perception et les connaissances qu'il obtient pour déterminer son action peuvent différer. La figure 3.4 illustre ce problème par le modèle du jeu de la vie [Gardner, 1970].

Les règles qui sont appliquées sont les suivantes :

- une cellule morte possédant exactement trois voisines vivantes devient vivante ;
- une cellule vivante possédant deux ou trois voisines vivantes le reste, sinon elle meurt.

Cette figure montre que l'ordre d'activation des agents peut produire différents résultats de la simulation en partant d'un même état du monde. Ceci ne peut être acceptable car d'importants biais dans la simulation peuvent être induits. Idéalement, tous les agents doivent avoir accès au même état de l'environnement à un instant t , ce qui empêchera qu'un agent soit influencé par le résultat de l'exécution d'autres actions [Michel, 2004].

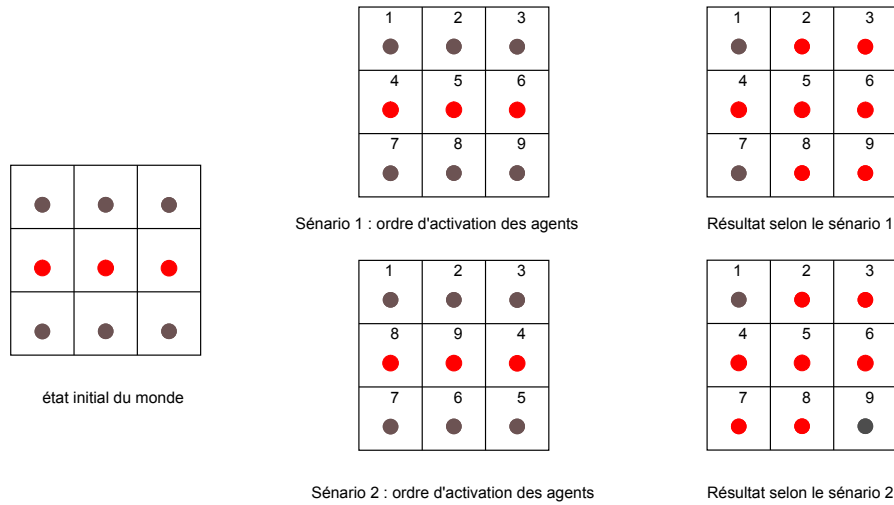


FIGURE 3.4 : L'état (morte ou vivante) d'une cellule au pas de temps $t + \Delta t$ dépend de son indice dans la liste d'agents. Les cellules vivantes sont représentées par un point rouge tandis que les cellules mortes sont représentées par un point gris. L'ordre d'activation des agents est représenté par les numéros. Chaque agent possède 8 voisins (voisinage de Moore).

Un autre problème lié à cette approche a été relevé dans [Payet *et al.*, 2006] lorsque le modèle comporte des agents hétérogènes qui n'ont pas besoin de s'activer à la même fréquence. L'utilisation de l'approche à pas de temps constant peut conduire au ralentissement des actions de certains agents parce qu'ils sont activés peu souvent (léthargie), et inversement l'accélération des actions de certains agents parce qu'ils sont activés trop souvent (hyperactivité).

3.2.1.2 Simulation par événement

Nous avons vu dans la section précédente, que la simulation à pas de temps constant engendre des problèmes de léthargie et d'hyperactivité. La simulation par événement peut pallier ce problème. En effet, les agents ne sont pas activés tous en même temps mais plutôt leur activation est basée sur des « événements » [Payet *et al.*, 2006]. Un événement représente la condition de l'activation d'un agent, cette condition est traduite en une date du temps simulé. La détermination des dates des événements peut être faite par ordonnancement d'événements ou par analyse d'activités [Balci, 1988].

- Ordonnancement d'événements : dans ce cas, les événements futurs du système doivent être définis préalablement, la simulation consiste à parcourir la liste de tous les événements et activer le code des agents correspondant ;
- Analyse d'activités : dans certains cas il est difficile voire impossible de définir et de planifier les événements futurs, auquel cas utiliser une implémentation par ordonnancement d'événements s'avère inapproprié. La solution dans ce cas est de contraindre le déclenchement des événements par l'évolution même du système

simulé. L'événement est vu alors comme une condition qui prend en compte l'état courant du système. De cette façon, il n'est pas nécessaire d'anticiper les événements futurs, cependant il est important d'avoir une connaissance précise du contexte (ensemble des conditions qui correspondent à l'événement) dans lequel les actions doivent être déclenchées.

Même si avec cette approche le problème de l'ordre d'activation des agents ainsi que les problèmes de léthargie et hyperactivité sont évités, du fait que chaque agent se déclenche à son rythme propre et qu'il n'existe pas un ordonnancement commun à tout les agents, le problème de la simultanéité reste présent. On notera que cette approche est moins utilisée que la précédente du fait de sa complexité de mise en œuvre et de validation par les modélisateurs.

Dans [Ferber et Müller, 1996, Michel, 2004], les auteurs ont largement abordé le problème de l'activation séquentielle des agents et le problème de la simultanéité. Il s'est avéré que ces problèmes ne sont finalement pas liés qu'à l'approche de gestion à pas de temps constant mais de façon générale à la conception de l'action qui consiste, une fois déclenchée, à une modification directe de l'environnement. Inspiré par les travaux de Travers [Travers, 1996] les auteurs proposent le principe « Influence/Réaction » [Ferber et Müller, 1996, Michel, 2004]. Ce modèle sera présenté dans la section 3.3.2.

3.2.2 Représentation de l'espace

3.2.2.1 Représentation discrète de l'espace

Dans les SMA, les modèles d'agents considérant une représentation discrète de l'espace, le représente soit sous forme d'un graphe dans lequel les sommets représentent les régions de l'espace (parcelles, patches, ...) où l'on veut observer ou modéliser des actions et les arcs représentent les liens qui existent entre ces régions, soit comme une grille de cellules. Les cellules sont reliées entre elles par des liens de voisinage, les plus connus sont les voisinages de Von Neumann et de Moore. Dans le premier cas chaque cellule est en relation avec les cellules adjacentes qui se trouvent aux quatre points cardinaux : Nord, Sud, Est et Ouest, tandis que dans le deuxième cas elle est en relation avec les huit cases adjacentes. D'autres liens de voisinage peuvent être considérés, par exemple la distance entre deux cellules en termes de nombre de cellules les séparant. Cette représentation de l'espace est la plus facile à mettre en œuvre et possède des avantages. Par exemple elle permet de localiser facilement les agents et les objets. Ces derniers sont généralement localisés par le couple (numéro de ligne, numéro de colonne) de la cellule sur laquelle ils sont localisés à un instant t . Son inconvénient majeur est qu'elle contraint la géométrie des interactions. Par exemple, la perception d'un agent est limitée à un nombre de cases,

la zone perçue aura donc implicitement la forme de l'assemblage des cases. Plusieurs plateformes de simulation de systèmes multi-agents proposent ce type de représentation de l'espace, nous citons Cormas [Bousquet *et al.*, 1998], Netlogo [Wilensky, 1999], AnyLogic [AnyLogic, 2000].

3.2.2.2 Représentation continue de l'espace

L'espace est considéré comme un seul bloc où les entités du système possèdent des coordonnées spatiales à valeurs réelles (par exemple (x, y) en 2D). Dans ce type de représentation, pour les entités de l'espace qui ont un volume il est important de leur attribuer non seulement leurs coordonnées spatiales (x,y,z) mais aussi un espace d'occupation qui correspond à leur taille. Ce type de représentation est évidemment le plus réaliste et permet d'avoir plus de précision quand au résultat du modèle, cependant il induit beaucoup de complexité computationnelle. Par exemple, chaque agent pour connaître ses voisins doit mesurer la distance le séparant de chaque autre agent. Si l'agent est amené à se déplacer dans l'espace, cela implique qu'il doit recalculer ses voisins à chaque fois qu'il change de position. Plusieurs plateformes de simulation SMA proposent néanmoins ce type de représentation telles que AnyLogic [AnyLogic, 2000], Repast [Collier, 2001], Gama [Grignard *et al.*, 2013], Netlogo [Wilensky, 1999].

3.3 Système multi-agents situés

Contrairement aux SMA classiques où l'accent est mis sur l'architecture interne de l'agent, dans les SMA situés l'accent est plutôt mis sur l'environnement et l'interaction entre celui-ci et les agents. L'environnement doit encapsuler toutes les ressources dont l'agent a besoin pour agir ainsi que les modalités d'accès à ces ressources. Une des caractéristiques principales d'un SMA situé est la représentation explicite de l'espace. Un agent possède donc une position explicite dans l'espace. Par conséquent, il est placé dans un contexte local qu'il peut percevoir et dans lequel il peut agir et interagir avec d'autres agents. Dans ce qui suit, nous allons présenter trois travaux dans le domaine des SMA situés : le modèle influence réaction [Ferber et Müller, 1996], le SMA situé multi-couches (MMASS) [Bandini *et al.*, 2002, 2004], et le modèle Brahms [Sierhuis *et al.*, 2007]. Nous avons choisi ces travaux pour montrer le rôle de l'environnement et la modélisation de l'action dans les SMA situés.

3.3.1 Modèle Influence/réaction

Dans [Ferber et Müller, 1996] Ferber et Müller proposent une architecture de SMA situé. La particularité de ce modèle est qu'il remet en cause la conception de l'action en intelligence artificielle pour deux raisons :

- dans un système multi-agents, un agent n'est pas seul à agir. Du fait qu'il partage un environnement commun avec les autres agents, ses actions peuvent interférer avec celles des autres. La conséquence d'une action doit être déterminée en prenant en compte l'ensemble des actions réalisées au même moment. Ceci est connu sous le nom de problème de la simultanéité ;
- l'environnement se caractérise par des lois qui lui sont propres, ces lois ont aussi une influence sur le résultat d'une action. Pour assurer l'intégrité de l'environnement, ce dernier doit assurer une évolution de son état qui soit en adéquation avec les lois qui le régissent.

Selon ce principe, les actions des agents n'affectent pas directement l'état de l'environnement. Elles sont considérées comme des influences, représentant le désir d'un agent de voir l'environnement être modifié d'une certaine façon. Ceci est appelé la « phase d'influence ». L'environnement n'étant pas une entité passive, la décision de quelles influences lui appliquer lui revient. En d'autres termes, lors de l'activation des agents et après avoir sélectionné leurs actions, les agents envoient à l'environnement l'ensemble de leurs influences. L'environnement enregistre toutes les influences et détermine ensuite en fonction des lois de l'univers qui lui sont applicables quelle influence appliquée et, par conséquent, comment son état va évoluer : c'est la « phase de réaction ». Ce principe permet de pallier au problème de simultanéité, car les actions de tous les agents ne sont que des influences, actions candidate qui seront filtrées par l'environnement. L'ordre d'activation des agents n'a plus d'importance car tous les agents sont sur un pied d'égalité concernant la perception de l'état de leur environnement qui est figé à un instant t .

3.3.2 SMA situé multi-couches (MMASS)

Dans le système multi-agents multi-couches (MMASS) [Bandini *et al.*, 2002, 2004], l'environnement est structuré en plusieurs couches, chacune étant représentée par un graphe connexe dont chaque nœud est peuplé par au plus un agent. Une couche ou un sous-environnement peut représenter un espace physique tel que un musée ou une relation logique entre les agents telle que la structure organisationnelle d'une entreprise. Une couche de l'environnement dans MMASS constitue non seulement une source de

perception pour les agents mais aussi un support d'interaction entre les agents. En effet, dans Mmass l'interaction entre les agents se fait de façon indirecte en utilisant l'environnement comme support. L'interaction est donc inspirée du concept de stigmergie que nous allons présenter dans le chapitre 4. Les couches de l'environnement sont connectées par des interfaces spécifiant les informations qui peuvent être propagées d'un environnement à un autre. Une particularité de ce modèle est la notion de type d'agent. Un type d'agent définit les capacités de perception, les actions et les états d'un agent appartenant à ce type. Un agent peut interagir avec ses voisins en s'échangeant leurs états internes, émettre des signaux qui sont diffusés dans l'environnement et qui peuvent influencer le comportement des autres agents. Une action dans Mmass est définie par trois opérateurs : action-condi-effect. Une action est une expression de la forme $f(x_1, \dots, x_n)$ où les x_i sont des variables représentant les conditions et les effets de l'action qui indiquent comment l'état de l'agent et de l'environnement changeront suite à l'exécution de l'action. Mmass a été appliquée dans divers domaines, par exemple le système d'automobile intelligent [Bandini *et al.*, 2005].

3.3.3 Modèle de Brahms

Brahms [Sierhuis *et al.*, 2007] est un environnement de modélisation multi-agents pour la simulation des activités humaines. Brahms est basé à la fois sur la théorie de l'activité, l'action située et la cognition distribuée. Il est structuré autour des concepts suivants : les agents et la notion de groupe, les objets (physiques ou conceptuels), le modèle géographique (i.e. le modèle de l'espace physique dans lequel les agents et les objets du système simulé sont situés), le modèle de communication et la notion d'activité qui est le cœur de Brahms. Un aspect important dans Brahms est la représentation explicite de l'espace. Celui-ci est vu comme un espace discret constitué d'un ensemble de places représentées conceptuellement par des objets spéciaux appelé « area » organisés dans une hiérarchie et reliés par des chemins (paths). En d'autres termes, l'espace dans Brahms peut être assimilé à un arbre en théorie des graphes. Dans Brahms l'environnement peut être vu comme un objet contenant un ensemble de faits représentant son état à un instant t . Les faits sont créés par les agents et les objets. A l'opposé des croyances qui sont locales aux agents, les faits dans l'environnement sont accessibles à tous les agents. Par conséquent, la notion de perception locale de l'agent n'est pas respectée.

Le modèle d'agent consiste en une hiérarchie de groupes d'agents. Un groupe d'agent peut être construit en fonction de critères sociaux, organisationnels ou fonctionnels. Les agents dans Brahms sont des agents BDI situés. La structure interne d'un agent est caractérisée par trois mémoires. Une mémoire de cadre de travail (workframe memory, WRM), Une mémoire de cadre de pensée (thoughtframe memory, TRM), et une mémoire

de croyance (belief memory, BM).

La WRM contient des règles de production permettant de représenter l'action située. La première partie de ces règles et un ensemble de conditions représentant la situation observée par un agent. Lorsqu'elles sont vérifiées, l'agent peut exécuter l'activité se trouvant dans la deuxième partie de la règle, produire de nouvelles croyances ou détecter de nouveaux faits dans l'environnement. Contrairement aux règles de production classiques, l'activité possède une durée. La TRM contient des règles permettant d'inférer de nouvelles croyances à partir des événements qui se produisent dans l'environnement. Ces règles mettent à jour de façon instantanée la BM par de nouvelles croyances. En d'autres termes le cadre de pensée modélise le déroulement du raisonnement de l'agent. La BM représentent les croyances des agents acquises pendant l'exécution d'une activité grâce à la WRM et suite à des événements grâce à la TRM.

Le comportement d'un agent est modélisé par des activités qui sont organisées selon l'architecture de subsomption [Brooks et Connell, 1986]. Trois types d'activités sont considérées : activité complexe, primitive, java activité. Les activités complexes sont les activités qui peuvent être décomposées en sous-activités. Et par conséquent, peuvent faire appel à d'autres activités de bas niveau. Une activité primitive est une activité qui ne peut être décomposée, elle est assimilée à une opération dans la théorie de l'activité. Une activité est déclenchée quand les conditions de sa réalisation contenue dans la WRM matchent avec les croyances de l'agent. C'est à ce moment là qu'une durée est affectée à l'activité celle-ci n'étant pas sa durée réelle mais une estimation. La durée d'une activité complexe est la somme des durées de ses activités primitives et complexes qui la composent. Une activité peut se trouver dans plusieurs états : non-disponible, en cours, interrompue, interrompue avec impasse, terminée. Une activité est non-disponible quand les règles correspondantes dans la WRM ne correspondent pas aux croyances de l'agent, interrompue quand elle n'est plus prioritaire (l'agent a détecté une autre activité prioritaire), interrompue avec impasse lorsqu'elle ne peut être exécutée jusqu'à la fin, terminée lorsque les croyances de l'agent sont favorables à terminaison.

3.3.4 Réflexion

Les SMA situés diffèrent des SMA classiques par le fait qu'un agent est toujours situé dans un contexte spatial et temporel explicitement représenté. Les travaux présentés dans cette section concrétisent les fonctions de l'environnement que nous avons présentées dans la section 3.1.2. En effet, dans MMAS, l'environnement est principalement un support de coordination entre les différents agents dans le système. Dans le modèle influence/réaction, l'environnement possède des lois et la responsabilité de décider quelles sont les influences des agents à exécuter en fonction de ses lois. Le modèle Brahms

propose un SMA situé dans lequel les agents sont de type cognitif. Le rôle de l'environnement y est similaire à celui de SMA plus classiques. Cependant, la particularité de Brahms réside dans sa conception de l'activité. L'activité est un processus complexe qui possède à la fois un état et une durée.

Le modèle que nous proposons dans cette thèse se situe en continuité de ces travaux. En effet, l'environnement est vu comme un support de coordination entre les agents. L'action est vue comme un processus possédant un cycle de vie, c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par une dimension temporelle (une date de début, une durée et une date de fin) ainsi qu'un état (interrompue ou terminée). Cependant, ces travaux ne montrent pas comment les ressources nécessaires à l'agent sont ancrées dans son environnement et comment un agent en extrait l'action à réaliser. Notre travail propose une réponse à ces questions.

3.4 Conclusion

Présenter un état de l'art de l'approche multi-agents est incontournable lorsqu'on propose un modèle basé sur cette approche. Dans ce chapitre nous avons fait un tour d'horizon des principes de base d'un système multi-agents. Nous avons mis l'accent sur l'importance de l'environnement en présentant différentes définitions et points de vue de différents auteurs. Ainsi, l'environnement doit être considéré comme une abstraction de premier ordre dans les SMA. D'une part, car il peut se caractériser par une dynamique propre qui est indépendante des actions des agents et, d'autre part, car les actions des agents dépendent elles-mêmes de son évolution et de sa structure. L'environnement constitue une entité importante dans le cadre de cette thèse vu que la question principale que nous souhaitons traiter est comment représenter les actions de façon située ?

Dans la partie concernant la simulation multi-agents, nous avons présenté les deux approches de gestion du temps les plus utilisées dans les SMA. Le choix entre ces deux approches peut avoir un impact sur la représentation et la simulation de l'action. La question de la granularité du pas de temps est en lien étroit avec la granularité de représentation de l'action, et, par conséquent, avec le niveau de précision des résultats que l'on souhaite observer. Aussi, le choix du pas temps de simulation n'impacte pas seulement la granularité de représentation de l'action mais aussi la granularité de représentation de l'espace. Si l'on fait le choix d'une représentation discrète de l'espace, par exemple sous forme d'une grille, la taille des cellules doit être adaptée au pas de temps utilisé. Concernant l'approche événementielle, nous avons vu qu'elle peut être implémentée par « ordonnancement des événements » ou « analyse d'activité ». Cette approche présente plus de souplesse par rapport à l'approche à pas de temps constant.

Cependant, nous écartons l'implémentation par ordonnancement d'événements qui se base en quelque sorte sur la planification des événements futurs ce qui est en contradiction avec la notion même de l'action qu'on veut représenter de façon située.

Chapitre 4

La coordination des actions

La coordination est un mécanisme que l'on retrouve dans plusieurs situations de nos vies. Pourtant nous sommes inconscients de l'importance de la coordination quand elle est parfaitement accomplie. Par exemple lorsqu'on regarde un match de football, on ne prête pas attention à comment les joueurs se sont coordonnés pour gagner. Cependant, lorsqu'on passe des heures à attendre un train de correspondance, on s'aperçoit rapidement de l'utilité d'une bonne coordination [Malone et Crowston, 1994]. Nous avons donc tous un sens intuitif de ce qu'est la coordination, et nous sommes tous plus ou moins conscients qu'en présence d'un groupe d'individus qui interagissent il y a nécessité de mettre en place un ensemble de mécanismes pour réguler leurs comportements afin d'éviter une dynamique anarchique.

Un système multi-agents est, par définition, constitué d'un ensemble d'agents qui interagissent et, ce faisant, font émerger la dynamique globale du système. Comme dans la vie de tous les jours, les agents ont besoin de se coordonner entre eux afin d'accomplir leurs fonctions et de faire émerger une dynamique cohérente du système.

Par ailleurs, même si nous possédons un sens intuitif de ce que c'est la coordination, cela ne suffit pas pour la comprendre et trouver des solutions pour l'assurer dans un système multi-agents. Une définition claire et cohérente est alors nécessaire. Jennings [Jennings, 1996] définit le terme coordination comme étant le processus par lequel un agent raisonne sur ses actions locales et anticipe les actions des autres agents, afin d'assurer que la communauté agisse de façon cohérente. Cette définition met l'accent sur un procédé de coordination basé sur l'anticipation des actions. Pour assurer cela un agent doit posséder un minimum de capacités cognitives afin qu'il puisse anticiper les actions des autres agents du système. Cependant, comme nous allons le voir dans ce qui suit, il existe plusieurs moyens pour assurer la coordination au sein d'un groupe d'agents, certains nécessitant des agents de type cognitif, d'autres pouvant être mis en œuvre avec des agents réactifs. Par conséquent, nous considérons cette définition de la coordination

comme restrictive, car elle impose un procédé particulier de coordination qui n'est pas générique.

Ferber [Ferber, 1995] définit la coordination comme étant « *les tâches supplémentaires nécessaires à la bonne conduite d'un groupe d'agents* ». Ces tâches sont qualifiées de « non productives », en termes de ce que le modèle doit produire comme résultats, mais influent indirectement sur la cohérence des résultats.

Nous terminons par la définition de Malone et Crowston qui fait consensus au sein de la communauté des systèmes multi-agents et sur laquelle se base ce travail. La coordination est la gestion des dépendances entre les actions [Malone et Crowston, 1990, 1994]. Cette définition permet de comprendre pourquoi les agents doivent se coordonner entre eux car il peut exister des dépendances entre leurs actions. Ainsi, Malone et Crowston ont défini quatre types de dépendances qu'ils nomment : « producteur/consommateur », « partage de ressource », « simultanéité » et « tâche/ sous-tâche ».

Dans ce qui suit nous allons présenter quatre types de dépendance ainsi que les formes et les mécanismes de coordination permettant de les gérer.

Le but de ce chapitre est donc de faire un tour d'horizon des différentes façons de coordonner les actions au sein d'un système multi-agents et de dégager les spécificités, les avantages et les inconvénients de chaque mécanisme de coordination. Ceci afin de pouvoir répondre à la question : quelle forme de coordination est adéquate pour coordonner les actions au niveau opérationnel ?

4.1 Relations de dépendances entre actions

Si la coordination est la gestion des dépendances entre les actions, la première question qui se pose naturellement est quelles sont ces dépendances ? L'identification des différentes dépendances est le premier pas vers le développement des mécanismes de coordination. Cette section se focalise donc sur les quatre dépendances mise en évidence par Malone et Crowston [Malone et Crowston, 1994].

4.1.1 Dépendance « producteur/consommateur »

Cette relation décrit le cas où le produit d'une action d'un agent donné est nécessaire à l'exécution d'une autre action. Un exemple en lien avec les systèmes agricoles peut être le cas où l'action d'un chargement de compost dans une remorque doit nécessairement être terminée avant de procéder à son transport. Ainsi, cette dépendance peut se présenter sous différentes formes :

- Il y a une contrainte d'antériorité : désigne le cas où l'action du producteur doit être complètement finie avant le début de l'action du consommateur (cf. exemple du chargement du compost avant l'action de transport).
- Il y a une contrainte d'utilisabilité : désigne le cas où le produit de l'action du producteur est soumis à des conditions pour qu'il soit utilisable par le consommateur (il faut que le compost soit mature avant d'envisager de l'épandre).

4.1.2 Partage de ressources

Les actions ont besoin de ressources qui ne sont pas en quantité infinie. Par exemple, c'est parce que l'espace est limité sur une route que les voitures ont besoin de se coordonner pour circuler. Aussi, une action nécessite généralement un acteur pour l'exécuter. Certaines actions ne peuvent être exécutées par le même acteur en même temps. Il est nécessaire d'adopter une stratégie pour allouer le temps de travail des acteurs aux différentes actions (ceci constitue un cas particulier de la dépendance partage de ressource connu sous le nom de « dépendance d'assignation de tâche ») de façon à ce que le système produise les résultats attendus. Afin de gérer la dépendance « partage de ressources », un processus d'allocation de ressources est alors nécessaire pour éviter les situations conflictuelles (un accident ou un blocage de la circulation des voitures) ou de favoriser certaines actions au détriment des autres (règles de priorité).

4.1.3 Dépendance de simultanéité

Ce type de relation illustre le cas où plusieurs actions doivent s'exécuter en même temps pour atteindre le résultat souhaité. Par exemple, deux individus qui doivent déplacer une caisse, doivent synchroniser leurs actions. La relation de simultanéité concerne aussi le cas où plusieurs actions sont mutuellement exclusives et par conséquent, ne peuvent pas être exécutées en même temps.

4.1.4 Dépendance tâche/sous-tâche

Cette dépendance désigne le cas où un ensemble d'activités doivent être réalisées afin d'atteindre un but global. La décomposition, la sélection et l'attribution des activités doit se faire en s'assurant que les actions soient sélectionnées dans le bon ordre et attribuées aux agents possédant la compétence nécessaire pour les réaliser.

Afin d'éviter toute situation de conflit, de blocage ou tout simplement afin que l'ensemble des agents de la société évolue correctement, il est indispensable de faire appel à un

ensemble de mécanismes de coordination permettant de gérer les dépendances entre les actions. Ainsi, la question de comment coordonner les actions a conduit les chercheurs en SMA à se poser deux autres questions :

- faut-il voir la coordination comme les processus de gestion des actions qu'un agent doit entreprendre afin d'évoluer de façon harmonieuse dans sa société ? ou
- faut-il voir la coordination comme une émergence de l'interaction d'un groupe d'agents sans que ces agents soient dotés de mécanismes sophistiqués dédiés à gérer les dépendances entre leurs actions ?

Les chercheurs qui ont opté pour le premier point de vue ont développé des mécanismes de coordination dite explicite. Tandis que le deuxième point de vue a donné naissance à la coordination implicite (figure 4.1).

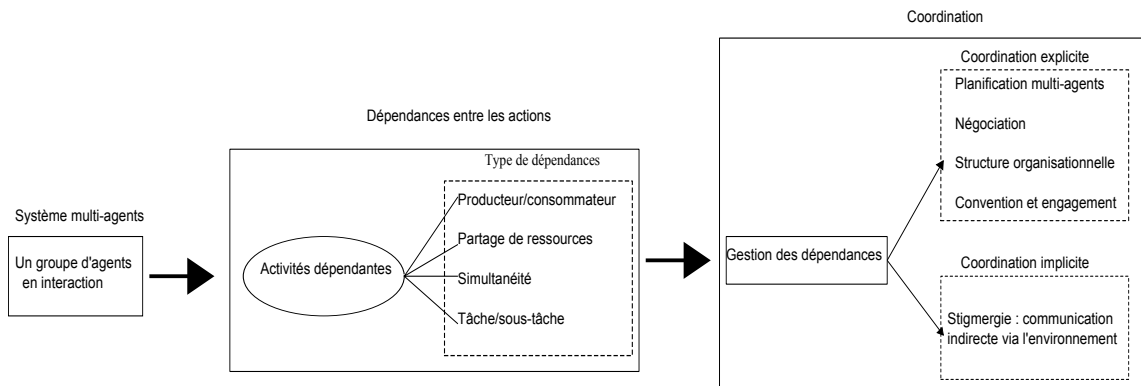


FIGURE 4.1 : Les différentes formes de coordination.

4.2 Les formes de coordination

4.2.1 Coordination explicite

La coordination explicite fait référence aux mécanismes de coordination où la gestion des dépendances entre les agents est décrite en utilisant des protocoles, des procédures et des plans [Schmidt et Simone, 1996]. Ainsi, l'architecture interne de l'agent est dotée d'un module de raisonnement pour expliciter comment chacun des agents impliqués dans le système contribue à la réalisation des buts de ce dernier. Les approches de coordination explicites sont nombreuses, les plus privilégiées au sein de la communauté multi-agents étant : la coordination par planification multi-agents, la coordination par négociation, la mise en place de structures organisationnelles, la coordination par convention et engagement.

4.2.1.1 Coordination par planification

L'approche classique de la coordination explicite est celle basée sur la planification où l'ensemble des agents doivent trouver un consensus sur l'ordre d'exécution de leurs actions afin d'obtenir un plan global coordonné où tous les éventuels conflits sont éliminés. La planification se fait généralement en deux phases : la phase de conception et la phase d'exécution du plan. Le but de la phase de conception est d'obtenir le plan global coordonné tandis que la phase d'exécution est responsable de l'exécution du plan tout en prenant en compte les changements dans l'environnement qui peuvent créer d'autres relations de dépendance. Un agent doit donc être en mesure de s'adapter pendant l'exécution du plan aux changements dans l'environnement. Dans la littérature sur la coordination par planification deux approches sont distinguées : la planification centralisée et la planification distribuée.

Coordination par planification centralisée. La coordination dans cette approche constitue la responsabilité d'un agent central appelé « coordinateur », qui lors de la réception des plans locaux des agents procède à la détection des dépendances entre les actions (e.g. deux agents qui souhaitent utiliser la même ressource en même temps). De façon générale, pour détecter les dépendances, le coordinateur énumère à partir d'un ensemble d'états initiaux et un ensemble de plans les états possibles du monde qui peuvent être atteints. L'agent coordinateur détermine les états du monde à éviter et insère des contraintes entre les séquences d'actions qui peuvent conduire à des conflits. Dans [Georff, 1988], l'auteur illustre ce mécanisme de coordination par une approche où toutes les interactions conflictuelles sont identifiées et regroupées dans des régions critiques. Dans le plan final, des commandes de communication sont insérées pour synchroniser correctement les interactions des agents.

Cette approche de planification est parfaitement adaptée lorsque les agents opèrent dans un environnement peu évolutif et que leur nombre est assez limité. Cependant, dans un environnement hautement dynamique, il est difficile pour l'agent coordinateur de s'assurer qu'entre le moment où les plans ont été coordonnés et le moment de leur exécution que l'environnement n'a pas évolué et que ces plans sont toujours exploitables. Ainsi, cette approche de coordination ne respecte pas la caractéristique fondamentale d'un agent à savoir son autonomie. En effet, chaque agent construit son plan localement mais il ne peut prendre l'initiative de l'exécuter car le plan final doit être calculé par le coordinateur central.

Coordination par planification distribuée. Dans ce cas chaque agent est responsable à la fois d'établir son propre plan et de se coordonner avec les autres agents. Une

solution pour la coordination par la planification distribuée est celle proposée par Durfee et Lesser [Durfee et Lesser, 1991] appelée planification globale partielle (PGP). Cette approche se base sur une organisation hiérarchique des rôles des agents. Un agent peut jouer le rôle de planificateur, d'agent simple ou les deux. Lorsqu'un agent construit son plan, il l'envoie à l'agent coordinateur situé au niveau supérieur dans la hiérarchie. Ce dernier réalise la synthèse des différents sous-plans reçus et identifie les buts communs des agents sous sa responsabilité. Pour chaque but identifié, il crée un plan qu'il communique aux agents concernés. L'agent coordinateur s'appuie sur trois stratégies pour l'ordonnancement local des buts afin de minimiser l'exécution des actions redondantes : il privilégie les actions qui réalisent de façon simultanée plusieurs buts, qui requièrent le moins de ressources et approuvent ou réfutent la poursuite de certains buts.

Contrairement à la planification centralisée, la planification distribuée est mieux adaptée dans un environnement dynamique. Néanmoins, elle partage le même inconvénient que la planification centralisée concernant le non respect de l'autonomie de l'agent. Aussi, la coordination par planification en général requiert un partage d'information important entre les agents. Ceci est acceptable lorsque le système est composé d'un nombre limité d'agents mais s'avère compliqué lorsque le nombre d'agents est élevé. L'application de cette approche nécessite donc des ressources informatique et de communication importantes.

4.2.1.2 Coordination par négociation

Davis et Smith [Davis et Smith, 2003] définissent la négociation ainsi : « *By negotiation, we mean a discussion in which the interested parties exchange information and come to an agreement. For our purposes negotiation has three important components (a) there is a two-way exchange of information, (b) each party to the negotiation evaluates the information from its own perspective, (c) final agreement is achieved by mutual selection* ». La finalité donc de la négociation est d'arriver à un accord permettant aux agents de poursuivre leurs buts. Elle passe généralement par de la communication directe entre les négociateurs et implique des processus de raisonnement permettant à un agent d'évaluer une offre pour pouvoir décider de l'accord à conclure. Ainsi, selon Jennings [Jennings *et al.*, 2001], la recherche sur la négociation automatique comporte quatre éléments : le langage, le protocole de négociation, l'objet de négociation et le raisonnement des agents.

- Langage de négociation : la recherche dans ce cas traite les primitives utilisées dans l'échange des messages entre les agents ainsi que leurs syntaxe et sémantique.

- Protocoles de négociation : les protocoles sont l'ensemble des règles qui régissent l'interaction entre les agents. Elles incluent l'ensemble des participants autorisés, les états de la négociation (e. g. offre acceptée, négociation fermée), les événements qui engendrent le changement de l'état de la négociation et les actions valides des participants pour chaque état particulier (e. g. quel message peut être envoyé par qui, à qui, et à quel stade?). Le protocole de négociation le plus connu et fréquemment utilisé est le Contract Net Protocol [Smith, 1980].
- Objet de la négociation : représente la gamme des résultats ciblés par la négociation (objet de l'accord). L'objet de la négociation peut être singulier (e. g. un prix qui convient aux négociateurs), comme il peut inclure plusieurs paramètres (e. g. le prix, la qualité du produit).
- Le raisonnement des agents : le modèle que l'agent utilise pour prendre des décisions pendant la négociation. La partie la plus importante de la prise de décisions dans ce cas est la stratégie de négociation qui permet de déterminer quelle primitive de négociation l'agent doit choisir à un certain moment. Le processus de décision revient à répondre à la question : « que dois-je faire maintenant ? », par exemple enchérir, abandonner, etc. Pour prendre une décision adéquate, un agent doit être capable de faire un raisonnement stratégique, notamment de raisonner en tenant compte de ce que font/décident les autres agents et, s'il parvient à le savoir ou à le supposer, quel est le modèle de décision des autres agents.

La négociation est un mécanisme qui s'avère particulièrement intéressant lorsque chaque agent possède ses propres objectifs qu'il doit satisfaire indépendamment des autres agents. Chaque agent agit indépendamment des autres, la communication entre agents n'étant nécessaire que lorsqu'un agent a besoin de se coordonner avec d'autres agents.

4.2.1.3 Structure organisationnelle

La coordination dans ce cas est inspirée de la théorie des organisations où à chaque agent est attribué un ensemble de responsabilités et de capacités délimitant son rôle et son autorité au sein de la société d'agents. Ainsi, le comportement de chaque agent est contraint par son rôle et sa relation avec les autres agents, ce qui permet de fournir à l'ensemble des agents du système une vue a priori sur les actions des autres agents et par conséquent réduire l'incertitude locale d'un agent sur le comportement des autres. Il en résulte qu'un agent est capable d'adopter un comportement en évitant tout conflit et en adéquation avec l'objectif du système [Jennings, 1996]. Il est généralement reconnu qu'aucune structure organisationnelle n'est appropriée à toutes les circonstances. Par conséquent, lorsqu'une situation évolue, l'organisation devrait se remettre en cause

pour voir s'il est toujours intéressant de rester dans l'état ou de se restructurer afin de s'adapter à la dynamique de l'environnement.

Les différents mécanismes de la coordination explicite ne sont pas mutuellement exclusifs dans le sens où, généralement, ces mécanismes sont combinés dans un système multi-agents. Le principal inconvénient de ces mécanismes de coordination est l'aspect adaptatif des agents dans un environnement dynamique qui s'avère compliqué. Concevoir des agents dotés d'une grande capacité d'adaptation a été une des préoccupations qui a conduit une partie de la communauté des systèmes multi-agents à se diriger vers des mécanismes de coordination implicite qui s'inspirent principalement des comportements observés sur les insectes sociaux (cf. le concept de stigmergie, §4.2.2.1).

4.2.2 Coordination implicite

Coordonner implicitement les agents signifie que toute interaction entre eux passe principalement par l'environnement. L'inspiration principale de cette forme de coordination, connue sous le nom de « stigmergie », vient des travaux de l'entomologiste français [Grassé, 1959], qui portait sur l'étude des comportements des insectes sociaux.

4.2.2.1 Le concept de stigmergie

Le terme stigmergie (dérivé du mot Grec « stigma » qui signifie « signe » et le mot « ergon » qui signifie « travail ») a été introduit par Grassé [Grassé, 1959] pour décrire une forme de coordination induite par la modification locale de leur environnement par les acteurs. Les travaux de Grassé sur le comportement des insectes sociaux plus précisément sur deux espèces de termites : *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes sp* ont montré que ces insectes accomplissent parfaitement leurs tâches et se coordonnent sans faire appel à une communication directe ou à une régulation centrale de leurs comportements. Les termites utilisent leur environnement comme guide de leurs actions futures et comme support permettant de s'informer mutuellement sur les actions passées. Ainsi, Grassé [Grassé, 1959] postule que : « *la coordination des tâches, la régulation des constructions ne dépendent pas directement des ouvriers, mais des constructions elles-mêmes. L'ouvrier ne dirige pas son travail, il est guidé par lui* ». En effet, bien que le comportement des insectes semble merveilleusement organisé et coordonné, chaque insecte agit localement et semble poursuivre un agenda spécifiant le cours de toutes ses actions sans être conscient de la présence de ses congénères [Theraulaz et Bonabeau, 1999].

La construction du nid chez les termites est l'un des premiers exemples donnés par Grassé pour introduire son concept. La construction du nid passe par deux phases

[Dorigo *et al.*, 2000, Deneubourg, 1977] : la phase d'incoordination et la phase de coordination. Lors de la phase d'incoordination, les termites déposent de façon aléatoire des boulettes de terre imprégnées par des phéromones. Cette phase persiste jusqu'à ce qu'un des dépôts atteigne une taille critique, ce qui constitue la condition pour le déclenchement de la phase de coordination. L'existence des boulettes de terre stimule les termites se trouvant à proximité pour accumuler plus de matériel, ce qui permet d'élargir la portée d'attraction des phéromones puisque plus la taille du dépôt augmente plus l'intensité des phéromones augmente. A la fin de cette phase les piliers du nid émergent si le nombre de termites participants à l'activité de construction des piliers est suffisamment grand. Dans le cas contraire, les phéromones s'évaporent entre deux passages successifs des termites, ce qui mène à un comportement non coordonné et à la non construction des piliers.

Un autre exemple typique de la coordination par stigmergie est celui du processus de recherche de nourriture dans les colonies de fourmis [Deneubourg et Goss, 1989, Dorigo *et al.*, 1996]. Lors du processus de recherche, les fourmis explorent aléatoirement l'environnement autour de leur nid tout en déposant des phéromones. Lorsqu'une fourmi trouve une source de nourriture, elle retourne au nid en empruntant le chemin déjà tracé par ses propres phéromones tout en les renforçant (dépôt de nouvelles phéromones). Ces phéromones étant attractives, elles vont inciter d'autres fourmis dans le voisinage à suivre le chemin vers la nourriture. Celles-ci le renforceront à leur tour par le dépôt d'autres phéromones. La stabilité des chemins établis entre le nid et la source de nourriture par les fourmis, dépend de leur fréquence d'emprunt par les fourmis. Un chemin disparaît au fil du temps quand il n'est plus emprunté par les fourmis du fait de l'évaporation des phéromones. Un aspect important observé dans les comportements de fourmis est leurs capacités à s'adapter à l'évolution de l'environnement. En effet, si un obstacle s'installe au milieu d'un chemin déjà tracé les fourmis vont rapidement créer d'autres chemins menant à la nourriture en contournant l'obstacle.

Ces deux exemples illustrent deux formes de stigmergie : la stigmergie sema-tectonique et la stigmergie basée sur les traces [Parunak, 2006]. La première forme de stigmergie est celle où l'action d'un acteur entraîne un changement physique dans les caractéristiques de l'environnement, tel que l'émergence des piliers chez les termites. La deuxième forme est celle où les acteurs déposent des marques véhiculant des informations mais qui ne modifient pas vraiment l'environnement dans ses caractéristiques physiques, tel que le dépôt de phéromones par les fourmis.

Nous pouvons déjà remarquer un ensemble de propriétés clés de ce concept de stigmergie. Tout d'abord le rôle de l'environnement ne se résume pas à être un support passif

des interactions des acteurs mais plutôt un médiateur et un régulateur de leurs interactions. Par conséquent, chaque acteur interagit seulement avec son environnement local et n'influence qu'une partie limitée de cet environnement. Enfin, les changements dans l'environnement se limitent à des éléments bien définis tels que les phéromones ou les piliers qui sont porteurs de la logique qu'un insecte doit suivre pour faire émerger la dynamique globale.

Dans le contexte de l'informatique en général et dans le domaine des systèmes multi-agents en particulier, la stigmergie a été largement utilisée comme une technique pour la résolution de problèmes complexes [Drogoul, 1993], la coordination [Parunak *et al.*, 2005], la conception et l'optimisation de systèmes [Dorigo *et al.*, 1996]. La principale motivation pour ce concept est la nécessité d'avoir des systèmes robustes et fiables lorsque l'environnement s'avère complexe et imprévisible. Ainsi, l'utilisation de ce concept a donné naissance à deux modèles : le modèle de phéromone digitale et le modèle de coordination par artefact.

Modèle de phéromone digitale. Inspiré du concept de stigmergie un modèle de phéromone digitale (connue aussi sous le nom de phéromone synthétique) a émergé [Parunak *et al.*, 2005]. Ce modèle comporte les quatre éléments suivants :

- la phéromone comme un support d'information, utilisé pour créer un champ de dissipation ;
- un environnement spatial pour localiser et propager les phéromones ;
- les agents représentant les acteurs du monde réel ;
- une architecture d'agents qui subordonne les informations perçues au niveau des phéromones à des actions pour répondre à ces informations.

Les phéromones constituent des structures de données qui portent des informations contextuelles. Par leur propagation dans l'environnement elles vont permettre aux agents les percevant d'agir localement mais d'une façon qui réponde implicitement à la situation globale dans le modèle. Le mécanisme d'évaporation permet inversement de faire disparaître des informations obsolètes et donc d'éviter aux agents d'avoir un comportement qui ne corresponde pas à la situation courante. Notons que cette dynamique est une alternative innovante des systèmes traditionnels de maintien de vérité où une base de connaissances est utilisée pour garder la trace de toutes les connaissances considérées comme vraies jusqu'à ce qu'il y ait une raison prouvant le contraire. Ceci engendre généralement un temps de calcul élevé.

L'essence de la coordination basée sur la stigmergie consiste donc à développer la dynamique des phéromones c'est-à-dire les algorithmes liées à leur propagation dans l'environnement et à leur évaporation.

Modèle d'artefact de coordination. Le concept d'artefact de coordination a été introduit dans [Omicini *et al.*, 2004, Ricci *et al.*, 2006] et trouve son inspiration à la fois dans le concept de stigmergie et la théorie de l'activité. Les modèles de coordination basés sur les phéromones digitales considèrent généralement la famille des agents réactifs. Le concept d'artefact de coordination a été introduit afin de prendre en compte tout type d'agent.

Les artefacts de coordination peuvent être vus comme des entités particulières qui sont utilisées pour créer un environnement de travail commun à l'ensemble des agents du système dont le rôle est de fournir des services de coordination dans un SMA. Une analogie peut être trouvée dans le monde réel, par exemple les signaux routiers, les cartes géographiques, les tableaux, etc. Ainsi, un artefact de coordination possède les caractéristiques suivantes :

- une interface d'usage : définit l'ensemble des opérations qu'un agent peut exécuter pour exploiter l'artefact ;
- les instructions opératoires : décrivent comment l'artefact peut être utilisé ; précisément elles spécifient le protocole d'usage ;
- le comportement de l'artefact : spécifie les aspects internes d'un artefact, i.e. comment l'artefact est implémenté afin de fournir ses services.

Par ailleurs, même si les auteurs des travaux sur les artefacts de coordination ont fourni un cadre unifié pour représenter des interactions indirectes, l'idée de l'utilisation d'artefacts n'est pas nouvelle. Nous trouvons dans la littérature plusieurs travaux dans ce sens tel que le « tableau noir » (blackboard) [Corkill, 1991] qui constitue une sorte de mémoire partagée entre un ensemble d'agents. Par exemple, dans les SMA utilisant un tableau noir, les agents peuvent écrire des messages, mettre à jour des résultats partiels de leurs actions et lire des informations sur les autres agents. Nous pouvons aussi citer les modèles basés sur le concept *d'espace de tuples* (tuples space) introduit dans le langage Linda [Gelernter, 1985].

4.2.2.2 Travaux antérieurs

La stigmergie en optimisation : l'observation des colonies de fourmis a été la source d'inspiration de nombreux algorithmes d'optimisation connus sous le nom « d'optimisation par colonies de fourmis » (Ant Colony Optimisation-ACO). Ces

algorithmes visent à résoudre les problèmes apparentés au problème du voyageur de commerce. Ce dernier consiste à trouver le chemin le plus court permettant de visiter un ensemble de villes sans repasser par la même ville deux fois. Ant System [Dorigo *et al.*, 1996] constitue le premier algorithme basé sur les colonies de fourmis. Dans cet algorithme les fourmis représentent les agents qui se déplacent d'une ville à l'autre tout en déposant des traces sur leur chemin comme la métaphore des phéromones. Un agent choisit de visiter une ville en fonction d'une probabilité proportionnelle à l'intensité des traces perçues qui prend en considération la distance entre les villes. Afin d'éviter à un agent de visiter une ville deux fois, une mémoire de recherche tabou lui est attribuée ce qui lui permet de construire une solution admissible. D'autres variantes améliorées de cet algorithme ont été proposées comme par exemple Ant-Q [Dorigo et Gambardella, 1996] et Ant Colony System (ACS) [Dorigo et Gambardella, 1997].

La stigmergie en système multi-agents

Stigmergie dans un écosystème synthétique : [Brückner, 2000], considère un écosystème synthétique dans lequel un ensemble d'agents contrôle des entités physiques dans le monde réel et en même temps interagit dans un environnement logiciel. L'interaction dans l'environnement logiciel se fait via *l'infrastructure de phéromone*. Cette infrastructure modélise un espace discret qui comprend un ensemble fini de places, et une topologie reliant l'ensemble des places. Un agent est caractérisé par la place qu'il occupe à un instant donné dans le système (sa localisation). Les places voisines sont reliées entre elles par un ensemble de liens bidirectionnels, descendant et ascendant. L'infrastructure de phéromones modélise ainsi un ensemble fini de phéromones. Une trace de phéromone est une spécification d'un objet logiciel qui comprend un seuil d'intensité et d'autres données tel que le sens de propagation. L'infrastructure de phéromone manipule l'intensité de chaque phéromone dans une place comme suit :

- agrégation : sur la base d'une demande d'un agent, l'intensité de la phéromone est mise à jour par la valeur spécifiée par l'agent.
- propagation : lorsque l'intensité de la phéromone dans une place p est mise à jour à la demande d'un agent, la nouvelle valeur de l'intensité sera propagée aux voisins de p dans la direction de propagation de la phéromone (descendant ou ascendant) d'une façon décroissante. C'est-à-dire plus on s'éloigne de la place p , plus l'intensité de la phéromone diminue.
- évaporation : l'intensité d'une phéromone est décrétementée à chaque pas de temps tant qu'il n'y a pas de mise à jour demandée par un agent.

Stigmergie dans un système de pilotage de production : [Hadelin *et al.*, 2004], utilisent aussi le concept de stigmergie dans un système multi-agents pour le pilotage d'un système

de production. Les auteurs définissent trois concepts permettant de mettre en œuvre le processus stigmergique : les agents fourmis artificiels, les phéromones qui sont des structures de données portant des informations, et l'environnement de dissipation. L'environnement de dissipation est un ensemble de localisation où les traces de phéromones peuvent résider. Le système de pilotage de production est représenté par 3 types d'agents : les agents commande, les agents ressource et les agents produit. A chaque agent ressource correspond une localisation dans l'environnement de dissipation. Ainsi, L'agent commande a pour but d'acheminer son produit vers la ressource la plus proche qui peut le traiter. Pour cela il dépose une trace de phéromone qui va être propagée à travers l'environnement de dissipation par des agents fourmi-commande. Ces derniers vont mettre à jour les traces de phéromones qui se trouvent dans des points spécifiques dans l'environnement de dissipation. L'agent ressource collecte les intentions de tous les agents commande, il établit un calendrier dans lequel il spécifie les dates de traitement de chaque demande des agents commande. Il propage à nouveau cette information dans l'environnement de dissipation par des agents fourmis ressource. Dans leurs modèles les auteurs définissent donc deux phases pour la propagation de phéromones : phase descendante et phase ascendante. Dans la phase descendante, les agents fourmis-commande mettent à jour les phéromones dans l'environnement de dissipation qui exprime l'intention d'un agent commande d'utiliser une ressource. Dans la phase ascendante, les agents fourmis ressources mettent à jours les phéromones pour exprimer le calendrier des agents ressources pour le traitement des différentes demandes provenant des agents commande.

4.2.2.3 Propriétés de la coordination implicite

Un certain nombre de propriétés qui différencient la coordination implicite des mécanismes de coordination explicite peuvent être identifiées :

- planification ou anticipation : l'agent a besoin seulement de connaître son état local, la prochaine action à accomplir ou le but à résoudre n'est pas nécessaire pour son action actuelle ;
- mémoire : les agents n'ont généralement pas besoin de garder l'historique de leurs activités précédentes. Toutes les informations sont disponibles dans leur environnement local ;
- connaissance mutuelle : chaque agent évolue de façon indépendante, il n'a pas besoin de connaître les autres agents de la société ni leurs actions ;
- ordonnancement intuitif : chaque action ne peut être déclenchée tant que ses conditions de réalisation ne sont pas vérifiées. Par conséquent, les actions sont exécutées dans un ordre permettant d'aboutir à un résultat satisfaisant ;

- division des tâches : chaque agent effectue uniquement les actions pour lesquelles il a la compétence requise ;
- engagement : un agent n'a besoin de manifester aucun engagement pour une action future vu qu'il agit seulement en fonction des contraintes locales du moment.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les deux formes de coordination connues dans la littérature : coordination explicite et coordination implicite. Dans la coordination explicite les mécanismes présentés sont principalement centrés sur l'agent, c'est-à-dire : comment chaque agent doit procéder pour se coordonner avec les autres agents ? L'accent est mis plus précisément, sur la phase de délibération. Dans la coordination implicite, l'agent n'est pas le centre mais c'est l'environnement qui est central. Comment peut-on bénéficier de ce support commun à tous les agents pour assurer leurs évolutions individuelles d'une façon globalement cohérente ? Notons que la stigmergie basée sur la stigmergie peut être combinée avec une forme de coordination explicite comme dans les travaux de [Hadeli *et al.*, 2004], du fait que la stigmergie touche à la propagation des informations dans l'environnement et non pas à l'architecture interne des agents. Il est alors tout à fait possible d'avoir des agents engagés dans un processus de négociation et utilisant un processus stigmergique pour véhiculer les offres entre eux.

Deuxième partie

Représentation de l'action

Chapitre 5

Positionnement

Nous avons présenté dans la première partie de ce manuscrit un ensemble de théories et de concepts que nous avons jugé pertinents pour la compréhension et la modélisation de l'action au niveau opérationnel à l'échelle individuelle et collective. Dans ce chapitre nous allons présenter notre positionnement par rapport à ces théories et concepts. Précisément il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quelle théorie de l'action (planifiée, située) est adéquate pour la représentation de l'action au niveau opérationnel ?
- Pourquoi se baser sur le concept d'affordance pour représenter l'action située ? Comment sont vues les affordances dans ce travail ?
- Quelle forme de coordination (explicite ou implicite) est appropriée pour la coordination des actions du niveau opérationnel ?

5.1 Quelle théorie adopter ?

Dans les chapitres précédents nous avons manifesté notre intérêt pour une modélisation située de l'action. Le but de cette section est de clarifier ce positionnement. En premier lieu nous allons argumenter notre choix par rapport aux domaines d'application des systèmes agricoles, en second lieu, dans le contexte des SMA. Nous finirons cette section par une présentation du formalisme de représentation de l'action de [Guerrin, 2009] qui constitue le point de départ de notre modèle suivie d'une discussion concernant ce formalisme.

5.1.1 Action située versus action planifiée dans les systèmes agricoles

Le point de départ a été d'analyser les modèles d'action existants dans les systèmes de productions agricoles. Ces modèles d'action ont largement été inspirés des idées que Herbert Simon a développées à propos de l'organisation et de la gestion des administrations [Simon, 2004]. Ils sont basés sur l'étude et la reconstruction des situations de décision dans lesquelles l'acteur peut se trouver. Une action est ainsi vue comme un processus intentionnel permettant d'atteindre un objectif par l'intermédiaire d'une allocation pertinente de ressources [Guerrin, 2001].

Ainsi, le schéma général d'un système de production agricole dans ces modèles, le considère comme la combinaison d'au moins deux sous-systèmes [Keating et McCown, 2001] : le système de production (ou système biophysique) et le système de gestion (ou système décisionnel).

Le système de production. Formalise la structure globale de l'exploitation. Il est composé des entités biophysiques possédant leurs propres processus d'évolution (e.g. le développement des plantes, la production animale, etc.) [Martin *et al.*, 2008]. L'évolution de ce système peut être influencée entre autres, par le système décisionnel que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

Le système décisionnel. Ce système est responsable de la gestion des pratiques agricoles. Il reproduit principalement la tâche de prise de décision que l'acteur est censé accomplir tous les jours [Cros *et al.*, 2001]. Ce système est composé à son tour d'au moins deux sous-systèmes : le manager et le système opérant [Martin-Clouaire et Rellier, 2009].

- *Le manager* : Ce système a la responsabilité de réaliser l'objectif global du système de production. Il dispose généralement d'une stratégie de gestion qui contrôle le système opérant qui lui-même va agir sur le système biophysique [Vayssières *et al.*, 2007]. Cette stratégie est construite sur la base des expériences des acteurs et représentée par un plan ainsi que de contraintes d'exécution des actions. Le plan peut être construit manuellement et utilisé directement dans le modèle ou bien il peut faire l'objet d'une génération automatisée. Un exemple d'instructions générées par le manager est la spécification de l'ensemble des prairies qui seront utilisées dans un cycle de pâturage tournant [Cros *et al.*, 2001].
- *Le système opérant* : Son rôle est d'exécuter les instructions données par le manager. Il est responsable de l'allocation de ressources nécessaires aux actions ainsi qu'au contrôle de la faisabilité des actions indiquées par le manager dans la situation courante (c'est-à-dire par rapport à l'état observé du système biophysique

et de l'environnement extérieur)[Cros *et al.*, 2004].

En résumé, le manager est responsable de la génération des plans d'action ainsi que de leurs contraintes d'exécution et le système opérant est responsable de l'exécution des actions dans le cas où les contraintes de réalisation sont vérifiées et que les ressources nécessaires sont disponibles. Le système biophysique est celui qui subit l'ensemble de ces actions et fournit leurs effets.

Bien que les modèles basés sur la planification tels que ceux présentés ont fait l'objet de plusieurs applications avec succès tels que SEPATOU [Cros *et al.*, 2004] nous avons choisi de nous éloigner de cette vision de l'action caractérisée comme rationnelle (basée sur la vision planifiée) pour plusieurs raisons :

- Du fait que l'élément clé dans ces modèles est la stratégie globale (formalisée par le plan), toute action vérifiée et validée par le système opérant résulte d'un processus de raisonnement a priori. Il est donc difficile de prendre en compte les actions qui peuvent se présenter spontanément à l'acteur dans une situation donnée et qui ne sont pas prévues dans le plan ou indiquées par le système manager. Ceci requiert la remise en cause de la stratégie globale du manager (le plan) et, par conséquent, de le recalculer à chaque fois qu'une situation non prise en compte à l'avance se présente. Par conséquent, l'aspect adaptatif de l'acteur à son environnement est difficilement pris en compte par ces modèles. L'environnement extérieur et le système biophysique sont considérés comme de simples sources d'information qui vont alimenter le système manager pour mettre à jour sa stratégie.
- La deuxième raison tient à la complexité de la construction même du plan d'actions. En effet, certains agriculteurs sont assez instinctifs et ne disposent généralement pas d'un plan à un horizon long mais plutôt ils opèrent à un horizon court, une semaine par exemple, et en fonction de nombreux critères et préférences qui leur sont propres [Vayssières *et al.*, 2007]. Il en résulte qu'il est difficile de construire des plans d'actions sur la base de connaissances et de pratiques génériques. Il existe ainsi des situations où les agriculteurs se basent pour leurs actions sur l'observation quotidienne de l'état de l'exploitation et d'autres où ils planifient. Dans [Vayssières *et al.*, 2007], les auteurs donnent l'exemple du déclenchement de l'action de récolte de canne à sucre qui est planifiée à l'avance avec les usiniers, alors que la récolte du fourrage repose sur l'observation de la hauteur de l'herbe. Mais au-delà de ces principes généraux les dates peuvent varier selon des aléas notamment climatiques. Aussi, le caractère dynamique de ces systèmes peut rendre la construction et la réévaluation du plan complexe. Par exemple, certaines exploitations se trouvant dans les hauts de l'île de La Réunion sont exposées à des conditions climatiques instables. La saison des pluies s'étend sur une période d'environ 8 mois. Les agriculteurs sont sous la contrainte de la pluviométrie. Les

pluies favorisent la croissance des mauvaises herbes dans les champs et les possibilités de récolte sont très limitées. Il en résulte que les agriculteurs ne peuvent pas définir les dates d'ensilage de fourrage a priori car elles sont contraintes par la pluie. Ceci engendre généralement un écart entre les actions dans la réalité et les actions simulées selon un plan. Ainsi, Richards [Richards, 1989] a souligné l'importance d'analyser les systèmes agricoles comme étant influencés principalement par le contexte social et écologique. Les agriculteurs font ainsi souvent appel à leurs capacités d'improvisation imposées par les contraintes du moment.

- La troisième raison tient au niveau de réalisme de ces modèles. Pour expliquer ce point, nous nous sommes basés sur des travaux antérieurs des membres de CIRAD, qui ont porté sur une confrontation entre deux modèles de représentation de l'action dans les systèmes agricoles. Le premier est basé sur l'action planifiée tandis que le deuxième est basé sur l'action située. Dans [Vayssières *et al.*, 2007], un modèle d'action qui tend à être situé a été construit sur la base de connaissances acquises par l'intermédiaire d'un ensemble d'enquêtes réalisées dans un ensemble d'exploitations d'élevage laitier à l'île de La Réunion. Ce modèle d'action est basé sur un ensemble de règles de gestion opérationnelles. Ces dernières ont été formulées et regroupées en trois types : règles de déclenchement (e.g. alarmes), règles de faisabilité (e.g. choix d'action sous conditions de préférences) et règles de caractérisation (e.g. quantification de l'effet des actions en termes de flux). L'ensemble de ces règles ont fait l'objet d'une traduction en un ensemble de fonctions mathématiques tirées du formalisme de représentation de l'action présenté dans [Guerrin, 2007, 2009] et d'une implémentation informatique avec la plateforme de simulation Vensim. Ce modèle d'action a été confronté à un modèle d'action basé sur un plan en comparant les deux approches avec les actions effectives observées dans le cadre des visites bimensuelles aux exploitations agricoles étudiées. La comparaison a porté d'une part, sur les dates de début d'actions d'ensilage et leurs démarrages dans la réalité, d'autre part, sur les quantités d'aliments distribuées aux vaches simulées et dans la réalité. Les résultats présentés ont montré que le taux d'erreur est plus important dans le cas d'une simulation des pratiques agricoles basée sur un plan comparée à celle basée sur un modèle d'action située [Vayssières *et al.*, 2007].

Enfin, nous postulons que ces modèles souffrent d'un manque de représentation de l'interaction entre acteur et environnement de façon explicite. Les actions ne doivent pas être causées seulement par un plan et vérifiées au niveau du système opérant pour connaître leur faisabilité mais elles doivent être vues comme la conséquence de l'interaction acteur/environnement. En d'autres termes, si le niveau stratégique (représenté au niveau du système décisionnel) est nécessaire pour la représentation des principes de gestion technique que les acteurs sont censés envisager pour leurs exploitations, le niveau

opérationnel doit non seulement se plier à ces techniques de gestion mais aussi prendre en compte le caractère instinctif, spontané des acteurs [Guerrin, 2007]. Par conséquent, l'environnement externe et le système biophysique ne doivent pas être vus comme des éléments passifs du système mais des éléments qui participent par les possibilités d'action qu'ils offrent à la détermination des actions qui doivent être réalisées à un moment donné. La responsabilité de l'acteur ne se résume pas à décider a priori de la succession d'actions à réaliser mais surtout à s'adapter à ce que l'environnement lui indique comme actions possibles.

Ces raisons nous ont amené à revoir la conception de l'action classique pour nous positionner dans la vision située de l'action. Nous faisons l'hypothèse que l'action au niveau opérationnel est principalement un processus qui émerge de l'interaction acteur/environnement.

5.1.2 Action située dans le contexte des SMA

Le présent travail se situe dans la classe des SMA situés. Un des aspects clé qui caractérisent les SMA situés est la place qu'occupe l'environnement dans la conception du modèle. Nous avons vu dans le chapitre 3 que l'environnement est considéré par Weyns [Weyns *et al.*, 2007] comme une abstraction de première classe. Plusieurs fonctions lui sont attribuées : structuration des entités du système, gestion de l'accès aux ressources, définition des règles d'évolution de sa dynamique propre, support de communication et de coordination entre les agents. Concevoir l'environnement ainsi peut pallier de nombreuses difficultés qui existaient auparavant dans les SMA telles que les problèmes liés à la simultanéité des actions et la complexité des agents seuls détenteurs de l'intelligence. Cependant, une des difficultés qui reste d'actualité, en lien avec les agents réactifs comme cela a été souligné par Wooldridge [Wooldridge, 1999], est la difficulté de construction d'agents réactifs capables d'assurer un grand nombre de fonctions tout en ne disposant ni de mémoire ni de capacités cognitives. Pour cela il faudrait qu'ils disposent d'un grand nombre de connaissances dans leur environnement local. Ceci nous donne déjà l'idée de la solution à mettre en œuvre pour pallier cet inconvénient. Cependant, dire que l'environnement doit comporter toute les connaissances ne suffit pas pour rester dans la logique des agents réactifs. La connaissance située dans l'environnement doit être fournie sous une forme qui soit compréhensible par l'agent la percevant et directement exploitable pour la sélection de l'action de façon que tout processus de représentation ou d'interprétation des informations perçues soit évité. De cette façon, il sera possible de construire des agents simples (sans mémoire ni mécanisme cognitif complexe puisque

toute les connaissances sont dans l'environnement) capables d'accomplir un nombre important de fonctions. Ainsi, afin de mettre en œuvre une telle solution, nous nous sommes orientés vers le concept d'« affordance » (cf. chapitre 2).

5.1.3 Représentation de l'action selon Guerrin [Guerrin, 2009]

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction de ce manuscrit, la représentation de l'action située a déjà été traitée par [Guerrin, 2007, 2009] et a fait l'objet d'un formalisme mathématique qui prend en compte la dimension temporelle et la notion de situation de l'action. Ce formalisme constitue le point de départ du modèle de représentation de l'action que nous proposons. Dans ce paragraphe nous présentons de façon concise ce formalisme dont certains points ont été repris et développés dans le modèle que nous proposons. Ce cadre de représentation de l'action propose une ontologie « Action-Flux-Stock » basée sur ces trois notions. Les stocks représentent les unités productives telles que les parcelles, les ateliers d'élevages, etc. L'évolution de ces stocks est sujette à des flux entrants et des flux sortants (figure 5.1). L'auteur distingue deux types de flux : les flux biophysiques et les flux agissables. Les flux biophysiques sont causés généralement par des phénomènes naturels et existent en l'absence d'action humaine. Les flux agissables sont ceux causés et contrôlés par les actions humaines (e.g. récolte, vidange de stock, etc). Les actions humaines qui contrôlent les flux agissables sont sujettes à un ensemble de conditions qui sont définies selon des événements et des états des processus observés dans le système (e.g. processus biophysique ou autres, y compris d'autres actions). Un système agricole est donc vu comme l'interaction d'un ensemble de telles unités productives dont l'évolution est contrainte par les flux biophysiques, dotés d'une relative autonomie, et les flux agissables, engendrés par les actions humaines.

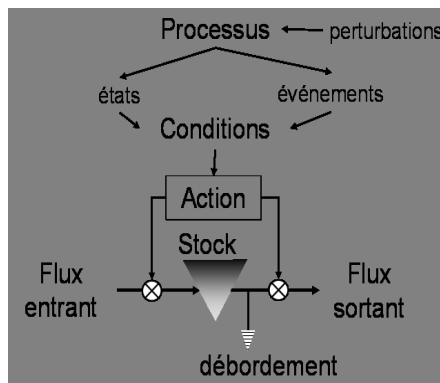


FIGURE 5.1 : Représentation conceptuelle d'une unité de production dans les systèmes agricoles selon l'ontologie « Action-Flux-Stock » [Guerrin, 2009].

Ainsi, le formalisme aborde la représentation de l'action en prenant en compte sa dimension temporelle ; il a été implémenté sous la plateforme de simulation Vensim, basée sur la Dynamique des systèmes.

Représentation de l'état de l'action. L'action est représentée par une fonction binaire du temps qui prend la valeur 0 (vrai) ou 1 (faux) en fonction d'un ensemble de conditions qui représentent la situation dans laquelle l'action peut s'exécuter, c'est-à-dire se déclencher ou se poursuivre.

$$S_A(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } C_A(t) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

$C_A(t)$, est une proposition logique fonction du temps qui représente une conjonction de conditions d'exécution de l'action. Lorsque cette proposition est évaluée à vrai cela représente que la situation courante permet l'exécution de l'action en cours. Dans le cas contraire ($C_A(t)$ est évaluée à faux) cela signifie que l'action en cours doit être interrompue ou terminée.

Les limites temporelles d'une action. Les dates de début et de fin (t_A^-, t_A^+) ainsi que la durée ($\tau_A(t)$) d'une action sont aussi des fonctions du temps, déterminées selon une condition (ou une conjonction de conditions) $P_A^-(t)$ (resp $P_A^+(t)$). Cette dernière qui représente la condition de déclenchement de l'action, est une proposition logique fonction du temps. $P_A^-(t)$ (resp $P_A^+(t)$) peut être spécifiée selon un processus $X(t)$ permettant de générer des événements. Par exemple, $X(t)$ peut être un processus biophysique qui est réputé être observé dans le système pour servir de guide au déclenchement de l'action.

$$t_A^\pm(t) = \begin{cases} t & \text{si } P_A^\pm(t) \\ t_A^\pm(\max(0, t - \tau_s)) & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.2)$$

τ_s est le pas de temps de simulation. Lorsque la condition $P_A^-(t)$ (resp $P_A^+(t)$) est vérifiée cela permet de calculer la date de début ou de fin de l'action correspondante ainsi que de la déclencher (figure 5.2). Dans le cas contraire la valeur $t_A^\pm$ reste identique à sa valeur au pas de temps précédent. Ceci permet de donner au système dynamique une sorte de mémoire permettant de raisonner sur les actions passées à très court terme.

Par ailleurs, l'auteur traite trois cas possibles pour la spécification de la condition $P_A^\pm(t)$: le déclenchement d'une action en fonction d'un artefact, en fonction d'un processus externe ou en fonction d'autres actions.

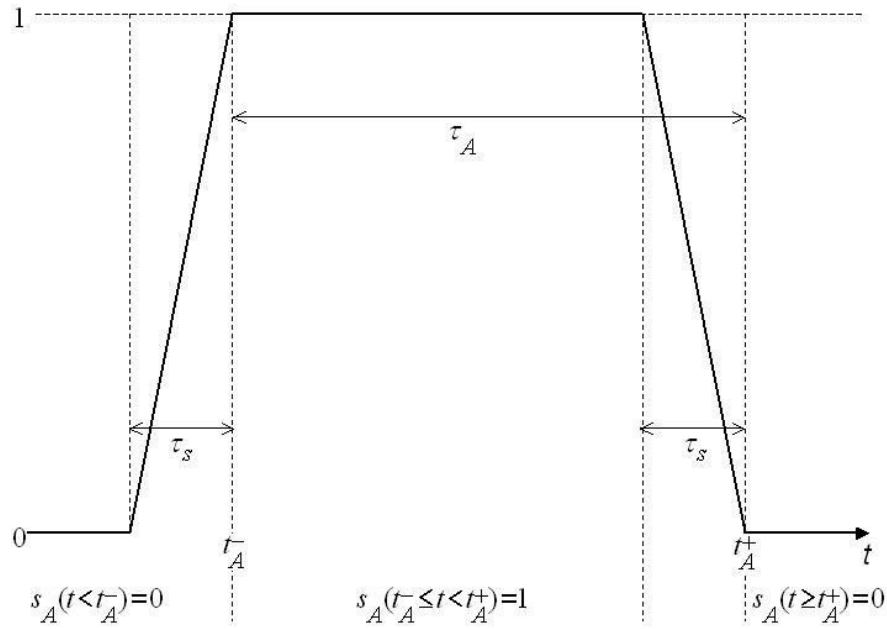


FIGURE 5.2 : Limites temporelles d'une action [Guerrin, 2009]. Représentation d'une action par un intervalle temporel délimité par sa date de début t_A^- et sa date de fin t_A^+ ($\tau_A(t)$ la durée de l'action, τ_s le pas de temps de simulation, $S_A(t)$ l'état de l'action A).

1. *Le déclenchement d'une action en fonction d'un artefact* : ce cas de figure illustre la situation où les limites temporelles d'une action peuvent être modélisée explicitement. Par exemple, la condition $P_A^\pm(t)$ peut être calculée en fonction d'un calendrier spécifiant les dates de début et de fin au plus tôt et au plus tard des actions ou en fonction d'une horloge permettant aux actions récurrentes d'être calculées selon des fonctions périodiques, etc.
2. *Le déclenchement d'une action en fonction d'un processus externe* : ce cas de figure illustre la situation où l'action est déclenchée de façon réactive, c'est-à-dire en réponse à l'observation de l'état courant de l'environnement. Par exemple, la condition $P_A^\pm(t)$ peut être calculée en fonction de l'évolution de l'état d'un stock, dont le niveau franchit un certain seuil.
3. *Le déclenchement d'une action en fonction d'autres actions* : ce cas de figure illustre la situation où une action A peut être dérivée à partir d'une autre action E. Ceci en fonction de certaines contraintes temporelles définies entre ces deux actions en utilisant un formalisme tel que celui des relations temporelles d'Allen [Allen, 1984].

Il convient de préciser que ces cas de figure permettent de représenter l'action selon la vision planifiée (cas 1 ci-dessus) ainsi que selon une vision purement située (cas 2 et 3). Le cas 1 permet de traiter les actions qui sont basées sur une prescription a priori sous forme d'un plan ou d'un calendrier considéré comme une ressource pour l'action. Le

cas 2 permet de traiter les actions qui sont causées seulement par la situation courante (l'observation des processus et des événements dans l'environnement). Le cas 3 permet de représenter des activités complexes sous la forme d'enchaînement d'actions élémentaires devant respecter certaines contraintes temporelles et, donc, de coordonner ces actions entre elles.

5.1.4 Discussion

Le cadre de modélisation que nous venons de présenter considère l'action comme un processus dynamique situé dans le temps et contrôlé par la situation. Chaque action est spécifiée localement en fonction d'un artefact (plan, calendrier, horloge...) ou d'un processus observé (processus biophysique, autres actions). Par conséquent, aucune stratégie globale ou plan central n'est considéré dans ce travail. Plusieurs avantages peuvent être ainsi dégagés d'une telle représentation de l'action tels que la possibilité de simuler des situations complexes, de traiter le parallélisme et la séquentialité entre les actions et leurs interactions, de considérer les situations d'interruption, de reprise et de retard des actions, etc. que l'on rencontre dans la réalité mais rarement dans les modèles existant jusqu'alors [Clancey, 2002].

Bien que la représentation de l'action dans ce formalisme réponde à la vision située de l'action, un élément important qui caractérise l'action n'est pas pris en compte de façon explicite à savoir : la notion de l'espace. En effet, la simulation d'une action selon ce formalisme permet essentiellement de fournir comme résultat les dates de début et de fin d'une action, sa durée, les conditions de sa réalisation et ses effets, notamment sur les ressources consommées (e.g. quantité de fertilisant épanchée). Cependant, il n'est pas possible d'avoir l'information sur la localisation de l'action, ceci est important pour plusieurs raisons :

- D'un point de vue théorique, la situation se définit comme l'ensemble des contraintes et événements observés dans le temps et dans l'espace.
- D'un point de vue pratique, si nous considérons l'objectif de ces modèles présenté en introduction, simuler les systèmes agricoles pour les évaluer vis-a-vis de différents critères, il est important non seulement de répondre à la question : quand l'action s'est-elle déroulée ? en combien de temps ? sous quelles conditions ? mais aussi à la question « où l'action s'est déroulée ? » L'introduction de la dimension spatiale permet aussi de fournir un modèle qui assure un meilleur niveau de réalisme. En effet, du fait que le formalisme de Guerrin se base sur l'approche de la dynamique des systèmes, il ne permet pas la représentation explicite de l'espace, même si certaines relations topologiques entre unités productives peuvent être représentées sous la forme de matrices de distances ou de voisinage. La notion de perception

partielle ou incomplète, caractéristique de l'approche agent n'est donc pas imposée par construction (elle reste cependant possible, dans une certaine mesure, mais à la discrétion du modélisateur). Or, dans la réalité la perception d'un agriculteur est contrainte par son champ de vision, sa localisation et, par conséquent, il ne peut fondamentalement pas avoir une perception globale à tout instant de son environnement.

Il faut aussi souligner l'absence dans ce formalisme de la représentation de l'acteur. Même si les ressources nécessaires à l'action (y compris en termes de force de travail) sont parties intégrantes du formalisme, celui-ci ne permet donc pas de répondre à la question « qui fait l'action ? » Or, l'acteur est un élément important car l'action ne dépend pas seulement de ce qui est observé mais aussi des caractéristiques de l'acteur. Ces limites nous ont donc motivé à nous orienter vers l'approche de modélisation multi-agents. En effet, dans l'approche agent, une action est réalisée par un acteur localisé dans un environnement spatial, sa localisation contraint sa perception et, par conséquent, l'ensemble des actions qu'il peut réaliser. L'approche SMA nous permet de mettre en œuvre l'ensemble de ces éléments par les concepts qu'elle propose : Agent, Environnement, Interaction et donc de dépasser les limites du cadre de [Guerrin, 2009].

5.2 Pourquoi et comment sont vues les affordances ?

Dans cette section nous allons répondre à deux questions. La première concerne l'utilisation du concept d'affordance pour la représentation de l'action. La deuxième concerne la conception de ce concept que nous avons adoptée dans notre travail par rapport à celle que nous avons présentée dans le chapitre 2 (section 2.2).

5.2.1 Pourquoi le concept d'affordance ?

Les concepts d'affordance et d'action située sont fortement liés. Ils ont émergé de façon très similaire comme s'opposant à la vision de l'action classique, qui se base sur la représentation des connaissances et des mécanismes cognitifs d'inférence et de planification. Gibson [Gibson, 1986] a bâti sa théorie en critiquant la vision de la perception indirecte. Les tenants de l'action située [Agre et Chapman, 1987, Suchman, 1987, Clancey, 1997] ; ont bâti leurs théories en critiquant l'idée de la manipulation de représentations symboliques des connaissances et la construction de l'action dans l'esprit avant d'être exécutée dans le monde réel. Ainsi, Gibson favorise le couplage direct entre la perception et l'action et, plus généralement, l'interaction acteur-environnement de la même façon que la théorie de l'action située. Enfin, si la théorie de l'action située s'est intéressée à reconsidérer la place du plan et à montrer l'importance de la situation et ce qu'elle permet

comme ressource pour l'action, le concept d'affordance s'est plutôt attaché à expliciter sous quelle forme les ressources pour l'action existent dans l'environnement et comment le lien entre l'acteur et son environnement peut être établi. Les affordances offrent ainsi une solution élégante pour représenter l'action de façon située car elles proposent de voir l'environnement, non pas comme un élément passif du système, mais plutôt comme un élément qui porte des informations nécessaires pour l'action et qui, implicitement, contrôle à un certain degré l'action. Dans le cadre de notre travail, adopter le concept d'affordance nous permet de représenter les actions au niveau opérationnel en prenant explicitement en compte les conditions environnementales (situations) qui, bien qu'elles jouent un rôle primordial dans la réalisation des actions humaines n'avaient pas jusqu'alors été prises en compte dans la plupart des modèles existants, du moins pas de façon explicite.

5.2.2 Comment sont vues les affordances ?

Les deux visions existantes des affordances les considèrent soit :

- comme étant des propriétés de l'environnement [Turvey, 1992] ou
- comme des propriétés émergentes du système acteur-environnement [Chemero, 2003, Stoffregen, 2003].

La modélisation des affordances dans un SMA selon la première vision, suggère que celles-ci doivent être attachées à l'ensemble des objets présents dans l'environnement et calculées par les agents les percevant. Dans un SMA composé d'un grand nombre d'agents et d'objets, ce type d'approche s'avère problématique car il peut exister un nombre élevé de relations agents/objets à examiner et à évaluer. Le nombre d'affordances calculé par chaque agent peut être alors très élevé. Ceci conduit à une grande lourdeur de calcul et relève de la résolution de problèmes combinatoires. La deuxième vision suggère que les affordances ne sont rattachées ni à l'environnement ni aux agents directement, mais émergent des couples agent-environnement. Cette vision du concept d'affordance, même si elle fait presque l'unanimité, n'a pas encore été intégrée dans la modélisation des SMA. Nous avons donc choisi d'explorer cette voie, d'une part, car c'est la vision la plus défendue dans la littérature et, d'autre part, car elle nous permet d'éviter les inconvénients de la première vision des affordances (cf. section 5.2.2.3) ainsi que d'obtenir une représentation de l'action de façon située. Pour cela, nous nous sommes orientés vers le concept d'émergence et la modélisation des phénomènes émergents dans les SMA.

La prochaine section présente brièvement quelques définitions de l'émergence suivi de l'explicitation du lien que nous établissons entre le concept d'affordance et le concept d'émergence. Nous finissons cette section par montrer comment nous l'exploitons dans notre modèle.

5.2.2.1 Le concept d'émergence

Dans [Wolf et Holvoet, 2005], les auteurs postulent qu'un système exhibe de l'émergence quand il y a l'apparition au niveau global (« macro ») de phénomènes qui résultent dynamiquement des interactions entre les entités élémentaires du système au niveau « micro » sans que ce phénomène ait été explicitement spécifié lors de sa conception. De tels phénomènes émergents sont considérés comme nouveaux par rapport aux parties du système prises individuellement.

L'émergence est un concept général qui dénote le résultat d'un processus non prévisible et qui se manifeste par l'apparition de propriétés, structures ou comportements nouveaux du système considéré. Le niveau se définit par rapport au point de vue de l'observateur. Le niveau « macro » considère le système dans sa globalité tandis que le niveau « micro » considère le système du point de vue des différentes entités qui le composent. Ainsi, Wolf et Holvoet présentent un ensemble de caractéristiques de l'émergence :

- effet micro-macro : fait référence aux propriétés, comportements, structures, qui sont observés au niveau macro et qui sont la conséquence des interactions au niveau micro du système ;
- nouveauté : le comportement global du système est nouveau par rapport aux comportements individuels au niveau microscopique. Ainsi, les individus au niveau microscopique n'ont pas de représentation explicite du comportement global ;
- contrôle décentralisé : le comportement global est influencé seulement par des mécanismes locaux ;
- interaction des parties : sans interaction au niveau micro il n'est pas possible d'observer des émergents intéressants au niveau macro ;
- cohérence : fait référence à une corrélation logique entre les parties. Les « émergences » apparaissent comme des « tout » intégrés qui ont tendance à maintenir un certain sens d'identité dans le temps.
- lien bidirectionnel : il existe un lien entre les deux niveaux (macro et micro). Si le niveau microscopique permet de faire apparaître des émergences (i.e. effet micro-macro), les émergences, en retour, influencent les parties du système au niveau micro.

Dans [David et Courdier, 2009], les auteurs présentent une autre vision de l'émergence. Ils postulent que dans de nombreux domaines d'étude les phénomènes émergents ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à un ensemble de méta-connaissances que possèdent les spécialistes des domaines en question. En partant de cette conception de l'émergence, une méthodologie a été développée permettant la détection et la réification des phénomènes émergents dans un système multi-agents. La réification consiste à matérialiser les phénomènes émergents détectés dans le système. Notre modèle

exploite une partie de cette méthodologie (voir [David, 2010] pour un état de l'art sur le concept d'émergence).

5.2.2.2 De l'affordance à l'émergence

Peut-on voir les affordances comme des émergences ? Voir l'affordance comme une propriété émergente du couple acteur-environnement, et donc non inhérente à l'acteur ni à son environnement, suggère que celle-ci soit observée par un niveau supérieur à celui où l'acteur et l'environnement interagissent. Nous trouvons des similitudes entre cette notion de l'affordance et le concept d'émergence, notamment en ce qui concerne les caractéristiques des phénomènes émergents que nous avons présentées dans le paragraphe 5.2.2.1. En effet, le couple acteur-environnement se caractérise par un ensemble de propriétés et de dynamiques internes ainsi que des comportements qui apparaissent individuellement entre d'une part des acteurs, d'autre part des objets de l'environnement. L'ensemble de ces entités constituent le niveau micro. Au niveau macro, nous trouvons les possibilités d'action (affordances) qui peuvent être observées ou détectées lors de l'interaction de l'ensemble des acteurs avec l'ensemble des objets de l'environnement. Nous y trouvons aussi l'existence de ce lien bidirectionnel : les couples acteurs-objets de l'environnement font surgir les émergences (affordances) qui conduiront aux actions des acteurs et celles-ci, une fois réalisées iront influencer les parties du système, notamment les objets de l'environnement, qui par la suite, et par leurs interactions continues avec les acteurs feront alors émerger de nouvelles affordances et ainsi de suite... Nous trouvons aussi cette notion de nouveauté : les affordances nous informent de nouvelles propriétés du système qui n'étaient pas présentes en tant que telles dans aucune des entités du niveau micro (acteurs et objets de l'environnement).

Ainsi, étant donné que nous considérons, d'une part, qu'une affordance est une propriété dont l'origine est un couple acteur-objet de l'environnement et, d'autre part, qu'elle est relative à un acteur, ce dernier est celui qui est capable de détecter cette affordance et de l'exploiter. Par conséquent, l'acteur joue un double rôle. Il est à la fois un élément du système menant à l'émergence de l'affordance et l'observateur qui est en mesure de découvrir celle-ci. Afin de détecter une affordance, un acteur a non seulement besoin d'avoir un certain nombre de connaissances ainsi que d'être capable d'exécuter l'action correspondante à l'affordance. Par exemple, un agriculteur en percevant sa parcelle est en mesure de détecter plusieurs possibilités d'actions telle que l'action de labour. Un autre individu n'appartenant pas au domaine agricole, n'est probablement pas en mesure de détecter l'action de labour car ils ne possède pas la connaissance nécessaire. La connaissance que possède un acteur dans son domaine constitue l'outil lui permettant de détecter l'existence d'une affordance. Ceci est dans le même ordre d'idée que le postulat

des auteurs [David et Courdier, 2009], qui défendent l'importance d'un certain contexte de connaissances dans le processus de détection des phénomènes émergents.

5.2.2.3 Discussion

Notre modèle exploite en partie l'ensemble de ces idées, en particulier le fait qu'une affordance est une propriété émergente du couple acteur/environnement pouvant être détectée grâce à un ensemble de méta-connaissances. Cependant, nous considérons que les méta-connaissances utilisées pour découvrir les affordances ne sont pas rattachées et spécifiées par rapport à l'acteur mais plutôt sont rattachées à des zones spatiales bien définies. En effet, notre objectif principal est de fournir un modèle de représentation de l'action de façon située. Un des éléments clé d'une action située est la situation qui la cause. Une situation est construite par l'interaction entre l'acteur et son environnement dans un endroit et à un moment précis. Une action peut n'être donc possible que dans une situation, c'est-à-dire à un endroit précis et à un moment donné. Plutôt que de raisonner sur ce qu'un acteur peut faire comme action dans toutes les situations possibles, l'idée est de raisonner sur ce qu'il est possible de faire dans une certaine situation, liée par définition à un lieu déterminé. Ainsi, dans un endroit précis de l'environnement spatial, seul un ensemble de possibilités d'actions parmi toutes les actions possibles dans le système entier peuvent émerger. Par exemple, l'action de labour ne constitue pas une possibilité d'action dans un atelier d'élevage. De ce fait, la connaissance permettant à un agriculteur de détecter cette possibilité d'action n'est pas utile dans un atelier d'élevage. Il est donc plus avantageux et finalement plus logique de considérer du point de vue de la modélisation, que les méta-connaissances qui permettent de détecter un phénomène émergent qui, dans notre cas, représente une affordance, soit rattachées à la portion de l'espace où l'affordance peut éventuellement émerger [Afoutni *et al.*, 2014].

Outre, le fait que cette vision de l'affordance nous permet d'obtenir un modèle de l'action située, elle nous permet d'éviter l'inconvénient de l'approche qui considère qu'une affordance est une propriété intrinsèque de l'environnement. En effet, puisque la détection d'une affordance est limitée à une zone spatiale bien définie, nous restreignons l'espace de recherche des affordances, ce qui nous permet d'éviter la résolution des problèmes combinatoires.

5.3 Sur quelle forme de coordination doit-on se baser ?

Nous avons vu dans le chapitre 4 deux formes de coordination : la coordination explicite et la coordination implicite. Cette section se focalise sur le choix de la forme de coordination à adopter dans le modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel. Le critère sur lequel se base notre choix est le respect du caractère situé de l'action. La question est donc comment peut on assurer la coordination de l'action dans un modèle où l'action est vue comme un processus situé ?

5.3.1 Coordination explicite

Coordination par planification. La coordination par planification multi-agents est de prime abord écartée vu que nous visons à représenter les actions de façon située. De ce point de vue, le plan ne constitue qu'une ressource pour l'action mais pas son principal déterminant. Il en résulte que nous n'aurons donc pas besoin non plus de coordonner un ensemble de plans, même dans le cas où ceux-ci sont individuels.

Négociation. La coordination par négociation, est un mécanisme de coordination intéressant dans le cas où l'on a un système composé d'un ensemble d'agents où chacun agit pour satisfaire ses propres buts. En effet, la coordination par négociation est utilisée généralement dans les SMA où les agents sont en compétition. Dans notre domaine d'application, il est possible de trouver des cas de figures où la négociation s'avère intéressante, par exemple dans le cas où l'on a une unité qui produit les fertilisants et une parcelle qui consomme ces fertilisants. Un mécanisme de négociation peut alors être mis en place afin de mettre en accord les agents des deux unités sur la nature et la quantité de fertilisants à transporter, la date de transport, le prix, etc. C'est ce mécanisme qui avait été implémenté dans le SMA Biomas, développé à La Réunion pour gérer les effluents d'élevage au niveau du territoire [Courdier *et al.*, 2002]. Cependant, même si la négociation est un mécanisme intéressant, que l'on retrouve aussi dans les systèmes de production agricoles [Courdier *et al.*, 2002], nous n'avons pas opté pour ce mécanisme. La principale raison tient au fait que ce mécanisme peut être un processus long. Or les actions que l'on veut simuler, qui relèvent du niveau opérationnel, sont des actions qui opèrent à très court terme.

Structure organisationnelle. La structuration organisationnelle est une méthode qui impose d'avoir un système où l'on peut définir les responsabilités, les rôles et les relations d'autorité entre les entités qui le composent. Dans notre domaine d'application,

nous trouvons l'idée de hiérarchie ou d'autorité au sein d'organisations de producteurs (coopératives, groupements d'agriculteurs,...). Cependant, la notion de hiérarchie est pratiquement absente dans le cas de producteurs indépendants. Nous avons fait le choix de ne pas prêter attention aux possibilités éventuelles de structuration des systèmes agricoles. En effet, même si les agriculteurs font parfois parties prenantes de différentes structures, celles-ci leur imposent des contraintes mais elles ne les pilotent pas au niveau opérationnel. Cela relève plutôt des niveaux tactiques ou stratégiques. De plus, ce type de mécanisme assure une coordination limitée, dans le sens où l'ensemble des rôles et des responsabilités attribuées aux entités du système ne couvrent pas toutes les situations de coordination. En effet, un agriculteur peut être face à une situation imprévisible qui nécessite d'être traitée rapidement. Dans ce cas rien ne peut l'obliger à respecter un quelconque rôle ou règle préétablie bien qu'il doive toujours exercer son action dans le cadre de contraintes (non seulement techniques, mais également réglementaires) souvent assez développées.

5.3.2 Coordination implicite

La coordination implicite, notamment par stigmergie (i.e. basée sur une modification locale de l'environnement), est un mécanisme de communication indirecte entre les agents par l'intermédiaire d'un ensemble d'objets situés dans l'environnement qui constituent le support ou le canal de communication. Il n'existe donc pas d'interaction acteur/acteur mais seulement des interactions acteur/environnement. Par conséquent, chaque acteur agit en réponse à ce qu'il perçoit comme connaissance dans les objets situés dans son environnement local. Nous pouvons remarquer ici une similarité cohérente avec l'action située qui, rappelons-le, postule que les opportunités d'action sont ancrées dans l'environnement, celui-ci étant constitué notamment par des objets qui le structurent et contraignent les actions. De ce fait, il est évident que le choix de la coordination implicite, notamment par stigmergie, s'est imposé par lui-même dans notre travail.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons argumenté notre positionnement par rapport à la théorie de l'action située, le concept d'affordance et la coordination implicite ainsi que les systèmes multi-agents. Nous concluons par :

1. La nécessité de considérer l'action dans les systèmes agricoles comme un processus qui émerge de l'interaction acteur/objets de l'environnement ;

2. l'environnement doit intégrer toutes les ressources et les connaissances nécessaires pour l'action ;
3. une solution possible pour la modélisation des affordances comme propriétés émergentes du couplage acteurs/environnement consiste à utiliser le concept de méta-connaissances comme un outil pour leur détection. Ces méta-connaissances doivent être définies et rattachées à la situation, et donc à l'environnement spatial local où l'affordance peut émerger ;
4. la coordination implicite par stigmergie permet d'assurer la cohérence du modèle avec une représentation située de l'action.

Chapitre 6

Un modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel

Ce chapitre présente notre modèle de représentation de l'action au niveau opérationnel qui se base sur la théorie de l'action située. Dans cette perspective, l'interaction entre l'acteur et son environnement crée une situation qui elle-même cause l'action. L'acteur n'est plus vu comme l'unique décideur de quelle action exécuter ou interrompre ou annuler. Plus encore, nous postulons que le rôle de la situation est plus déterminant que celui de l'acteur : même si l'acteur a l'intention de réaliser une action, si la situation ne le permet pas alors l'action ne sera pas réalisée.

Le fondement de notre proposition part ainsi du principe que toute action au niveau opérationnel est dictée par la situation créée à un instant t dans un endroit précis par l'interaction entre l'acteur et son environnement. Il s'agit donc de se détacher du point de vue traditionnel qui stipule que l'acteur est le décideur principal de l'action et que l'action suit automatiquement la décision. Il s'agit alors de transférer notre centre d'intérêt de la décision sur l'action vers la situation où l'action se produit ou pas.

Nous proposons une architecture multi-agents où l'idée de la situation qui dicte l'action est représentée par un agent abstrait, c'est-à-dire n'ayant pas d'équivalent direct dans le monde réel. L'agent en percevant une situation est capable d'identifier l'ensemble des affordances émergentes ainsi que déterminer l'action à exécuter. Étant donné, qu'une situation se crée dans un endroit précis de l'environnement spatial, nous appelons cet endroit une « place » et l'agent en question un « agent-place ». Notre modèle est constitué donc d'un ensemble fini d'agents-places dont chacun est responsable du pilotage d'une place et d'une seule. D'autre part, selon notre postulat que l'action est dictée par la situation, le rôle de l'acteur se limite à (i) participer à la création d'une situation à un instant t (ii) exécuter l'action dictée par cette situation. Le rôle des entités passives du système étudié (i.e. les objets dépourvus de capacités d'action) est de (i) participer

à la création de la situation à ce même instant t (ii) subir l'action exécutée par l'acteur. L'acteur du monde réel ainsi que tout ce qui constitue son environnement sont représentés par des entités non-autonomes (i.e. des entités qui n'ont pas la capacité de prendre l'initiative d'agir), appelées « entités-environnementales ». L'action à l'échelle individuelle est déterminée et déclenchée dans un endroit précis de l'environnement spatial et à un temps déterminé par un agent-place tandis qu'elle est exécutée et subie par les entités-environnementales du système réel modélisé.

Nous proposons donc un modèle où la vision classique des SMA est inversée. En effet, habituellement dans les SMA, l'acteur est représenté par un agent, entité autonome du système dotée de tous les mécanismes lui permettant de percevoir son environnement, de raisonner sur les percepts et d'exécuter l'action qu'il juge appropriée ; tandis que les autres entités du système sont représentées par les objets de l'environnement. Dans notre cas, l'acteur est représenté par une entité non autonome, située dans l'environnement spatial, dont le rôle principal est d'exécuter et/ou de subir l'action. Cette dernière est dictée par la situation créée par la conjonction de ces entités environnementales et des agents-places (représentant l'acteur en interaction avec son environnement). La détection des affordances préalables à l'action et le déclenchement et le contrôle de l'action elle-même se fait par les agents-places.

La figure 6.1 fait ressortir deux niveaux dans le modèle : niveau Environnement et niveau Agent. Le niveau Environnement, dans lequel on trouve les entités-environnementales qui correspondent aux entités du monde réel telles que les agriculteurs, les outils objets matériels, les parcelles, les routes, les bâtiments, les animaux, les plantes, etc. Ce niveau est celui :

- qui est susceptible de faire émerger des affordances et fournir les conditions d'exécution des actions ;
- où l'on implémente la dynamique interne du système modélisé, telle que les processus biophysiques qui s'y déroulent (croissance des plantes, mouvement des animaux, conditions climatiques, par exemple) ;
- où l'on observe les effets des actions exécutées.

Le niveau Agent est celui où les mécanismes nécessaires à l'action sont mis en œuvre, représentés sur la figure 6.1 par les numéros cerclés :

- phase 1 : construction des percepts par les agents-places à partir des entités-environnementales qu'ils perçoivent ;
- phase 2 : détection des affordances qui émergent de sous-ensembles d'entités-environnementales perçues ;
- phase 3 : marquage de l'environnement (stigmergie) et/ou réification des affordances détectées ;

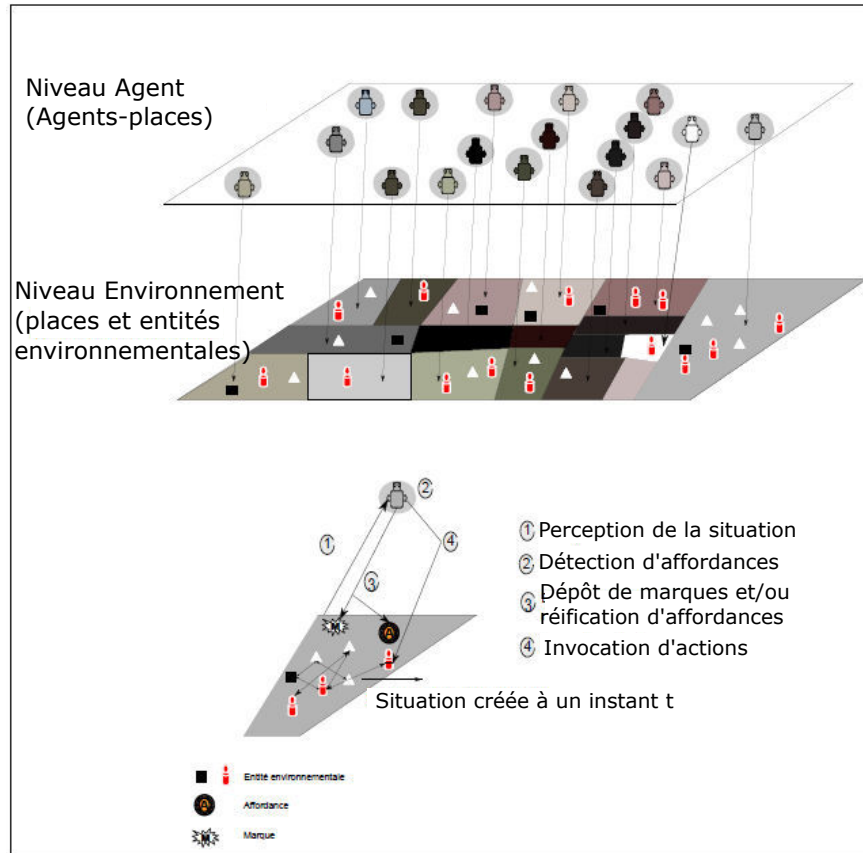


FIGURE 6.1 : Architecture de notre modèle de représentation de l'action au niveau Environnement et niveau Agent ; phase principales de réalisation de l'action (numérotées de 1 à 5).

- phase 4 : détermination de l'action à réaliser et déclenchement de celle-ci au niveau de l'entité-environnementale capable de l'exécuter.
- phase 5 : réalisation des effets de l'action exécutée par modification de l'état des entités environnementales concernées et de la situation dans laquelle se déroule l'action.

Par ailleurs, comme nous l'avons précisé dans la première partie de ce manuscrit, nous sommes aussi concernés par la coordination des actions dont nous avons indiqué qu'elle devait être indirecte et donc s'inspirer de la stigmergie. Celle-ci est basée sur le concept de *marque* qui représente la métaphore de phéromones (cf. chapitre 4, section 4.2.2) et un ensemble d'algorithmes représentant la dynamique de ces marques, c'est-à-dire leur propagation dans l'environnement et leur évaporation. Le rôle des marques consiste à véhiculer un ensemble d'informations entre les agents-places. Par exemple, un agent-place sollicitant une entité-environnementale (e.g. un agriculteur) afin d'exécuter une action quelconque. Dans ce cas, l'agent-place exprime sa demande en déposant une marque sur la place qu'il contrôle, qui est propagée par son voisinage de proche en proche jusqu'à éventuellement atteindre et informer l'agent-place possédant cette ressource de la

requête de l'agent-place initial. Les agents-places se coordonnent donc en communiquant de façon indirecte par l'intermédiaire des marques déposées dans l'environnement par leurs congénères.

En résumé, le modèle est constitué :

1. d'un ensemble d'entités-environnementales représentant les acteurs du monde réel et toutes autres entités du système étudié dont le rôle est d'exécuter ou de subir une action ;
2. d'un ensemble de marques utilisées pour assurer la coordination implicite entre les agents-places ;
3. d'un environnement spatial sur lequel les entités-environnementales sont situées ;
4. d'un ensemble d'agents-places dont chacun est responsable du pilotage d'une place, et dont le rôle est :
 - de déterminer à tout instant l'action à exécuter au niveau de la place qu'il gère ;
 - de se coordonner avec les autres agents-places.

Le modèle est donc structuré autour de sept concepts : **entité-environnementale**, **environnement spatial**, **situation**, **affordance**, **action**, **agent-place** et **coordination des actions**. Nous présentons le modèle en quatre parties : la première décrit les éléments qui structurent le modèle (entités-environnementales, espace), la deuxième partie portent sur les concepts liés à l'action (agents-places, situation, affordance et action), la troisième partie porte sur l'architecture d'agents et enfin la dernière partie porte sur la coordination des actions par stigmergie.

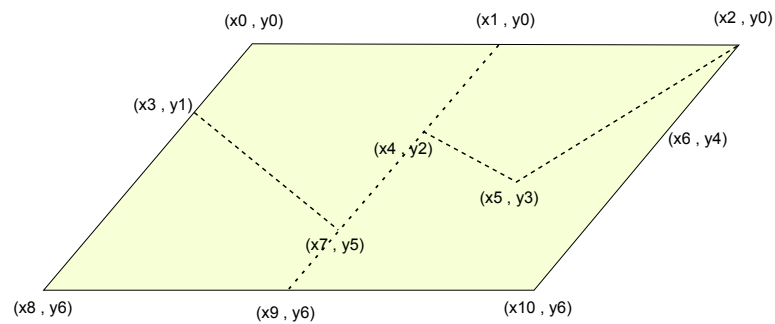
6.1 Éléments structurant le modèle

Dans cette section nous allons aborder la représentation de l'environnement spatial ainsi que des entités-environnementales. Ces éléments constituent le niveau Environnement (figure 6.1) où sont ancrées toutes les informations liées aux affordances et aux actions. Ainsi, comparé au schéma général d'un système de production agricole que nous avons présenté dans le chapitre 5 (section 5.1), ce niveau peut être assimilé au système de production. En effet, c'est à ce niveau que peuvent être implémentés les processus déclenchés suite à l'exécution d'actions.

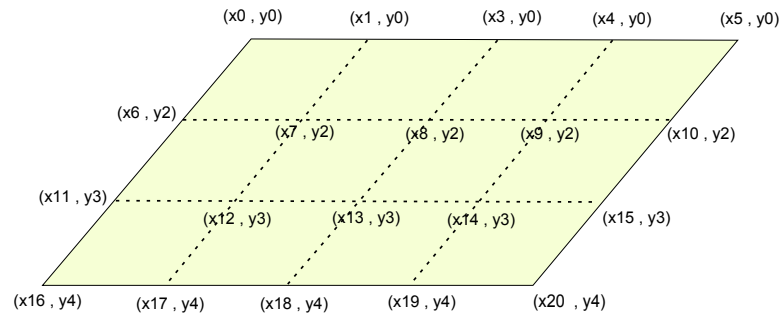
6.1.1 Environnement spatial

L'environnement spatial représente l'univers dans lequel les entités-environnementales sont localisées. Dans le domaine agricole, l'environnement spatial correspond à l'ensemble

des parcelles, des chemins, des bâtiments qui composent l'exploitation. Cet espace peut être représenté de façon discrète par un graphe ou une grille de cellules ou de façon continue. Nous avons opté pour une représentation continue de l'espace. Celui-ci est un espace euclidien à deux dimensions où chaque entité-environnementale est caractérisée par sa position définie à l'aide d'un repère de coordonnées. Cette espace est constitué d'un ensemble fini de *places* où chaque place est définie par un vecteur de coordonnées (figure 6.2). Chaque place peut avoir ainsi n'importe quelle forme géométrique. Il en résulte que l'espace peut être constitué d'un ensemble de places de tailles et de formes identiques ou d'un ensemble de places de tailles et de formes différentes. Toute place de l'environnement spatial est pilotée par un agent-place.



a. Discrétisation irrégulière
de l'espace



b. Discrétisation régulière
de l'espace

FIGURE 6.2 : Représentation de l'environnement spatial. L'espace, continu, est partitionné en « places » de façon irrégulière ou régulière. Chaque place est caractérisée par un vecteur de coordonnées en deux dimensions.

Nous avons choisi cette représentation de l'environnement spatial afin de rester fidèle à l'idée que c'est la situation qui dicte l'action. Comme nous l'avons précisé précédemment une situation se crée en un lieu déterminé par l'interaction entre l'acteur et les entités qui l'entourent. La solution la plus évidente pour représenter notre idée est de définir

des portions de l'espace bien délimitées (des « places ») et de les faire observer par des agents capables d'identifier la situation qui s'y crée afin de déterminer les actions à y exécuter. Ceci nous permet de restreindre les connaissances nécessaires à l'agent-place pour détecter et déclencher les actions qu'à ce qu'il est possible de faire sur la place qu'il gère. Ce qui permet de limiter le nombre de relations (agents/entités) à évaluer pour détecter les affordances.

Bien que l'environnement spatial soit partitionné en un ensemble de places, nous considérons cette représentation de l'espace comme continue car les positions de tout objet y sont données par des coordonnées à valeurs réelles (y compris, donc, les coordonnées permettant de localiser les points caractérisant les places qui partitionnent l'espace) et non par des nombres entiers comme c'est le cas en général dans les représentations discrètes.

Par ailleurs, la représentation de l'environnement spatial comme étant constitué d'un ensemble de places nous a mené à la question de comment l'espace peut être partitionné? En effet, le partitionnement de l'espace influe sur la précision des résultats de la simulation. Pour cela nous proposons quelques pistes sur lesquelles il est possible de se baser pour déterminer la taille des places :

- l'espace peut être partitionné en prenant en compte les actions à réaliser. En effet, les actions réalisées au niveau des ateliers d'élevage sont différentes de celles exécutées sur les parcelles, la gestion de ces deux portions de l'espace est donc différente.
- les caractéristiques mêmes de l'espace. Par exemple, certaines actions se font de façon différente selon la parcelle est en pente ou plate. Dans le cas d'une parcelle qui est en partie en pente et en partie plate son évolution va dépendre de comment les actions sont réalisées et par conséquent le choix de la taille des places doit se faire en prenant en compte ce critère si l'on veut obtenir des résultats qui se rapprochent de la réalité.

Définition 1. *L'espace P est un espace euclidien à deux dimensions constitué d'un ensemble de places p caractérisées par :*

- id_p l'identifiant de la place ;
- v_p vecteur de points de coordonnées qui spécifie la géométrie de p ;
- id_{g_p} l'identifiant de l'agent qui gère la place p ;

6.1.2 Entité-environnementale

Les entités-environnementales représentent les acteurs et les entités passives du système étudié. L'ensemble des entités-environnementales localisées dans la même place à un instant t créent, à travers leurs interactions, la situation dans cette place. Chaque entité de cet ensemble est susceptible de participer à l'émergence d'affordances. Ainsi, une entité-environnementale se différencie d'un agent par l'absence de capacité à prendre l'initiative d'agir. Cependant, une entité-environnementale peut posséder la capacité d'exécuter un certains nombre d'actions, mais, dans notre modèle, celle-ci ne s'exercera que sous le contrôle d'un agent-place. Nous distinguons deux types d'entité-environnementale : *objet-passif* et *actuateur*.

Objet-passif il représente toute entité environnementale qui ne possède pas les capacités de réalisation des actions mais qui peuvent seulement subir les actions exécutées par d'autres entités-environnementales appelées actuateurs. Un objet-passif, se caractérise par l'ensemble des actions qu'il peut subir. Son état peut évoluer suite à une action externe, ce qui constitue l'effet de l'action subie, ou à des processus internes. Par exemple, dans les systèmes agricoles, un stock d'effluent, un tracteur, une plante, etc. peuvent être représentés par des objets passifs. Une plante constitue une entité qui peut subir plusieurs actions telles que l'action de récolte. Une information caractérisant son état interne peut être sa taille, sa couleur, son stade phénologique, ou d'autres attributs. Un processus interne peut être l'évolution de sa taille ou de son stade de développement en fonction de la température, de la quantité d'eau reçue, des caractéristiques du sol, etc.

Actuateur c'est une entité-environnementale qui possède des capacités de réalisation d'actions et par conséquent peut contribuer à faire émerger les affordances correspondantes. Tout objet-passif, peut éventuellement devenir un actuateur lorsqu'au moins une de ses capacités est nécessaire à l'exécution de l'action correspondante à l'affordance détectée. Par exemple, un agriculteur possède plusieurs capacités telles que conduire un tracteur. Un tracteur possède la capacité de transporter le fertilisant. Ces capacités sont nécessaires pour exécuter l'action de livraison de fertilisant. Dans le cas où cette action devient possible à un instant t , l'agriculteur et le tracteur deviennent l'actuateur possédant la capacité nécessaire pour exécuter l'action de livraison de fertilisant. On peut aussi imaginer le cas où les entités-environnementales peuvent être à la fois objets-passifs et actuateurs. Prenons un cavalier et sa monture. Celui-ci exécute l'action de conduire l'animal mais en même temps supporte ses écarts. L'animal exécute l'action de se déplacer dans l'espace mais en même temps obéit (la plupart du temps) aux ordres du cavalier.

Par ailleurs, même si certaines entités-environnementales seront essentiellement des objets passifs, d'autres qui peuvent à la fois subir des actions et possèdent des capacités d'action, verront la caractérisation de leur rôle dans le système dépendre de l'affordance détectée à un instant t qui pourra donc changer en fonction de la situation (temps, lieu, environnement) dans laquelle elles se trouveront.

Cette caractérisation permet de différencier, en fonction de l'affordance et de l'action à exécuter, l'entité qui exécute l'action de l'entité qui la subit. Ceci permet de répondre à la question : qui exécute l'action ?

L'idée de différencier l'entité qui exécute l'action de l'entité qui subit l'action a déjà été proposée dans l'approche IODA (Interaction-Oriented Design of Agent simulations) [Kubera *et al.*, 2011]. Dans cette approche tout comportement est vu comme une interaction et toute entité est considérée comme un agent [Kubera *et al.*, 2010]. Tout agent peut être actif (source d'une « interaction »), passif (cible d'une « interaction ») ou labile (évoluant par lui-même sans influence externe). Dans notre cas, nous différencions la notion d'entité-environnementale de la notion d'agent. Une entité-environnementale est toujours passive dans notre modèle car elle ne peut en aucun cas initier une action et elle est pilotée par un agent-place. Un agent-place est toujours actif car il initie les actions et pilote les entités-environnementales situées sur sa place. Un agent-place est donc toujours une « source » et une entité-environnementale toujours une « cible » d'interactions au sens de IODA. Par contre, parmi les entités-environnementales, les « actuateurs » occupent une position intermédiaire étant à la fois cible (des ordres des agents-places) et source (des actions exécutées sur des objets passifs). Ainsi, tout comme dans IODA où la caractérisation de l'agent source et de l'agent cible dépend de l'interaction dans laquelle peuvent être impliqués les agents, la caractérisation d'une entité-environnementale (actuateur ou objet-passif) dépend des affordances détectées sur chaque place.

Exemple

Considérons l'action d'épandage de lisier de porc. Cette action peut être vue comme la composition de plusieurs sous-actions : transférer le lisier vers la tonne à lisier, transporter le lisier vers la parcelle, épandre le lisier sur la parcelle.

Transférer le lisier : cette action consiste à vider le stock de lisier et remplir la tonne à lisier. Elle nécessite un agriculteur pour la vidange et le remplissage. Ici, le stock et la tonne à lisier constituent les deux objets passifs qui vont subir l'action de transfert de lisier tandis que l'agriculteur est l'actuateur qui réalise cette action.

Transporter le lisier : cette action nécessite un attelage tracteur-tonne à lisier et un agriculteur pour le conduire. Le lisier constitue l'objet passif qui subit l'action de transport. L'agriculteur et l'attelage tracteur-tonne à lisier constituent ensemble l'actuateur pouvant transporter le lisier.

Épandage : cette action nécessite d'une part une parcelle, un tracteur et une tonne à lisier pour épandre ainsi qu'un agriculteur pour conduire le tout. La parcelle constitue l'objet passif qui subit l'action d'épandage. L'agriculteur, le tracteur et la tonne à lisier représentent ensemble l'actuateur effectuant cette action d'épandage.

Définition 2. *Une entité-environnementale est une entité constitutive du système pouvant participer à une affordance, susceptible de subir ou d'exécuter une action, ayant des processus internes, pouvant éventuellement modifier son environnement par l'intermédiaire de ses capacités d'action. Elle se caractérise par l'absence d'autonomie.*

Une entité-environnementale e se caractérise par :

- id_e l'identifiant de l'entité-environnementale représenté sous la forme d'une chaîne alpha numérique. Cet identifiant est unique ;
- V_e l'ensemble des variables qui modélisent l'état de e : $V_e = \{v_{e_1}, v_{e_2}, \dots, v_{e_n}\}$;
- C_e l'ensemble des capacités d'action de e , tel que : $C_e = \{c_{e_1}, c_{e_2}, \dots, c_{e_n}\}$;
- S_e l'ensemble d'actions (à simuler) pouvant être subies par e , tel que : $S_e = \{s_{e_1}, s_{e_2}, \dots, s_{e_n}\}$;
- D_e l'ensemble des fonctions qui calculent l'évolution de l'état interne.

6.2 L'action comme un processus situé

Nous modélisons l'action comme un processus situé en deux étapes. Il s'agit en premier lieu de détecter les affordances émergentes à un instant t . Une affordance constitue une condition nécessaire à l'action. La deuxième étape consiste à déclencher et mettre à jour l'état des affordances dont les situations sont favorables à la réalisation effective d'actions. Dans cette section, nous abordons la notion de situation, la détection et la réification des affordances et, enfin, la représentation de l'action elle-même.

6.2.1 Situation

Dans le chapitre 1, nous avons présenté une description de la situation comme étant l'état de l'environnement dans le temps et l'espace perçu par un acteur. Ici, par « environnement », on entend tout ce qui est extérieur à l'acteur et en relation avec ses actions. La perception de cet environnement fournit des contraintes de différentes natures (ex. disponibilité des ressources, conditions climatiques...) qui restreignent la gamme des possibilités d'actions [Guerrin, 2009]. Comme nous l'avons déjà dit, les entités environnementales qui composent l'environnement, leurs états, ainsi que les actions qu'elles peuvent réaliser ou subir en un lieu et à un temps donnés forment des situations. Par conséquent,

une situation peut être vue à un certain niveau d'abstraction comme constituée de l'ensemble des affordances qui émergent de l'interaction de ces entités. Outre ces affordances, il existe d'autres informations perceptibles dans l'environnement, qui représentent des conditions pour agir. Par exemple, les actions agricoles sont fortement contraintes par les conditions climatiques. Il n'est pas possible de labourer ou d'épandre lorsqu'il a plu. Ces informations proviennent des processus à l'œuvre dans l'environnement local de l'agent-place.

Définition 3. *Une situation est l'ensemble des affordances et des conditions d'action perçues par un acteur dans le temps et dans l'espace. L'ensemble de ces affordances et conditions initie et contraint la gamme d'actions possibles.*

6.2.2 L'affordance comme phénomène émergent

Nous avons postulé dans le chapitre 5, qu'une affordance est une possibilité d'action prenant la forme d'une propriété émergente du couple acteur/environnement. Celui-ci est représenté dans le modèle par la configuration des entités-environnementales situées au même moment sur la même place. En effet, les entités-environnementales possédant des capacités d'action et qui sont identifiées comme « actuateur » à un instant t représentent les acteurs tandis que les entités-environnementales qui les entourent représentent l'environnement dans le monde réel. Ainsi, selon les caractéristiques des affordances que nous avons présentées dans le chapitre 2, un objet de l'environnement possède un sens qu'il soit perçu ou non. Cette caractéristique est préservée dans le modèle et est représentée par les ensembles C_e et S_e des entités-environnementales. Ces ensembles ne représentent pas les possibilités d'action mais ce sont des propriétés qui caractérisent les entités-environnementales et qui permettent de détecter les affordances. Celles-ci sont détectées par un niveau supérieur à celui où les entités-environnementales évoluent et interagissent, c'est le niveau « agent », constitué par les agents-places (Figure 6.1). Ces derniers sont dotés d'un ensemble de méta-connaissances qui opèrent sur les ensembles C_e et S_e afin de détecter les affordances.

Définition 4. *Une affordance est une possibilité d'action représentée sous la forme d'une propriété émergente d'une configuration d'entités-environnementales (niveau micro) susceptible d'être détectée par les agents-places (niveau macro) par l'intermédiaire des méta-connaissances qu'ils détiennent.*

6.2.2.1 Détection des affordances

La phase de détection de propriétés émergentes, constitue l'étape où l'on (expert ou simulateur) extrait par observation certaines informations qui semblent intéressantes et

peuvent conduire à un phénomène émergent [David et Courdier, 2009]. Il s'agit dans notre cas d'observer les ensembles C_e (capacités d'action) et S_e (capacités à subir) de chaque entité-environnementale. Cette observation permet de construire un ensemble de faits K . Ainsi, dans le cas où l'ensemble K ou un sous-ensemble de K constitué de faits provenant des C_e et des S_e des entités perçues permet la détection d'une ou plusieurs affordances, cela conduit à la reconnaissance d'un actuateur pouvant éventuellement être constitué d'une conjonction de plusieurs entités-environnementales. En effet, la capacité d'agir d'une entité-environnementale constitue, à la fois, une propriété permettant la détection d'une affordance ainsi que la capacité nécessaire à l'exécution de l'action correspondant à cette affordance⁴. Par exemple, un agriculteur peut manifester un ensemble de capacités telles que conduire un tracteur. Un tracteur manifeste la capacité de tracter des machines agricoles. La capacité d'une charrue est de labourer un champ. Ces trois capacités d'action de ces trois entités-environnementales permettent de détecter la possibilité d'action de labourer ainsi que l'actuateur correspondant constitué par la conjonction agriculteur-tracteur-charrue. Cependant, ce type d'affordance ne peut causer le déclenchement d'une action que si par ailleurs, les autres conditions nécessaires à son exécution qui complètent la situation actuelle sont réunies (disponibilité des ressources, état de marche des matériels, conditions climatiques, existence de chemins, ...). Nous considérons que seules les affordances impliquant, à la fois, au moins une entité-environnementale qui joue le rôle de l'actuateur et au moins un objet-passif pour subir l'action, peuvent causer une action. Néanmoins, détecter une affordance liée seulement aux C_e et reconnaître un actuateur permet après réification de cette affordance d'enrichir le système avec cette nouvelle connaissance (nous argumentons les avantages de réifier les affordances dans la section 6.2.2.2). L'ensemble S_e représente les actions pouvant être subies par les entités-environnementales perçues. Cet ensemble conjointement avec l'ensemble C_e ainsi que les affordances liées à la conjonction d'un ensemble d'entités-environnementales permettent de détecter un ensemble d'affordances qui cette fois-ci sont susceptibles de mener au déclenchement d'une action. Par exemple, l'action de labour peut être réalisée par l'actuateur agriculteur-tracteur-charrue et subie par la parcelle.

$$R_\varphi = \{f : K \rightarrow \varphi\} \quad (6.1)$$

La détection des affordances se fait par un ensemble de fonctions appelées Révélateurs d'affordance R_φ . Celles-ci prennent comme argument l'ensemble des faits K perçus sur l'ensemble e_i des entités environnementales et retournent l'ensemble des affordances φ

4. Toute affordance ne sera pas forcément réalisée au travers de l'action correspondante. Une affordance est une possibilité d'action, son exécution est contrainte par un ensemble d'autres conditions de réalisation (cf. § 5.1.3).

ainsi que les acteurs et les objets passifs susceptibles de subir l'action correspondante à l'affordance détectée e .

Les révélateurs d'affordance caractérisent la connaissance nécessaire qu'un agent-place doit détenir pour détecter les affordances émergentes. Dans le travail actuel, les révélateurs d'affordances sont exprimés par des règles de production de type si/alors. Nous nous sommes en effet concentrés uniquement sur l'aspect conceptuel de l'idée, et non sur l'optimisation de son implémentation. Il existe cependant plusieurs langages pouvant être utilisés pour formaliser les méta-connaissances, tels que le langage de spécification Z [Woodcock et Davies, 1996]. Ce dernier a été utilisé dans plusieurs SMA pour spécifier formellement les architectures d'agents, tel que dMARS BDI [d'Inverno *et al.*, 1997] et SMART [d'Inverno et Luck, 2001]. Aussi, nous trouvons dans l'approche IODA [Kubera *et al.*, 2011] un modèle formel pour représenter les différentes interactions entre les entités du système appelé « matrice d'interaction ». Celle-ci peut être utilisée et adaptée pour exprimer les révélateurs d'affordances et les intégrer au niveau des agents-places. En effet, la matrice d'interaction permet de spécifier ce qu'une entité source peut initier et une entité cible peut subir comme interaction. L'intersection d'une ligne et d'une colonne indique l'interaction pouvant être initiée entre deux types d'entités. Comme une affordance est détectée par un agent-place lorsqu'une entité-environnementale portant une capacité d'action coïncide avec une entité-environnementale pouvant subir une action, la matrice d'interaction pourrait éventuellement être utilisée pour exprimer les révélateurs d'affordances. Cependant, il convient de préciser que la matrice d'interaction permet de représenter les interactions impliquant au plus deux entités, alors que dans notre cas, une affordance peut être détectée à partir de plusieurs entités-environnementales. D'autre part, un acteur de l'affordance détectée peut être une conjonction d'entités-environnementales, c'est-à-dire que l'ensemble des capacités d'actions de plusieurs entités-environnementales sont nécessaires à l'exécution de l'action. Par conséquent, la matrice d'interaction constitue une solution pour représenter que les révélateurs d'affordances qui permettent de détecter les affordances impliquant deux entités.

6.2.2.2 Réification des affordances

Dans le modèle proposé, toute action est spécifiée localement en fonction de la situation observée. Un agent-place ne possède donc pas de mémoire ni de mécanisme de raisonnement lui permettant d'inférer des actions en se basant sur son historique. Cependant, une affordance détectée constitue une nouvelle connaissance dans le modèle qui reste valide tant que les entités-environnementales qui ont mené à sa détection sont toujours perçues par l'agent-place. Étant donné que nous nous positionnons dans une

modélisation où l'environnement porte toutes les connaissances nécessaires à l'agent, une affordance détectée est matérialisée dans l'environnement par ce que nous appelons structure d'affordance. Cette dernière est un artefact qui peut être assimilé à un objet (au sens de la programmation orientée objet) qui simule une mémoire à court terme des affordances détectées. D'un point de vue conceptuel, la réification des affordances permet d'enrichir le système avec de nouvelles connaissances, ce qui peut mener à la détection d'autres affordances qui n'aurait pas pu être détectées dans le système à partir des entités-environnementales présentes initialement. D'un point de vue simulation, la réification d'affordance permet d'éviter aux agents un calcul supplémentaire. En effet, il se peut qu'une affordance reste valide pendant plusieurs pas de temps⁵ consécutifs. Il est alors plus intéressant de mémoriser cette affordance dans l'environnement que de la recalculer à chaque pas de temps.

Une structure d'affordance est supprimée de l'environnement lorsque les entités-environnementales qui ont mené à sa détection ne sont plus localisées sur la même place.

Une structure d'affordance F_φ se caractérise par :

- φ l'affordance ;
- $\{e\}$ les entités-environnementales impliquées dans l'affordance.

6.2.3 Représentation de l'action

L'action constitue le cœur de notre modèle, contrairement à la notion traditionnelle de l'action où celle-ci est réalisée en vue de satisfaire un but bien défini à l'avance permettant de justifier son exécution de l'action et de déterminer sa fin. Dans notre modèle, l'action est vue comme un processus dynamique émergeant de la situation observée par l'agent et qui contraint son exécution. La notion de but est prise en compte de façon implicite. En effet, nous considérons qu'une action se termine lorsqu'un ensemble de conditions observées dans l'environnement local de l'agent sont réunies. De ce fait, une action est caractérisée par une date de début, une date de fin ainsi qu'une durée. Celles-ci peuvent être spécifiées a priori en se basant sur des estimations basées sur l'expérience que les acteurs possèdent de leurs systèmes. Cependant, dans le cas le plus général, les limites temporelles de l'action ainsi que sa durée effective restent inconnues jusqu'à ce que les situations permettant son déclenchement, son exécution ou sa terminaison se produisent. Une action est aussi caractérisée par l'acteur qui la réalise. Dans le modèle, la situation est inversée, l'acteur est représentée par ce nous avons appelé « actuateur ». Une action

5. Nous avons opté dans ce travail pour l'approche à pas de temps constant, nous argumentons ce choix dans le chapitre 8.

est donc caractérisée par un actuateur qui représente l'acteur possédant la capacité de la réaliser. Cependant, elle est déclenchée par un agent-place qui est responsable du pilotage d'une place de l'environnement spatial. Ceci permet ainsi de connaître le lieu du déroulement de l'action ainsi que la situation dans laquelle elle a été déclenchée, exécutée, terminée ou annulée.

Définition 5. *une action est un processus dynamique, contraint par la **situation** de son occurrence, invoqué par un agent-place, réalisé par un **actuateur**, subi par une (ou des) entité(s)-environnementale(s), possédant **une date de début**, **une date de fin** ainsi qu'une **durée**, déroulant dans **une place** et possédant un **état**.*

Comme nous l'avons précisé dans les chapitres précédents, le modèle que nous proposons se base sur le formalisme de représentation de l'action présenté dans [Guerrin, 2009]. Ce formalisme traite principalement la dimension temporelle de l'action et donc sa représentation comme un processus dynamique (cf. § 5.1.3). Afin de prendre en compte, l'aspect spatial et la notion d'acteur, nous avons adapté la représentation de l'action de ce formalisme à notre modèle.

Limites temporelles d'une action. Les dates de début et de fin (t^-, t^+) d'une action sont des fonctions du temps et de l'espace, déterminées selon une condition $P_A^\pm$:

$$t_A^\pm(t, p, \{e\}) = \begin{cases} t & \text{si } P_A^\pm(t, p, \{e\}) \\ t_A^\pm(\max(0, (t - \tau_s, p, \{e\}))) & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.2)$$

où p est la place sur laquelle l'action est exécutée, t , le temps courant, $\{e\}$ est l'ensemble des entités-environnementales impliquées dans l'action A , et (τ_s) le pas de temps de simulation.

Lorsque la condition $P_A^\pm(t, p, \{e\})$ est vérifiée cela permet de déclencher l'action correspondante et de calculer sa date de début (ou de fin) ; dans le cas contraire la valeur $t_A^\pm$ reste identique à sa valeur au pas de temps précédent τ_s (cf. eq. 6.3 dont cette équation 6.2 est dérivée).

État dynamique d'une action. Une action A est représentée par une fonction binaire du temps et de l'espace soumise soumis à un ensemble de conditions $C_A(t, p, \{e\})$:

$$S_A(t, p, \{e\}) = \begin{cases} 1 & \text{si } C_A(t, p, \{e\}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.3)$$

$C_A(t, p, \{e\})$, est une proposition logique, aussi fonction du temps et de l'espace, contrôlant l'exécution de l'action. Lorsque cette proposition est évaluée à vrai, cela représente que la situation courante permet la poursuite de l'action. Dans le cas contraire deux cas sont possibles :

- La situation courante représentée par C_A ne permet plus la poursuite de l'action tandis que les conditions P_A^+ sont réunies, ceci indique la fin de l'action auquel cas la date de fin doit être calculée ;

$$(C_A = 0) \wedge (P_A^+ = 1) \Rightarrow (S_A = 0) \wedge (t_A^+ = t) \quad (t_A^+ > t_A^-) \quad (6.4)$$

- La situation courante ne permet plus la poursuite de l'action et les conditions P_A^+ ne sont pas réunies, la date de fin de l'action sera donc identique à celle du pas de temps précédent. Par conséquent un agent-place reconnait les actions interrompues lorsque $(t_A^+ < t_A^-)$, C_A ainsi que P_A^+ sont évalués à faux.

$$(C_A = 0) \wedge (P_A^+ = 0) \Rightarrow (S_A = 0) \wedge (t_A^+ = t_A^-(\max(0, t - \tau_s))) \quad (t_A^+ < t_A^-) \quad (6.5)$$

Par ailleurs, de la même manière que les affordances sont réifiées dans l'environnement, les actions font aussi l'objet d'une matérialisation par des artefacts que nous appelons structure d'action déposées dans l'environnement par les agents-places. Ceci est nécessaire d'une part, pour que les actions interrompues puissent être reprises lorsque les conditions C_A sont à nouveau réunies. D'autre part, un agent est amené à coordonner ses propres actions, par conséquent, il doit garder la trace des actions en cours ou interrompues (nous reviendrons sur ce point § 6.3.3).

6.3 Architecture d'agents

Un agent-place est responsable du pilotage des actions sur la place qu'il gère. Ces actions sont induites par les affordances émergeant des entités-environnementales et des conditions observées sur sa place. Ainsi, la détection et la réification des affordances, la sélection et la mise à jour de l'état des actions et leur coordination constituent la tâche des agents-places. Le comportement de ces derniers est régi par un processus générique présenté dans la figure 6.3.

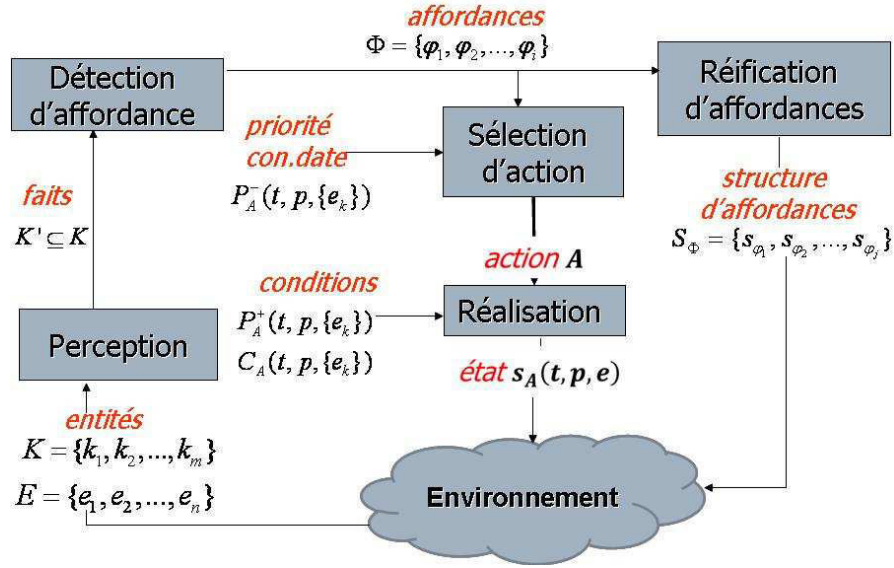


FIGURE 6.3 : Diagramme d'activités du comportement d'un agent.

6.3.1 Perception

Lorsqu'un agent-place perçoit une entité-environnementale cela implique deux cas de figures :

- l'entité-environnementale e perçue se trouve sur la place gérée par l'agent-place g ;
- l'entité-environnementale e se trouve sur une place d'un agent voisin g' .

Dans le premier cas, cela peut permettre à l'agent-place de déclencher une action si ses conditions d'exécution sont réunies au sein de l'actuateur comportant la capacité correspondante ainsi que les processus résultant de cette action au niveau des entités-environnementales. En effet, un agent-place n'a le droit de déclencher une action chez un actuateur que s'il est localisé sur sa place. De ce fait, toute entité environnementale n'est actionnable que par un seul agent à la fois (même si elle peut être observée par plusieurs), ce qui évite par conséquent les conflits d'accès aux entités-environnementales entre les agents-places.

Dans le cas où un agent-place perçoit une entité-environnementale localisée sur une place voisine portant des faits qui l'intéressent pour exécuter une action, ceci peut entraîner le déclenchement des mécanismes de coordination que nous présenterons dans la section 1.3.6. Par conséquent, nous définissons deux fonctions de perception : Per_e et Obs_e . La première retourne vrai si une entité-environnementale e se trouve sur la place d'un agent g (sinon faux). La deuxième retourne vrai si une entité-environnementale e est perçue dans le voisinage de g .

Per_e et Obs_e permettent de recenser les entités perçues par un agent-place en se basant sur leurs coordonnées afin de lui permettre d'identifier le comportement qu'il doit adopter

(déclencher une action où exécuter un mécanisme de coordination). Cependant, comme nous l'avons avancé dans le chapitre 5 précisant notre positionnement, un agent-place ne peut détecter que les affordances correspondant aux actions qui peuvent être exécutées sur sa place. Par exemple, un agent-place qui gère une place de type parcelle agricole ne peut pas percevoir la capacité d'action de vider le stock d'effluent car celle-ci n'est pas une action possible dans son environnement spatial. Pour cela, les méta-connaissances utilisées par les agents-places sont définies en fonction de ce qu'ils peuvent exécuter sur leurs places. Par conséquent, les faits perçus par un agent ne sont que ceux qui pourront éventuellement lui servir à détecter des affordances. Nous faisons donc le choix dans ce travail de la perception « directe » des agents-places, qui n'est pas régie par un mécanisme cognitif permettant de déduire le sens de ce qui est perçu. De plus, la perception des agents-places est également « active », au sens où elle est orientée vers la détection des affordances et, par conséquent, vers l'action.

Les faits perçus par un agent-place peuvent correspondre aux ensembles S_e et C_e comme ils peuvent correspondre aux informations portées par les marques (cf. section 6.4) ou l'état des entités-environnementales. Étant donné que la perception dans notre cas est orientée vers les affordances, nous considérons ainsi une phase de filtrage qu'un agent doit effectuer portant sur les ensembles S_e et C_e . Une solution possible serait de doter les agents d'un ensemble de faits $\{k'\}$, pour filtrer les faits qui l'intéressent, il effectue ainsi un « mapping » entre son ensemble $\{k'\}$ et l'ensemble $\{k_t\}$ perçu.

Enfin, nous considérons une fonction $Filtre_K$ permettant de spécifier pour chaque agent les faits au niveau des entités-environnementales qu'il peut percevoir.

6.3.2 Détection et réification des affordances

Contrairement aux travaux de [Papasimeon, 2009] où l'identification des affordances est contrainte aussi par l'état de l'environnement, dans ce travail, une affordance est détectée en se basant seulement sur ce que les entités-environnementales peuvent faire ou subir indépendamment de leur état et les conditions environnementales. Par conséquent, nous différencions les affordances (possibilités d'actions) et les actions (effectivement exécutables). Par exemple, l'affordance vider le stock d'effluent est détectée lorsqu'une entité-environnementale possédant la capacité de vider le stock et une entité-environnementale pouvant subir cette action sont localisées sur la même place, ceci même si l'état du stock est vide et ne permet pas le déclenchement de l'action de vidange. La détection des affordances se fait ainsi en utilisant les révélateurs d'affordance (cf. § 6.2.2.1) qui opèrent sur les faits filtrés. Une fois les affordances détectées, elles

seront réifiées dans l'environnement par une structure d'affordance déposée sur la place de l'agent.

6.3.3 Sélection d'une action

Une fois la liste des affordances construite, il s'agit de déterminer les actions qui sont déclenchables. Ceci en se basant sur les pré-conditions P_A^- nécessaires au déclenchement des actions. Il en résulte que plusieurs actions sont susceptibles d'être déclenchées dans une même situation observée par l'agent-place. Cependant, des dépendances peuvent exister entre ces actions (cf. Chapitre 4, section 4.1) qui peuvent éventuellement empêcher le déclenchement de certaines d'entre elles si elles font parties de leurs conditions d'exécution. Pour cela, il est nécessaire, une fois les actions potentiellement déclenchables déterminées, d'identifier les dépendances qui existent entre elles en prenant en compte aussi les actions déjà en cours d'exécution (c'est-à-dire dont la fonction d'état est à 1) afin qu'un agent puisse coordonner toutes ses actions. Il s'agit donc de décider quelles sont les actions qui seront exécutées, si nécessaire en se basant sur leurs priorités respectives. Pour caractériser les relations de dépendance entre actions, nous nous basons sur les relations définies dans la logique temporelle d'Allen [Allen, 1981]. Le processus de sélection se fait ainsi en deux étapes : (i) identifier les actions déclenchables (ii) coordonner⁶ les actions.

Identification d'actions déclenchables. Les pré-conditions de déclenchement de l'action (qui sont différentes de ses conditions de réalisation) peuvent relever du niveau stratégique. Ce sont par exemple les conditions définies par les agriculteurs sur la base de leurs expériences et de leurs préférences de gestion. Elles peuvent aussi être des conditions imposées par la nature des entités environnementales parties prenantes des situations rencontrées par les agents, par exemple des contraintes temporelles sur chaque culture, celles-ci ne pouvant être cultivées qu'à certaines périodes de l'année. Elles peuvent encore relever de l'état de l'entité-environnementale présente sur la place constituant une parcelle cultivée. Par exemple, la récolte ne peut être réalisée que lorsque la culture a atteint un certain stade de maturité. Les pré-conditions permettent de déterminer l'ensemble des possibilités d'actions lorsque les conditions rencontrées (état des entités-environnementales concernées, stratégies de gestion des agriculteurs, ...) sont favorables à leur déclenchement. Cette façon de faire est par conséquent de nature à réduire au total le nombre des possibilités d'action.

6. Nous traitons dans cette section la coordination entre les actions d'un seul agent. La coordination de l'ensemble des agents du système sera présenté dans la section 6.4.

Coordination des actions dans le cas d'un agent unique.

Identification des dépendances. comme nous l'avons présenté dans l'introduction de cette section, un agent peut être amené à effectuer un choix parmi les actions potentiellement déclenchables. Afin d'effectuer un choix cohérent, il doit alors identifier les dépendances entre les actions candidates. Étant donné qu'une action est caractérisée par des dates de début et de fin, une durée ainsi qu'un ensemble d'entités-environnementales, ces informations peuvent être utilisées pour identifier les relations d'Allen permettant de spécifier ces dépendances. Allen [Allen, 1981] a en effet défini un ensemble de relations permettant de spécifier tous les positionnements relatifs entre deux intervalles temporels. Ces relations sont présentées dans la figure 6.4.

Relation	Illustration	Symbôle
Précède (précédé par)		$A1 < A2$ ($A1 > A2$)
Chevauche (chevauché par)		$A1 o A2$ ($A1 oi A2$)
Rencontre (rencontré par)		$A1 m A2$ ($A1 mi A2$)
Pendant (contient)		$A1 d A2$ ($A1 di A2$)
Début (débuté par)		$A1 s A2$ ($A1 si A2$)
Termine (terminé par)		$A1 f A2$ ($A1 fi A2$)
Egal		$A1 = A2$

FIGURE 6.4 : Les relations d'Allen entre deux intervalles temporels.

Ainsi, la date de début d'une action peut être sa date réelle dans le cas des actions déjà en cours, comme elle peut être une date temporaire calculée aussi en utilisant la fonction 6.2, pour les actions qui sont déclenchables et dont l'état est encore à 0. A partir des dates de début de ces actions et les durées estimées, un agent peut déterminer les relations suivantes entre deux actions $A1$ et $A2$:

$$t_{A1}^+ = t_{A2}^- = t \Rightarrow A1 m A2 \quad (6.6)$$

Ce cas de figure, exprime la relation où l'action $A1$ prend fin dans le pas de temps présent et l'action $A2$ peut être déclenchée à ce pas de temps.

$$(t_{A_1}^- < t_{A_2}^-) \wedge (t_{A_1}^- + \tau_{A_1} = t_{A_2}^+) \Rightarrow A_1 fi A_2 \quad (6.7)$$

Ce cas exprime la relation où l'action A_1 a été déclenchée dans un pas de temps antérieur, tandis que A_2 peut être déclenchée au pas de temps présent. Aussi, la date de fin estimée de A_1 coïncide avec la date de fin estimée de A_2 .

$$(t_{A_1}^- = t_{A_2}^- = t) \wedge (t_{A_1}^- + \tau_{A_1} = t_{A_2}^- + \tau_{A_2}) \Rightarrow \text{Egal}(A_1, A_2) \quad (6.8)$$

Ce cas désigne la relation où A_1 et A_2 peuvent être déclenchées au même pas de temps et leurs terminaisons respectives sont estimées au même pas de temps (futur).

$$(t_{A_1}^- = t_{A_2}^- = t) \wedge (t_{A_1}^- + \tau_{A_1} < t_{A_2}^- + \tau_{A_2}) \Rightarrow \text{Debut}(A_1, A_2) \quad (6.9)$$

Ce cas exprime la relation où A_1 et A_2 ont été déclenchées au même pas de temps (antérieur) tandis que l'action A_1 est prévue pour se terminer avant l'action A_2 .

$$(t_{A_1}^- < t_{A_2}^-) \wedge (t_{A_1}^- + \tau_{A_1} < t_{A_2}^- + \tau_{A_2}) \Rightarrow A_1 o A_2 \quad (6.10)$$

Enfin, cette relation est vérifiée dans le cas où A_1 a été déclenchée dans un pas de temps antérieur (avant l'action A_2 dont le déclenchement est prévu pour le pas de temps présent) et sa date de fin est estimée avant la date de fin de A_2 .

Il est à noter que dans le cas où l'action A_1 est en cours et la durée estimée est inférieure à sa durée à l'instant t , une mise à jour de sa durée estimée est nécessaire. Ceci en lui attribuant une nouvelle durée estimée qui doit être supérieure à sa durée à l'instant t .

A partir de ces relations, un agent-place en se basant sur des connaissances qu'il doit détenir a priori sur les relations qui sont autorisées entre deux actions pour qu'elles puissent être déclenchées, spécifie, la liste des actions qui seront réalisées.

Priorité. Le dernier filtrage de l'ensemble des actions possibles se fait en utilisant la notion de priorité. Les priorités peuvent être attribuées a priori, auquel cas elles sont fixes et ne changeront pas pendant la simulation du modèle. Ou bien, elles peuvent être attribuées de façon dynamique en fonction de certains paramètres. Par exemple, certaines actions dans les systèmes agricoles ont des contraintes temporelles qui font qu'elles ne peuvent pas être réalisées en dehors de leurs dates de réalisation au plus tôt et au plus tard. Ces actions deviennent urgentes lorsque leurs dates de fin au plus tard se rapprochent car les retarder risque de mener à l'annulation définitive de leur réalisation.

Se baser sur ce paramètre de proximité de la fin au plus tard permet de réévaluer la priorité d'une action en se basant sur l'évolution même de la situation. Dans le modèle, nous considérons ces deux types de priorités. En effet, certaines actions dans les systèmes agricoles sont considérées comme prioritaires et leurs priorités ne changent pas au fil du temps, quelle que soit l'évolution de la situation. Par exemple, si on considère un système agricole comportant une unité d'élevage, certaines actions liées au bétail sont en général toujours prioritaires telle que la distribution de nourriture.

Ainsi, la priorité d'une action est définie à l'aide d'une fonction $Priorite_A$, permettant de retourner un entier. La fin de la phase de sélection de l'action à exécuter est marquée par le calcul de la date de début de cette action, en utilisant l'équation 6.2.

6.3.4 Réalisation de l'action

Une fois l'action sélectionnée et sa date de début calculée, l'action sera déclenchée au niveau de l'actuateur concerné. Concrètement le déclenchement d'une action consiste ainsi à mettre son état à 1 ainsi qu'à déclencher les processus implémentés au niveau des entité-environnementale impliquées dans ou affectés par cette action et qui représentent les effets de l'action dans l'environnement. Ainsi, lorsqu'une action est exécutée son cours va influencer l'évolution de l'environnement, et cette évolution va entraîner l'évolution de la situation courante qui à son tour influencera l'action elle-même. Pour cela, l'agent-place peut être amené à interrompre, annuler ou mettre fin à son action. Cette phase consiste donc à vérifier à chaque début de cycle de simulation si les conditions de réalisation de chaque action $C_A(t, p, \{e\})$ sont toujours vérifiées. Dans le cas où elles ne sont plus valides, deux cas de figure se présentent :

- l'agent-place interrompt son action et déclenche un comportement de coordination intra-agent ;
- l'agent-place observe que les conditions de terminaison d'action $P_A^+(t, p, \{e\})$ sont valides auquel cas il calcule sa date de fin en utilisant l'Eq. 6.2 et met fin à cette action. Concrètement, la fin d'une action signifie que son état est mis à 0.

Jusque-là nous nous sommes concentrés sur le comportement d'un agent en interaction avec son environnement. Un agent-place étant plongé dans un environnement peuplé aussi par d'autres agents-places, il est amené à interagir et à se coordonner avec eux.

6.4 Coordination d'actions

Un système multi-agents se caractérise par la capacité des agents à interagir et à se coordonner afin d'accomplir leurs actions. Il existe une dépendance entre les actions des agents qu'il est nécessaire de gérer. La gestion de cette dépendance se fait par la mise en place de mécanismes de coordination. Ainsi, la coordination dans notre modèle est basée sur le concept de stigmergie et est inspirée des modèles de phéromones digitales présentés dans le chapitre 3 section 4.2.2.1. Chaque agent communique ainsi de façon indirecte avec les autres agents du système en utilisant ce que nous appelons des *marques*. Ces dernières, sont des artefacts virtuels qui portent les informations nécessaires à la coordination des agents et sont susceptibles de se propager dans l'environnement pour véhiculer ces informations entre les agent-places. Nous distinguons deux types de marques : les *drapeaux* et les *traces* [Afoutni *et al.*, 2012].

- les drapeaux représentent les marques utilisées entre des agents-places voisins pour demander l'accès à une entité-environnementale.
- les traces sont employées entre des agents-places éloignés pour véhiculer des informations.

Les marques perçues par un agent-place constituent des éléments de sa situation. En effet, l'un des intérêts d'un mécanisme de coordination basé sur le concept de stigmergie est qu'il permet aux agents de percevoir l'évolution globale du système et de l'influencer à partir de leur localisation. L'interaction entre les agents est caractérisée par un découplage des agents impliqués dans le temps et dans l'espace. Les agents n'ont pas besoin de connaître explicitement tous les autres agents ni d'être localisés au même endroit en même temps. Ceci permet de construire des agents situés relativement simples, agissant localement, tout en adaptant leur comportement à l'évolution de l'environnement.

Définition 6. Une marque est un artefact déposé par un agent-place dans l'espace, portant des informations nécessaires à la coordination des actions.

6.4.1 Drapeaux

Les fonctions Obs_e et $Filtre_k$ permettent à un agent-place de percevoir les entités-environnementales, les structures d'affordance et d'action localisées sur les places voisines. Les entités-environnementales localisées sur les places voisines seront intégrées dans le processus de détection d'affordance de chaque agent-place. Les structures d'affordance et d'action seront directement intégrées dans leur processus de sélection d'actions. Cependant, un agent-place n'a pas le droit d'agir sur une entité-environnementale ne se trouvant pas sur sa place, il doit alors déposer un drapeau sur celle-ci spécifiant

l'entité-environnementale demandée ainsi que la priorité d'action pour laquelle cette entité est demandée. L'intérêt de communiquer la priorité de l'action aux agents voisins, consiste à leur permettre d'intégrer cette information dans leurs processus locaux de sélection d'action. Par exemple, supposons qu'un agent-place est en train de labourer sa parcelle en utilisant l'actuateur « agriculteur-tracteur-charrue ». Un agent-place voisin est intéressé par l'actuateur « agriculteur » pour réaliser l'action de vidange de stock d'effluents. Dans ce cas, celui-ci manifeste son intérêt en déposant un drapeau sur sa propre place en indiquant l'identifiant de l'actuateur et la priorité de l'action de vidange. Lorsqu'un agent perçoit un ou plusieurs drapeaux dans son voisinage, la décision de répondre positivement ou d'ignorer ces drapeaux lui revient. Par exemple, il est possible qu'il interrompe son action en cours s'il juge que celle de son voisin est plus prioritaire que la sienne. Les drapeaux, contrairement aux phéromones des fourmis (ainsi qu'aux traces cf. ci-après), ne se propagent pas dans l'environnement et ne sont pas dotés d'un mécanisme d'évaporation. Leur disparition se fait de façon instantanée selon trois cas possibles :

- quand l'agent obtient l'entité-environnementale demandée ;
- quand l'entité-environnementale n'est plus perçue par l'agent demandeur ;
- lorsque l'agent n'est plus intéressé par l'entité-environnementale qu'il demandait.

Un drapeau d est caractérisé ainsi par :

- id_g l'identifiant de l'agent g demandeur d'une entité-environnementale ;
- id_e l'identifiant de l'entité-environnementale demandée ;
- p_a la priorité de l'action pour laquelle l'entité-environnementale est demandée.

6.4.2 Traces

Contrairement aux drapeaux les traces sont des marques qui se propagent dans l'environnement afin de véhiculer des informations sur l'action et les entités-environnementales. Comme dans la stigmergie classique chez les fourmis basée sur le dépôt de phéromones, les traces possèdent une dynamique représentée par deux processus : dépôt/propagation et dissipation par évaporation.

Dépôt/propagation de trace. Le dépôt d'une trace est déclenché par un stimulus. Nous définissons trois stimuli pouvant motiver un agent à déposer une trace : interruption ou invocation d'une action et perception d'une trace.

Interruption d'une action

Un agent-place peut être amené à interrompre son action en cours d'exécution lorsque les conditions $C_A(t)$ ne sont plus valides. Par exemple, un agent-place manque d'engrais pendant l'épandage. Dans ce cas, l'agent-place essaiera d'obtenir cette ressource manquante. Ainsi, étant donné que les agents-places sont fixes et que seuls les acteurs ont la capacité de se déplacer dans l'espace, un agent-place aura donc besoin d'envoyer un acteur (s'il le possède sur sa place) à l'agent-place qui détient la ressource nécessaire afin de se la faire apporter. Nous considérons que ni les agents ni les acteurs ne possèdent une carte de l'environnement spatial. Lorsqu'il s'agit de faire véhiculer un acteur entre deux ou plusieurs places le chemin est inconnu. Dans ce cas, l'agent-place doit trouver lui-même un chemin pour déplacer son acteur. Pour cela il utilise une trace de type recherche ainsi que l'algorithme permettant de calculer ce chemin défini dans la section 6.4.3.

Invocation d'une action

Un agent-place peut être amené à déposer une trace pour demander un acteur afin d'exécuter une action provoquée par un événement survenant sur sa place. Par exemple, si le stock d'effluents d'élevage déborde, ceci peut inciter l'agent qui contrôle la place sur laquelle est localisé ce stock à déposer une trace. Cependant, tout événement ne conduit pas nécessairement à un dépôt de trace. Ce cas est réservé aux situations où l'action invoquée est de priorité élevée. Lorsque ce cas se produit, la trace déposée sera propagée dans l'environnement pour attirer l'acteur qui possède la capacité d'action recherchée. La trace porte plusieurs informations telles que son poids. Le poids d'une trace est spécifié en fonction de l'évolution de l'événement déclencheur de son dépôt. Par conséquent, la valeur de cet attribut peut changer au fil du temps. Par exemple, si un agent-place perçoit une maladie dans un ensemble d'arbres localisés sur sa place, ceci l'incite à déposer une trace avec un certain poids afin d'attirer l'acteur *agriculteur*. Le poids définit en quelque sorte la portée de la trace. C'est-à-dire le nombre de places sur lesquelles la trace sera propagée. Quand le nombre d'arbres affectés par la maladie augmente, l'agent-place met à jour le poids de sa trace, ce qui permet d'augmenter la portée de la trace. Après la propagation de la trace, l'agent-place distant qui détient l'acteur possédant la capacité d'action « traiter les arbres » peut interrompre son action (si la priorité de l'action pour laquelle la trace a été déposée est plus élevée) pour envoyer l'acteur vers l'agent-place à l'origine de la trace.

Une trace m est définie comme suit :

- id_m : l'identifiant de la trace ;
- $type_m$: une trace peut être de type *recherche* ou *action* selon le stimulus déclencheur de son dépôt (voir ci-dessous). Ceci, permet d'informer les agents sur la façon dont elle doit être propagée ;

- $sens_m$: si le type de la trace est *recherche* alors sa propagation se fait en deux sens successifs : descendant et ascendant. Dans le sens descendant les traces se propagent de l'agent-place à l'origine de la trace vers les autres agents. Dans le sens ascendant les traces se propagent de l'agent-place qui détient la ressource demandée vers l'agent-place à l'origine de la trace ;
- id_e : l'identifiant de l'actuateur demandé ;
- $priorite_a$: priorité⁷ de l'action pour laquelle la trace a été déposée ;
- $poids_m$: représente l'intensité de la trace, cette information est utilisée différemment selon le type de la trace et par conséquent le processus de propagation ;
- $duree_m$: durée maximale de la persistance d'une trace dans l'environnement.

6.4.3 Algorithmes de propagation de trace

La propagation d'une trace dans l'environnement se fait de proche en proche par l'intermédiaire d'une chaîne de perception impliquant les agents-places. Le comportement d'un agent-place qui perçoit une trace diffère en fonction de son type (recherche ou action). Comme ce travail ne porte pas directement sur les algorithmes de propagation de traces, nous considérons que ces derniers sont détachés du modèle conceptuel que nous proposons. Par conséquent, il est possible de doter les agent-places de différents algorithmes de propagation de trace. Cependant, nous proposons par défaut deux algorithmes pour les deux types de traces définies précédemment.

Propagation de trace de type recherche. Pour la propagation d'une trace de type recherche, nous nous sommes inspiré des travaux de [Valckenaers *et al.*, 2004]. Cependant, contrairement à ces travaux, nous n'avons pas d'agents fournis se déplaçant aléatoirement dans l'environnement pour explorer l'espace. Du fait que l'environnement dans ce modèle est agentifié, car tout l'espace est couvert par des agents-places, nous utilisons ces agents pour propager les traces par l'intermédiaire de leur perception. Cette propagation se fait en deux phases : *sens descendant* et *sens ascendant*. De façon générale, la première phase sert à explorer l'environnement et. Tandis que la deuxième sert à le structurer.

Sens descendant : l'agent-place à l'origine de la trace souhaite trouver une ressource. Dans ce cas, il dépose une trace de type recherche sur sa place, puis chaque agent-place qui perçoit une trace dans son voisinage dépose à son tour sur sa place une

7. La priorité permet à un agent d'évaluer l'importance des actions des autres agents par rapport à ses propres actions. Ceci implique une échelle commune pour toutes les actions simulées. Ceci, est nécessaire pour qu'un agent puisse agir de façon à ce que le système produise une simulation cohérente et assez réaliste. En effet, sans cette échelle commune, un agent risque de mobiliser à son niveau une ressource pendant un temps important, ce qui peut introduire des biais dans la simulation.

trace avec les mêmes valeurs d'attributs en mettant à jour le poids de la trace. Le calcul du poids de la trace dépend de la structure de l'espace, selon qu'il est régulier ou irrégulier. Dans le cas d'un espace composé de places de mêmes tailles (régulier), il suffit de sélectionner le poids minimum des traces perçues et de l'incrémenter de 1. Dans le cas d'un espace composé de places de tailles différentes (irrégulier), le poids doit être calculé en fonction de la taille de la place. Ceci afin de pouvoir construire un chemin dont la longueur est en cohérence avec la taille des places par lesquelles il passe. A la fin de cette étape de propagation, toutes les places seront marquées par des traces pondérées. Par conséquent, un ensemble de chemins possibles de longueurs différentes se construisent entre la place à l'origine de la trace et la place recherchée (figure 6.5).

Sens ascendant : lorsqu'un agent-place perçoit une trace dont le label concerne la ressource qu'il détient, il dépose une trace modifiant son sens de propagation à « ascendant » et choisit parmi les places voisines qui portent des traces de ce type une place de poids minimum et ajuste son poids par rapport au sien. Cette dernière mettra ensuite à son tour jour le sens de sa trace à « ascendant » et le même processus est répété jusqu'à ce que le chemin final qui relie les deux agents place soit tracé en suivant le gradient des poids minimaux (figure 6.5).

Sens ascendant : lorsqu'un agent-place perçoit une trace dont le label concerne la ressource qu'il détient, il dépose une trace modifiant son sens de propagation à « ascendant » et choisit parmi les places voisines qui portent des traces de ce type une place de poids minimum et ajuste son poids par rapport au sien. Cette dernière mettra ensuite à son tour jour le sens de sa trace à « ascendant » et le même processus est répété jusqu'à ce que le chemin final qui relie les deux agents place soit tracé en suivant le gradient des poids minimaux (figure 6.6).

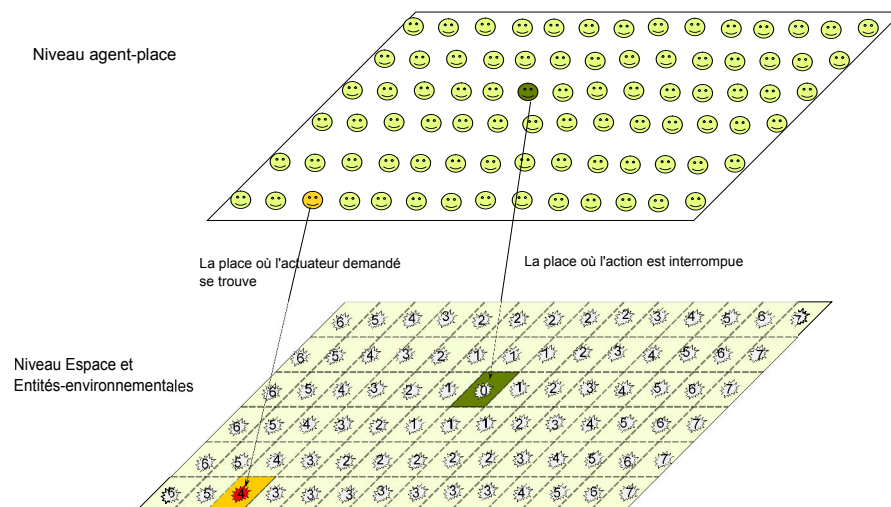


FIGURE 6.5 : Résultat de l'algorithme de propagation de trace recherche sens descendant.

algorithme 1 Propagation trace recherche

Pour tout agent $a \in A$
 faire
 $trace \leftarrow percevoir_voisinage()$;
 Si $trace \neq \emptyset$ alors
 $deposer_trace()$;
 Fin

algorithme 2 déposer trace()

tant que $trace \neq \emptyset$ **faire**
 si $trace \neq ascendant$ && action interrompue **alors**
 $m.id_m \leftarrow id$;
 $m.type_m \leftarrow recherche$;
 $m.sens_m \leftarrow descendant$;
 $m.id_f \leftarrow identifiant_entite_environnementale_demande$;
 $priorite_a \leftarrow priorite$;
 $poids_m \leftarrow 0$;
 $duree_m \leftarrow duree$;
sinon
 si $trace.sens == "ascendant"$ && $id_v == id$ **alors**
 mettre à jour le sens de la trace à ascendant ;
sinon
 si $trace.sens == "descendant"$ && $trace.id_m \neq id_m$ **alors**
 déposer trace avec les mêmes valeurs de la trace perçu ;
 $m.poids_m = \min(trace.poids_m) + 1$;
fin si
fin si
fin si
fin tant que

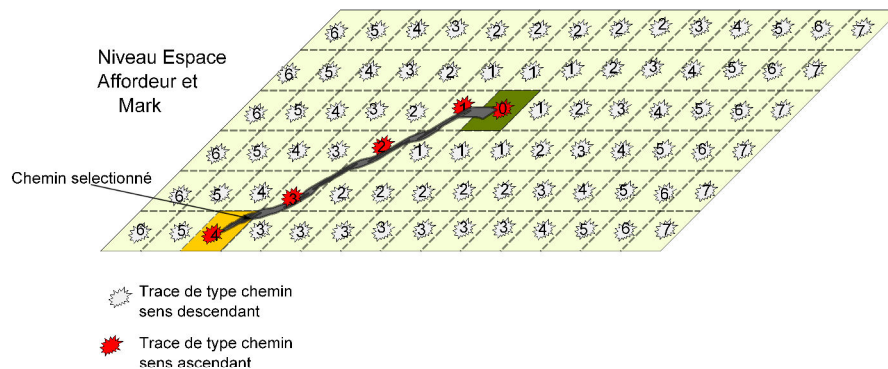


FIGURE 6.6 : Résultat de l'algorithme de propagation de trace de type recherche en sens descendant (les traces indiquées au niveau des places comportent des numéros représentant leur poids).

Cet algorithme permet de calculer un chemin en explorant l'environnement en largeur d'abord. Il en résulte que tout l'espace sera couvert par des traces, dont certaines ne sont pas nécessaires. Ceci peut être acceptable dans le cas où le système simulé contient un nombre acceptable d'agents, dans le cas contraire, ceci peut conduire à des temps de calcul longs. Cependant, du moment que cette thèse ne porte pas sur les algorithmes de recherche de chemins, nous proposons cet algorithme par défaut et nous considérons qu'un autre développeur informaticien pourrait implémenter d'autres algorithmes plus optimisés.

Propagation de trace de type action. La propagation dans ce cas se fait dans un rayon autour de l'agent-place qui invoque une action à réaliser sur sa place alors qu'il ne possède pas d'actuateur pour la réaliser. Il s'agit de propager de proche en proche une fraction du poids (qui représente en quelque sorte l'intensité de la trace) présente dans une place. Le rayon de trace qui se construit autour de la place à l'origine de la trace, permet de rendre les conséquences d'un événement qui se produit sur cette place visible par des agents distants (comme un feu visible à distance). Ainsi, chaque agent-place qui perçoit une trace dépose la même trace avec un poids décroissant selon une loi dépendant du phénomène qui est en train de se produire dans la place. Plus un agent-place est loin de l'origine de la trace, moins la trace qu'il perçoit est intense. Quand le poids de la trace devient nul ou si la trace atteint un agent place possédant l'actuateur recherché, alors la propagation de la trace s'arrête.

algorithme 3 déposer trace action()

```

si invocation action alors
   $m.id_m \leftarrow id$ ;
   $m.type_m \leftarrow action$ ;
   $m.sens_m \leftarrow null$ ;
   $m.id_f \leftarrow identifiant\ entite\ environnementale\ demande$ ;
   $priorite_a \leftarrow priorite$ ;
   $poids_m \leftarrow q$ ;
   $duree_m \leftarrow duree$ ;
sinon
  si  $trace \neq \emptyset$  alors
     $poids_m \leftarrow L(q)$ ;
     $deposer\ une\ trace\ identique\ a\ celle\ percue$ ;
  fin si
fin si

```

6.4.4 Dissipation d'une trace

La validité de l'information propagée par une trace change au fil du temps. Par conséquent, il est nécessaire de dissiper les traces quand l'information qu'elles portent

n'est plus valide. Il existe deux cas possibles pour dissiper une trace : instantanément ou progressivement.

- Instantanément : quand l'action interrompue est reprise, l'agent-place supprime la trace correspondante. Ceci incite les agents-places portant la même trace à les supprimer jusqu'à dissipation complète.
- Progressivement : ce cas de dissipation concerne les traces de type « recherche ». Chaque agent qui porte une trace de ce type décrémente à chaque pas de temps sa durée de vie. De cette façon les traces de type recherche qui restent dans le sens de propagation « descendant », c'est-à-dire qui ne font pas partie du chemin final, seront supprimées après un certain nombre de pas de temps.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté un modèle de représentation de l'action humaine au niveau opérationnel. L'action est vue comme un processus dynamique situé dans le temps et l'espace. La représentation de l'action au niveau individuel a été inspiré à la fois du concept d'affordance [Gibson, 1986] et une partie de la méthodologie de réification des phénomènes émergents présenté dans [David, 2010] ainsi que du formalisme de représentation de l'action présenté dans [Guerrin, 2009].

Le concept d'affordance a été utilisé afin d'ancrer les opportunités d'actions dans l'environnement. L'affordance est vue comme une possibilité d'action pouvant émerger à partir d'un ensemble de connaissances portées par les entités-environnementales représentant les actions pouvant être subies et exécutées par ces entités-environnementales. Ces dernières font l'objet d'un ensemble de révélateurs d'affordance manipulées par un ensemble d'agents abstraits afin de détecter les affordances présentes dans le temps et dans l'espace. Le formalisme de représentation de l'action de [Guerrin, 2009], a été adapté pour pouvoir représenter la dynamique de l'action dans l'espace et incorporer la notion d'agent. Ainsi, chaque action est spécifiée localement, selon sa situation immédiate sans faire appel à un plan prédéfini, conformément à la théorie de l'action située que nous avons choisie comme base de ce travail. Les conditions de déclenchement, de fin et d'exécution d'une action permettent ainsi la représentation de systèmes d'action complexes.

Afin de rester dans une représentation située de l'action, on s'est inspiré du concept de stigmergie pour la coordination des actions. L'utilisation de la notion de marque ainsi que les algorithmes de propagation de ces marques permettent aux agents de communiquer et de se coordonner implicitement, en se basant sur leur situation immédiate sans faire appel à des processus cognitifs complexes.

Ainsi, la mise en œuvre du modèle proposé pour un système donné passe par plusieurs phases :

- Spécification des entités-environnementales qui représentent à la fois les acteurs et les autres entités du système réel modélisé ;
- spécification du choix de représentation de l'espace ainsi que son échelle ;
- spécification de l'ensemble des fonctions de révélateurs d'affordances ;
- spécification des pré-conditions et des conditions de réalisation des actions ;
- spécification de l'ensemble des fonctions de perception ;
- spécification de l'ensemble des algorithmes de propagation de traces.

Nous avons énuméré ci-dessus de façon intuitive les étapes de mise en œuvre de notre modèle. Cependant, la construction d'un modèle basé sur nos concepts nécessiterait une méthodologie de conception pour guider les utilisateurs à l'instar de IODA [Kubera, 2010] où l'auteur propose une méthodologie de conception graduelle qui commence par spécifier les aspects macroscopiques (les interactions des entités) puis les aspects microscopiques (les actions que les entités réalisent).

Chapitre 7

Implémentation

Nous avons présenté dans le chapitre 6 un modèle conceptuel de représentation de l'action humaine. Ce modèle a fait l'objet d'une implémentation d'un prototype informatique afin de montrer la pertinence des concepts que nous avons développés. Pour expérimenter notre prototype nous nous sommes basés sur des cas d'école. Il ne s'agit donc pas encore d'un outil qui peut être utilisé par les thématiciens agronomes afin de simuler dans des systèmes de production agricoles les actions humaines à l'échelle individuelle et collective. Le prototype s'avère néanmoins prometteur pour une future implémentation d'un outil pouvant être réellement exploité par des thématiciens. Pour implémenter notre modèle nous avons choisi la plateforme de simulation AnyLogic [AnyLogic, 2000]. Ce choix a été motivé par les fonctions qu'offre AnyLogic pour coupler des modèles basés sur des approches de modélisation différentes : systèmes multi-agents, systèmes dynamiques, dynamique des systèmes⁸ et systèmes à événements discrets. Dans le domaine agricole, l'approche de dynamique des systèmes (DS) et les systèmes dynamiques (SD) constituent les approches de modélisation les plus utilisées notamment pour modéliser les processus biophysiques. L'enjeu est de développer un modèle SMA où l'on peut intégrer facilement des implémentations basées sur cette approche de DS. Enfin, AnyLogic offre d'autres avantages pour l'implémentation de notre modèle, notamment la possibilité d'une représentation d'un espace continu, de contrôler le déplacement de différentes entités dans cet espace, la facilité de développement de l'interface utilisateur et des animations permettant de rendre la simulation plus explicite. De plus, AnyLogic offre un ensemble d'outils permettant d'observer au cours de la simulation les résultats produits.

Nous commencerons ce chapitre par la description d'AnyLogic. Nous présenterons en second lieu la description de l'implémentation du modèle. Enfin, nous terminons par présenter l'expérimentation du modèle sur des cas d'école.

8. Notons que la plateforme NetLogo possède une extension permettant aussi d'intégrer des modèles de DS dans un SMA.

7.1 Plateforme de simulation AnyLogic

AnyLogic de XJ Technologies Company [AnyLogic, 2000], est un outil de simulation pour les modèles basés sur l'approche à événements discrets, les systèmes dynamiques, la dynamique des systèmes, ainsi que les systèmes multi-agents. Il est basé sur le langage orienté-objet Java ainsi que l'environnement de développement Eclipse. Toute entité dans AnyLogic est une instance d'une classe générique nommée *active object* qui étend une classe standard d'objet Java implantée dans le moteur de simulation d'AnyLogic. La figure 7.1 présente un aperçu du modèle conceptuel d'AnyLogic. Il schématise l'imbrication des différents objets et structures de données ainsi que les outils offerts par AnyLogic. Nous avons mis en évidence (en rouge) les éléments que nous avons utilisés lors de l'implémentation de notre prototype. La modélisation des comportements des agents et les objets se base sur le langage de modélisation UML-RT (Unified Modeling Language for Real Time). La dynamique des agents et objets peut être implémentée en utilisant les diagrammes d'états (statecharts), les diagrammes d'actions ou directement sous forme de fonctions.

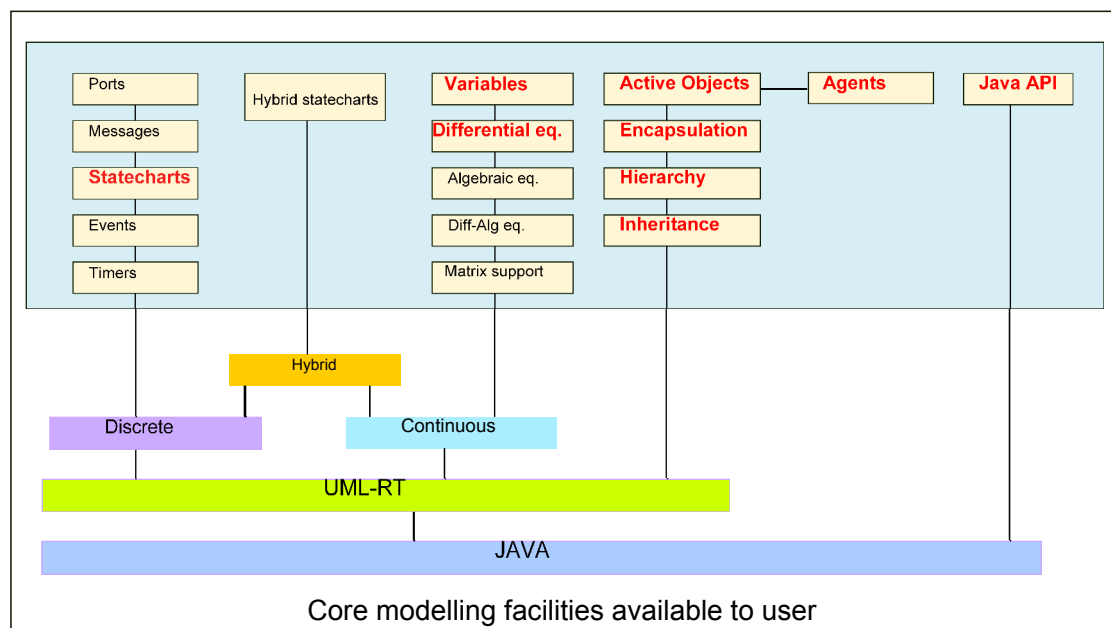


FIGURE 7.1 : modèle conceptuel de l'outil AnyLogic.

La particularité d'AnyLogic concernant l'approche agent est qu'il comporte un élément appelé *environnement*. Celui-ci permet de définir des propriétés communes à un ensemble d'agents. Un modèle multi-agents peut comporter plusieurs environnements. Cependant, un agent ne peut appartenir qu'à un seul environnement à la fois mais il est possible qu'il migre d'un environnement à un autre durant la simulation. Ainsi, l'environnement

permet de définir le modèle de représentation de l'espace, le modèle de gestion du temps et les liens de voisinage entre les agents.

Représentation de l'espace : trois modèles de l'espace sont possibles dans AnyLogic : espace discret, espace continu ainsi que les cartes de systèmes d'information géographique (SIG).

- Un espace discret est défini par une grille de cellules régulières. Une cellule peut avoir un seul occupant (agent) à la fois. Pour ce type d'espace, plusieurs méthodes prédéfinies sont disponibles telles que le déplacement d'un agent d'une cellule à une autre (`moveToNextCell()`), l'obtention de la liste des agents voisins (`getNeighbors()`), l'obtention de l'information sur l'occupation d'une cellule (`getAgentAtCell()`), etc.
- Un espace continu permet aux agents de se déplacer de façon continue avec une vitesse qui peut être définie a priori ou de façon dynamique durant la simulation. AnyLogic, offre aussi plusieurs méthodes prédéfinies pour ce type d'environnement, telles que l'obtention des coordonnées d'un agent (`getXY()`), l'exécution d'une action quand l'agent arrive à destination (`onArrival()`), etc.
- Enfin, il est possible de plonger les agents dans un espace géo-spatialisé défini en important des cartes de SIG vectorielles.

Représentation du temps : AnyLogic supporte trois façons de gérer le temps : pas de temps constant, temps à événements discrets, temps continu. Dans le contexte d'une gestion à pas de temps constant, AnyLogic offre la possibilité de gérer le déclenchement des comportements d'agents et toutes autres entités dans le système selon différentes étapes. En effet, au niveau de l'*environnement*, deux étapes sont possibles : *On before step* et *After step*. Au niveau de l'agent, deux étapes sont possibles : *Before step* et *On step*. Dans la phase *On before step* de l'environnement, il est possible de déclencher un ensemble de traitements dans différentes entités du système avant le déclenchement des agents. Dans *After step* il est possible de déclencher un ensemble de traitements après l'exécution de tous les agents.

Enfin, AnyLogic permet de combiner les quatre approches de modélisation citées ci-dessus dans un même modèle. Par exemple, les dynamiques de l'environnement d'un SMA et le comportement d'un agent peuvent être définis par un système dynamique ou un modèle de dynamique des systèmes.

7.2 Points clés d'implémentation

Dans cette section, nous décrivons de façon succincte l'implémentation du modèle proposé dans le chapitre 6. Nous aborderons en premier la gestion du temps suivie de la

description des principales classes de l'implémentation.

7.2.1 Gestion du temps

Nous avons vu dans le chapitre 6 deux approches de gestion du temps utilisées dans les simulations de modèles basés sur les SMA. Il s'agit de l'approche à pas de temps constant et l'approche à événements discrets. Le choix de l'une de ces deux approches au niveau conceptuel et lors de l'implémentation dépend du domaine à modéliser.

Concernant l'approche à événements discrets, celle-ci peut être implémentée de deux façons : par ordonnancement d'événements et par analyse d'activités. L'implémentation par ordonnancement d'événements a été de prime abord écartée. En effet, pour mettre en place cette solution il est nécessaire de pouvoir planifier a priori tous les événements du système afin de construire l'échéancier. Ceci est en contradiction avec l'idée que nous défendons qui stipule que toute action émerge d'une situation qui ne peut être connue a priori. L'implémentation basée sur l'analyse d'activités (cf. chapitre 3, section 3.2.1.2) est plus adéquate dans le présent travail puisque la date de déclenchement d'événements n'est pas définie à l'avance mais dépend de l'état du système. Néanmoins, bien que l'approche événementielle par analyse d'activités soit adéquate dans le cadre de ce travail et a l'avantage d'être assez souple nous avons choisi l'approche à pas de temps constant. Celle-ci est plus simple à implémenter et paramétrer et s'avère aussi adéquate dans le cadre de ce travail. Par ailleurs, lors de l'implémentation d'un modèle SMA, il est important de prendre en compte le problème de l'ordre d'activation des agents et le problème de la simultanéité (cf. chapitre 3 section 3.2.1). Afin de faire face à ces deux problèmes, nous avons opté pour une solution inspirée du principe d'influence/réaction [Ferber et Müller, 1996] qui a été mise en œuvre en utilisant les différentes étapes (On before step, On after step, On step) d'AnyLogic. Ces étapes ne sont disponibles que dans le cadre d'une gestion du temps à pas constant.

Rappelons que le modèle influence/réaction stipule qu'un agent ne modifie pas directement les variables de l'environnement mais émet plutôt des influences. Lors de la phase *réaction* l'environnement décide quelles influences exécuter et met à jour l'état du système. L'ordre d'activation des agents n'a plus d'impact sur le résultat de la simulation, puisque aucun agent ne modifie directement l'état du système. Le problème de la simultanéité est résolu grâce à un ensemble de lois détenues par l'environnement permettant de résoudre les éventuels conflits entre les influences des agents. Nous nous sommes inspirés de ce principe afin de pallier le problème de l'ordre d'activation des agents mais pas le problème de simultanéité qui ne se pose pas dans notre modèle. En effet, du fait que la situation est inversée les acteurs réels sont représentés par des « actuateurs », entités manipulées par un ensemble d'agents-places dont le rôle est de détecter

les actions possibles ainsi que de sélectionner l'action à exécuter et de la déclencher. Les traitements liés à l'action sont implémentés au niveau des entités environnementales. Un agent ne déclenche pas directement l'action sélectionnée et les traitements liés à cette action. Ceci est réalisé par l'environnement (au sens AnyLogic) dans la phase de *After Step*. En effet, après l'exécution des comportements de tous les agents dont le résultat principal est d'indiquer l'action à exécuter, l'environnement consulte une sorte de table de hachage (HashMap) et déclenche les actions sélectionnées par les agents au niveau des actuateurs et objets passifs concernés. Cependant, contrairement au modèle influence/réaction où l'environnement est doté d'un ensemble de lois permettant de gérer les éventuels conflits dans notre cas il ne peut pas y avoir de conflits entre les actions des agents. En effet, puisque l'espace est partitionné en un ensemble de places dont chacune est contrôlée par un agent-place, celui-ci n'a le droit de déclencher les actions que sur les entités-environnementales qui sont localisées à un instant donné sur la place qu'il gère. Par conséquent, il ne peut y avoir dans le même pas de temps plusieurs agents agissant sur la même entité environnementale. De ce fait, il n'y a pas besoin de mettre en œuvre une technique de gestion de conflits permettant de calculer le résultat de deux actions effectuées simultanément sur le même actuateur/objet-passif afin d'assurer la cohérence des résultats.

Concernant, le problème de l'ordre d'activation des agents et, par, conséquent la cohérence de leurs perceptions, nous avons résolu ce problème en utilisant les deux phases d'exécutions d'un agent : *On Before Step* et *On Step* en référence aux deux phases *influence et réaction*. AnyLogic garantit l'exécution des codes des étapes *On Before Step* de tous les agents avant l'exécution des codes de la phase *On Step*. Pour cela, nous avons établi deux diagrammes d'états : perception et calculAction. Les diagrammes d'états « perception » de tous les agents sont exécutés (déclenchés par un message dans la phase *On Before Step*) avant qu'ils commencent à effectuer les traitements liés à la détection des affordances et la sélection des actions. De cette façon, nous garantissons que chaque agent perçoit de façon cohérente son environnement (entités-environnementales et marques).

La figure 7.2 illustre le mode de déclenchement des agents et l'environnement.

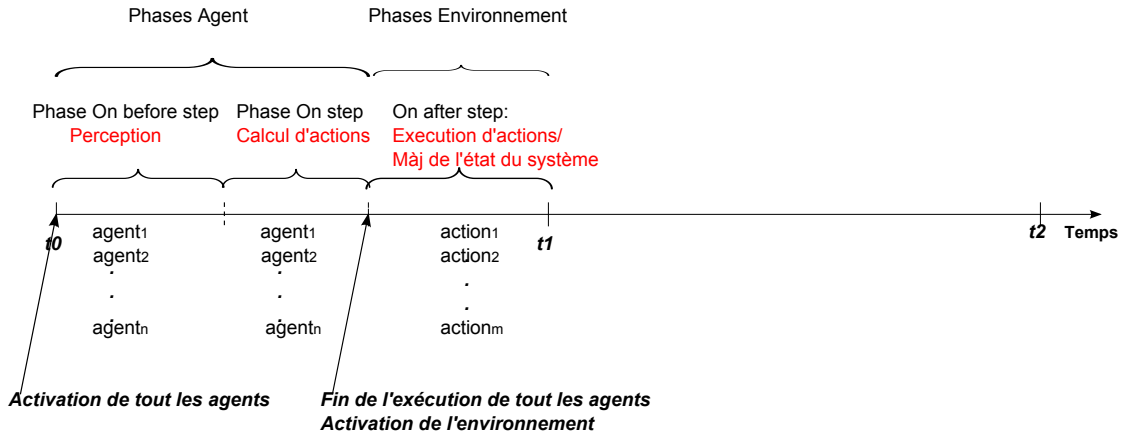


FIGURE 7.2 : les phases d'exécution du comportement des agents (agents-places) et de l'environnement (actuateurs et objets-passifs).

Cette figure illustre les 3 étapes d'exécution des codes des agents et le code implémenté au niveau de l'environnement. Dans la phase *On before step* (agent), tous les agents sont activés dans un ordre aléatoire afin d'exécuter le code qui leur permet d'acquérir des percepts. Ce qui correspond concrètement à l'ensemble de faits portés par les entités-environnementales situées sur leurs places à ce pas de temps, les drapeaux déposés par leurs voisins ainsi que les traces si elles existent. Dans la phase *On step* (agent), tous les agents sont activés à nouveau afin d'exécuter le code qui correspond à la détection d'affordance, dépôt de drapeau si besoin, dépôt de marque ou évaporation de marque si besoin, réification d'affordance et sélection d'actions. Dans la phase *On after step* (environnement), le code de l'environnement permettant de déclencher les actions sélectionnées auparavant par les agents est activé. Par conséquent, l'état des entités-environnementales est modifié après l'étape de perception et de calcul d'actions de tous les agents.

7.2.2 Les principales classes du modèle

Nous avons vu dans le chapitre 5 que généralement un système agricole est représenté par de deux sous-systèmes : le système décisionnel et le système de production. Le système décisionnel est responsable de tout ce qui concerne l'action tandis que le système de production est celui qui subit l'action et produit l'effet de l'action. Dans notre modèle le système de production est représenté par les entités-environnementales. Celles-ci doivent inclure des modèles (ex. biophysique) qui indiquent comment une entité-environnementale (ex. une culture, le sol) réagit aux actions déclenchées par les agents-places (figure 7.3). Ces modèles biophysiques sont du domaine des compétences des thématiciens et sont nécessaires pour simuler un système réel. La figure 7.3 montre les principales classes du modèle que nous allons décrire dans les sections suivantes.

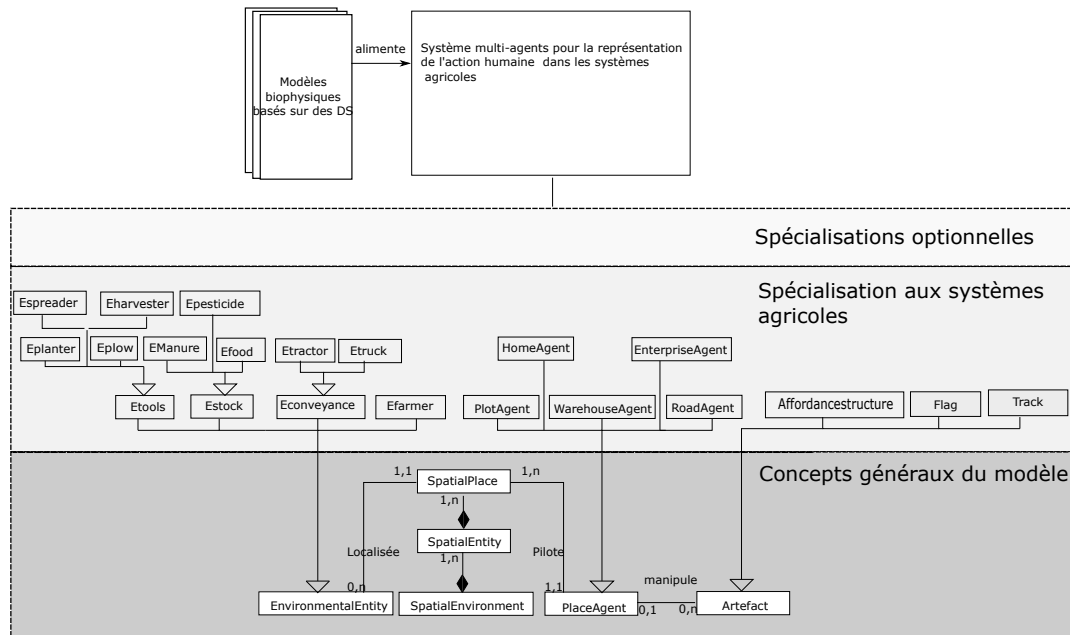


FIGURE 7.3 : les principales classes du modèle implémenté.

7.2.2.1 Environnement spatial

Nous avons spécifié dans le chapitre 6 que nous avons opté pour un modèle continu de l'espace. Celui-ci est un espace euclidien à deux dimensions constitué d'un ensemble de places de tailles régulières ou irrégulières. Chaque place est caractérisée par un vecteur de points de coordonnées.

Cette représentation de l'espace a été implémentée par trois classes de type *active Object* : *SpatialEnvironment*, *SpatialEntity* et *SpatialPlace*. *SpatialEnvironment* représente tout l'espace du modèle simulé. *SpatialEntity*, représente l'espace à l'échelle de la parcelle, bâtiment, chemin (toute entité composant l'espace simulé). *SpatialPlace*, représente l'espace à la plus petite échelle d'observation définie par l'utilisateur, celle de la place.

La classe *SpatialEnvironment* est paramétrée par une carte SIG. L'utilisation des cartes SIG a été introduite dans le but d'obtenir une configuration de l'espace réaliste ainsi que de pouvoir connecter notre modèle aisément à différents modèles géographiques. Cependant, afin de faciliter l'implémentation et de rester cohérent avec le modèle conceptuel où nous avons opté pour un modèle continu de l'espace, les cartes SIG ont fait l'objet d'un pré-traitement avec le logiciel QGIS afin de produire une couche comportant les coordonnées (longitude, latitude) de chaque entité (représentée par un polygone) de la carte (ex. parcelle, chemin). La couche obtenue est importée dans AnyLogic et fait l'objet d'un traitement en utilisant des fonctions d'AnyLogic (`convertXForward(double`

longitude, double latitude) et `convertYForward(double longitude, double latitude)` permettant de convertir les coordonnées (longitude, latitude) de chaque point délimitant les entités (polygones) de la carte en coordonnées cartésiennes (x,y), figure (7.4). L'environnement spatial obtenu fait l'objet d'un traitement afin de le partitionner en un ensemble de places selon une échelle prédéfinie. Dans le prototype actuel nous avons implémenté un algorithme permettant un partitionnement⁹ régulier de l'espace, figure 7.5. Le type d'une place (parcelle, chemin, bâtiment, etc) est détecté en vérifiant dans quel polygone (représentant une entité de l'environnement spatial) se trouve chaque point délimitant la place (ex. les coordonnées des quatre sommets d'un carré). Le type de l'entité du polygone qui contient le plus de points d'une place sera attribué à la place. Dans le cas où deux polygones différents contiennent le même nombre de points délimitant la même place, le type de la place est alors choisi de façon aléatoire entre les deux types de polygones. Dans le cas d'un partitionnement irrégulier de l'environnement spatial, les coordonnées des places doivent être spécifiées à l'avance (ex. dans un fichier externe). La détection du type de la place se fera de la même façon que dans le cas d'un partitionnement régulier.

Ainsi, comme nous l'avons précisé précédemment chaque place est pilotée par un agent-place. Ceci est implémenté par une relation d'association entre la classe `PlaceAgent` et la classe `SpatialPlace`.

Nous avons utilisé sur cette figure un dégradé de la couleur verte afin de différencier les parcelles sur la carte. Les cellules en blanc représentent des endroits dans l'environnement spatial (chemins, bâtiments, etc) qui ne sont pas détectés comme des parcelles agricoles.

7.2.2.2 Entité Environnementale

Toute entité dans le système qui ne joue pas le rôle d'un agent est une instance d'une classe qui étend la classe `EnvironmentalEntity` de type *activeObject*. Nous avons défini quatre sous-classes de `EnvironmentalEntity` : `Efarmer`, `Estock`, `Econveyance`, `Etools`. La classe `Efarmer` représente les agriculteurs. La classe `Estock` représente tous les stocks du système : stock d'engrais, stock de nourriture, pesticide, bétail (la classe `Eanimals`). La dynamique de chaque stock est implémentée dans le prototype par un modèle DS (stock-flux). La classe `Econveyance` représente tous les moyens de transport tels que tracteurs et camions. Les instances de ces classes se caractérisent par leurs vitesses, leurs capacités de transport pour les camions, leur état de marche. La classe `Etools` regroupe un ensemble d'outils tels que charrue, rotavator, planteuse.

9. Rappelons que le partitionnement en places est justifié par la nécessité d'attribuer à chacune un agent-place qui sera en charge de cette portion d'espace (cf. chapitre 6, section 6.1.1). Par conséquent, il ne s'agit pas à proprement parler d'une discrétisation mais d'une délimitation des zones de compétence des agents-places.



FIGURE 7.4 : les parcelles de l'environnement spatial avant partitionnement.

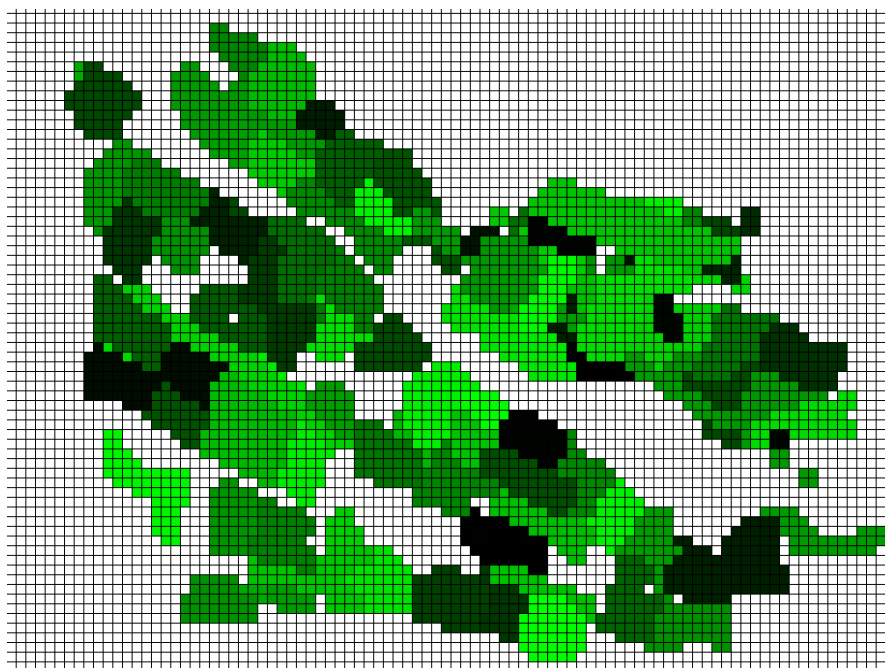


FIGURE 7.5 : partitionnement régulier de l'environnement spatial.

Toutes ces classes se caractérisent principalement par l'ensemble des capacités d'action que nous souhaitons simuler et l'ensemble des actions pouvant être subies par les instances de ces classes ainsi que leurs positions à tout instant dans l'environnement spatial.

Afin de montrer la manière dont ces modèles biophysiques peuvent être intégrés dans notre modèle de l'action, nous avons intégré dans notre prototype des modèles de DS au niveau de certaines entités-environnementales.

Système multi-agents/dynamique des systèmes. Comme nous l'avons précisé précédemment, l'une des approches de modélisation majoritairement utilisée dans le domaine de systèmes agricoles est l'approche de dynamique des systèmes. Afin de pouvoir intégrer des modèles basés sur les modèles de DS au sein d'un modèle SMA, nous avons jugé pertinent d'implémenter la dynamique de certaines entités environnementales par une représentation en termes de stocks et de flux. En effet, les instances des classes qui étendent la classe *Estock* encapsulent un modèle stock-flux dont l'évolution est contrôlée aussi par les actions de l'agent-place qui gère l'entité-environnementale. Lorsqu'un agent-place déclenche une action ceci se traduit concrètement par l'activation de flux. Cependant, le modèle stock-flux implémentant la dynamique d'une entité-environnementale peut évoluer indépendamment des actions des agents selon une échelle temporelle indépendante de celle selon laquelle évoluent les agents. Dans l'implémentation actuelle, les agents sont activés selon un pas de temps constant où ils déclenchent des actions à des instants précis. Cependant, les entités-environnementales évoluent selon un temps « continu » (figure 7.6). C'est-à-dire une fois la simulation lancée, le code implémenté au niveau des entités-environnementales est déclenché et s'exécutera en continu notamment les modèles stock-flux contrairement aux agents dont le code est déclenché à chaque pas de temps. L'interaction entre le temps discrétisé des agents et le temps continu des entités-environnementales est géré par la plateforme AnyLogic. L'utilisateur spécifie au niveau de l'entité « environnement » le pas de temps ainsi que les agents faisant partie de cet environnement. Toute autre entité du système implémentée par un *active object* ou par un *agent* ne faisant pas partie de l'environnement ne sera pas activée selon le pas de temps défini au niveau de l'environnement.

La figure 7.7 montre un modèle DS représentant la dynamique de l'entité-environnementale de type *Eanimals* représentant un troupeau de bétail. Plus précisément, le modèle représente l'influence de l'action de *nourrir les animaux* (*FeedingAnimals*). Ce modèle est constitué de trois flux : *qtefood*, *qtefoodDay*, *fooduse* ainsi que de trois stocks : *stfood*, *stanimals*, *stfoodused*. Le stock **stfood** représente le stock de nourriture, il est alimenté par le flux **qtefood**. Celui-ci permet de remplir le stock de nourriture de façon automatique c'est-à-dire sans l'influence d'une action externe

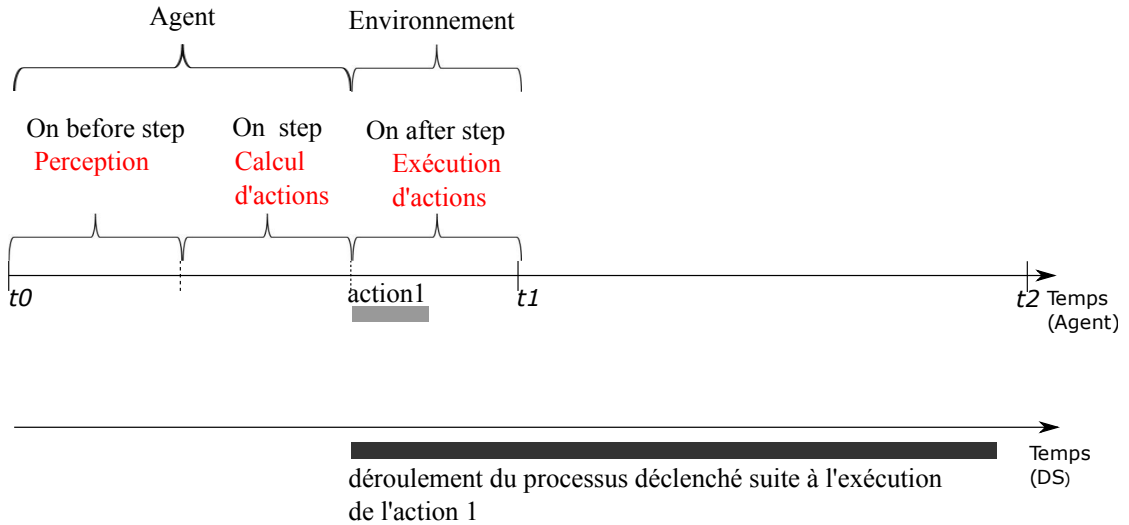


FIGURE 7.6 : les axes temporels illustrant l'évolution des agents et les processus liés aux actions.

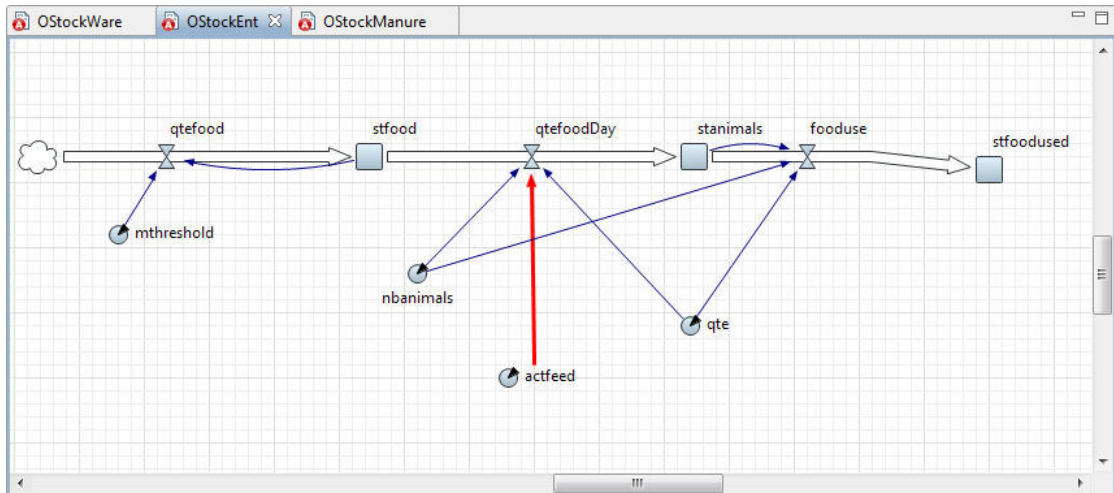


FIGURE 7.7 : capture d'écran Anylogique d'un modèle DS représentant la dynamique d'un troupeau de bétail.

déclenchée par un agent-place. Le remplissage de ce stock est contrôlé par une variable **mthreshold** qui indique la quantité minimale qui peut être contenue dans le **stfood**. Lorsque la quantité de celui-ci devient inférieure à **mthreshold** alors le stock est rempli à nouveau. La vidange du stock **stfood** est contrôlé par le flux **qtefoodDay** qui à son tour est contrôlé par une variable booléenne **actFeed**. Celle-ci est mise à vrai lorsque l'action *nourrir les animaux* est déclenchée par l'agent-place qui contrôle l'entité-environnementale *Eanimals*. Lorsque la variable **actFeed** est mise à vrai, le flux **qtefoodDay** est activé et permet la vidange du stock **stfood** en fonction du nombre d'animaux **nbanimals** et la quantité de nourriture attribuée à chaque animal **qte**. Lorsque l'agent-place perçoit les conditions d'arrêt de l'action de nourriture (P_A^+), il

met fin à cette action. Ceci se traduit par la fermeture du flux **qtefoodDay**. Le modèle stock-flux continue à évoluer par la suite indépendamment de l'agent-place. En effet, Le stock **stanimals** qui représente la quantité de nourriture consommée par le bétail continue à évoluer en se vidant selon une équation implémentée au niveau du flux **foodused** qui représente le processus de digestion des animaux. Lorsque le stock **stanimals** est à nouveau vide cela indique que l'action de nourriture peut être déclenchée à nouveau et fournit ainsi à l'agent-place qui contrôle l'entité *Eanimals* une des conditions (P_A^-) du déclenchement de l'action de nourriture.

7.2.2.3 Agent-place

Un agent est une instance d'une classe qui étend la classe *PlaceAgent*. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 6, un agent-place doit détenir uniquement les connaissances lui permettant de détecter les affordances possibles sur sa place (un exemple de règle permettant de détecter les affordances est donné dans la section 7.3.1). Pour cela, nous avons défini quatre types d'agents : *EnterpriseAgent* (agent qui pilote l'atelier d'élevage), *HomeAgent* (agent qui pilote la maison), *WarehouseAgent* (agent qui pilote le dépôt de matériel) ainsi que *PlotAgent* (agent parcelle). *PlaceAgent*, implémente toutes les méthodes communes à tous les agents. Il s'agit des méthodes liées aux mécanismes de perception tels que la détection de la présence d'une entité environnementale sur une place (*getEnvironmentalEntity()*), les méthodes liées aux mécanismes de coordination de traces (*getMark()*, *putMark()*, *propMark()*, *evapMark()*), le dépôt de drapeau (*getFlag()*, *putFlag()*, *delayFlag()*).

La classe *PlaceAgent* implémente aussi un ensemble de méthodes abstraites qui doivent être définies par les sous-classes. Il s'agit principalement des méthodes liées à la détection et la réification d'affordances ainsi que la sélection et le déclenchement d'actions. Ainsi, chaque classe d'agents détient une table de hachage contenant l'ensemble des capacités d'action pouvant être déclenchées sur la place gérée par un agent.

7.3 Expérimentation sur la base de cas d'école

Dans cette section nous présentons notre prototype en se basant sur des cas d'écoles :

- Détection d'affordances : nous montrons deux exemples de détection d'affordances. Le premier concerne le cas où toutes les entités-environnementales sont situées sur la même place. Le deuxième exemple concerne le cas où les entités-environnementales sont situées sur une place voisine de l'agent-place qui détecte l'affordance ce qui l'incite à déposer un drapeau.
- Propagation de traces : nous montrons plusieurs chemins qui sont créés par simulation entre deux places de l'environnement spatial ainsi que les informations portées par ces traces.
- Déclenchement d'actions : nous montrons le déclenchement et l'exécution d'une action présentée dans la section 7.3.1.

Description du système simulé. L'expérimentation a été effectuée sur un système agricole comportant deux exploitations. L'environnement spatial est partitionné en un ensemble de places de forme carrée. C'est-à-dire un partitionnement régulier où chaque place est définie par un vecteur de quatre couples de coordonnées (x,y) réelles figure 7.8.

Structure des exploitations.

- L'exploitation numéro 1 comporte 10 parcelles (les places en dégradé de couleur verte), un atelier d'élevage (les places en mauve), un dépôt de matériels (les places en jaune) et une maison (les places en bleu) ;
- L'exploitation numéro 2 comporte 8 parcelles (les places en dégradé de couleur rouge), un dépôt de matériels et une maison ;
- Les chemins (les places en gris) sont communs aux deux exploitations.

Chaque exploitation comporte un ensemble de ressources qui représentent les entités-environnementales dans notre modèle.

Entités-environnementales composant les exploitations.

- L'atelier d'élevage comporte un stock de fumier (une instance de la classe Emanure), un stock de nourriture (une instance de la classe Efood) ainsi qu'une instance de la classe Eanimals. Nous considérons dans cet exemple que toutes ces entités-environnementales sont situées sur la même place constituant l'atelier d'élevage, même si celui-ci est constitué de 10 places. Le fait que toutes les entités-environnementales soient situées sur la même place n'est pas réaliste. Cependant nous avons fait ce choix pour faciliter l'explication des cas d'écoles cités auparavant ;

- Les dépôts de matériels des deux exploitations comportent à l'initialisation de la simulation un moyen de transport (une instance de la classe Etruck), un tracteur (une instance de la classe Etractor), un stock de pesticide (une instance de la classe Epesticide), un ensemble d'outils tels qu'une charrue, un rotavator, une planteuse.
- Les maisons comportent à l'initialisation de la simulation deux entités environnementales de type Efarmer représentant les deux agriculteurs des deux exploitations.

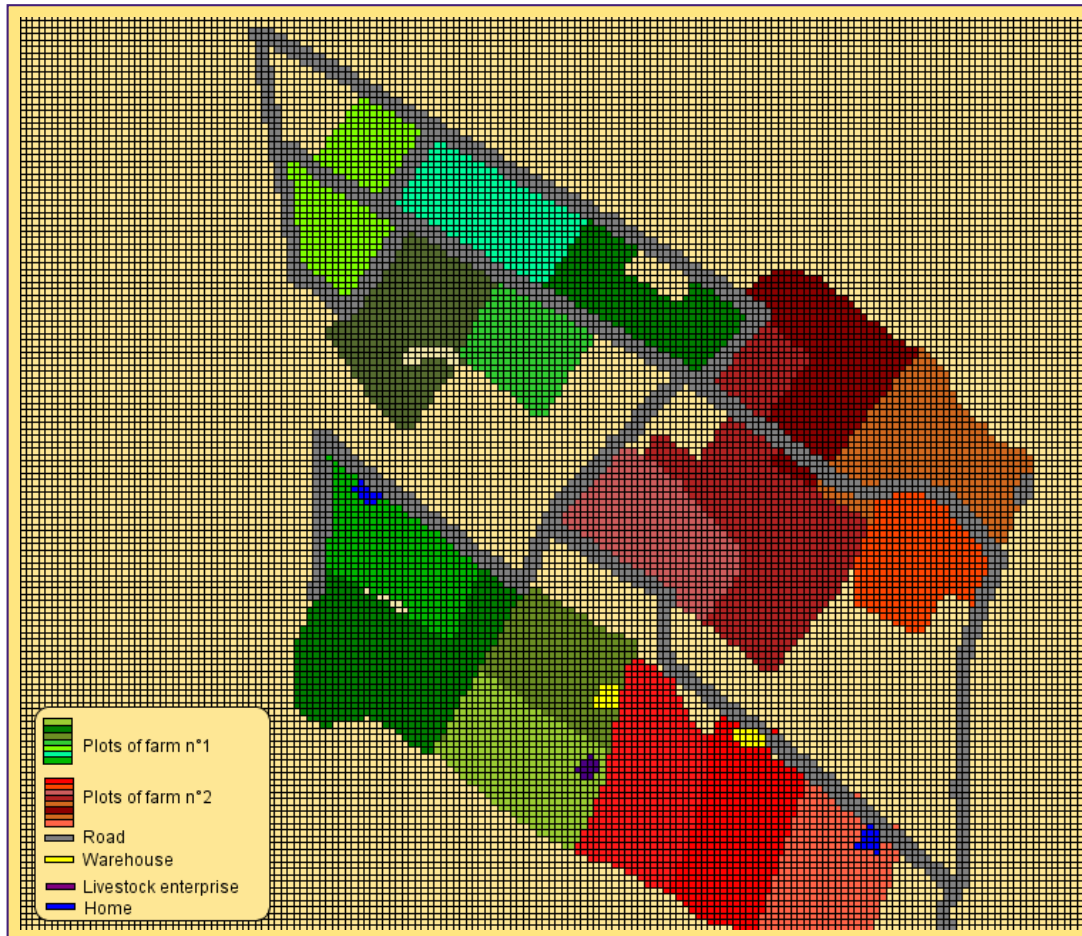


FIGURE 7.8 : les deux exploitations du système simulé. Les cellules (places dans notre modèle) non coloriées ne font pas parties de l'environnement spatial. Aucun agent n'est attribué à ces cellules. Les agents-places sont situés au niveau des cellules coloriées. A chaque place est attribué un seul agent pour son pilotage.

A chacune des places est attribué un agent pour son pilotage. Dans l'implémentation actuelle, nous avons fait le choix de définir le « voisinage »¹⁰ entre deux agents en se basant sur la distance qui sépare les places qu'ils pilotent. Plus précisément, deux agents sont voisins si la distance entre les coordonnées réelles (x,y) des centres de gravité de

10. Il est également possible de redéfinir la fonction qui définit le voisinage entre deux agents en se basant sur d'autres critères. Par exemple, deux agents sont voisins si les places qu'ils pilotent ont des frontières communes.

la place que chacun pilote est égale à une certaine distance qui peut être choisie par l'utilisateur. Dans cet exemple, nous avons choisi une distance de telle sorte que chaque agent a pour voisins les huit agents qui lui sont adjacents. Cependant, le nombre de voisins pour chaque agent peut changer en fonction du partitionnement de l'espace (partitionnement régulier ou irrégulier) ainsi que de la distance choisie. Par exemple, dans le cas d'un partitionnement irrégulier les agents qui pilotent deux places adjacentes peuvent ne pas être voisins si la distance séparant leurs places est inférieure à la distance choisie. La relation de voisinage entre les agents est utilisée pour les algorithmes de propagation de marques. Cependant, un agent perçoit une entité-environnementale dans un rayon autour de sa place. Par conséquent, une entité-environnementale située sur une place voisine d'un agent ne sera pas forcément perçue par l'agent-place si celle-ci est située au-delà de son rayon de perception.

Par ailleurs, les actions peuvent avoir des contraintes temporelles qui les régissent. En effet, dans les systèmes agricoles, chaque culture a son itinéraire technique qui définit les dates de début au plus tôt et les dates de fin au plus tard pour effectuer les différentes actions telles que semer, labourer, récolter, etc. Pour cela, chaque agent est paramétré par un calendrier de ses propres actions. Le calendrier, spécifie les dates de début au plus tôt et les dates de fin au plus tard ainsi que la durée estimée des actions. Une action ne peut être donc réalisée en dehors de ses dates de début et de fin. Cependant, sa date de début/fin réelle reste inconnue jusqu'à ce que la situation observée par un agent-place soit favorable à son déclenchement. Enfin, tous les agents du système ont accès à une horloge leur permettant de savoir si les contraintes temporelles journalières d'une action sont vérifiées ou non.

7.3.1 Détection d'affordance

Nous présentons dans cette section deux exemples de détection d'affordance : l'affordance *PFeedingAnimals* et l'affordance *PPlowingPlot*. *PFeedingAnimals* est une action possible qui consiste à nourrir les animaux. *PPlowingPlot* est la possibilité d'action de labour.

Exemple 1 : affordance PFeedingAnimals

La figure 7.9 montre l'affordance *PFeedingAnimals* détectée au niveau de l'une des places de l'atelier d'élevage. On considère que dans cet exemple, sur cette place sont localisées, à un pas de temps donné, 4 entités-environnementales qui sont des instances des classes : *Efarmer*, *Efood*, *Eanimals* et *Emanure*.

C'est-à-dire les couples de coordonnées (x,y) définissant les positions de ces entités dans l'environnement spatial se trouvent à l'intérieur d'une place de l'atelier d'élevage. Chacune de ces entités possède des capacités à exécuter ou à subir des actions comme le

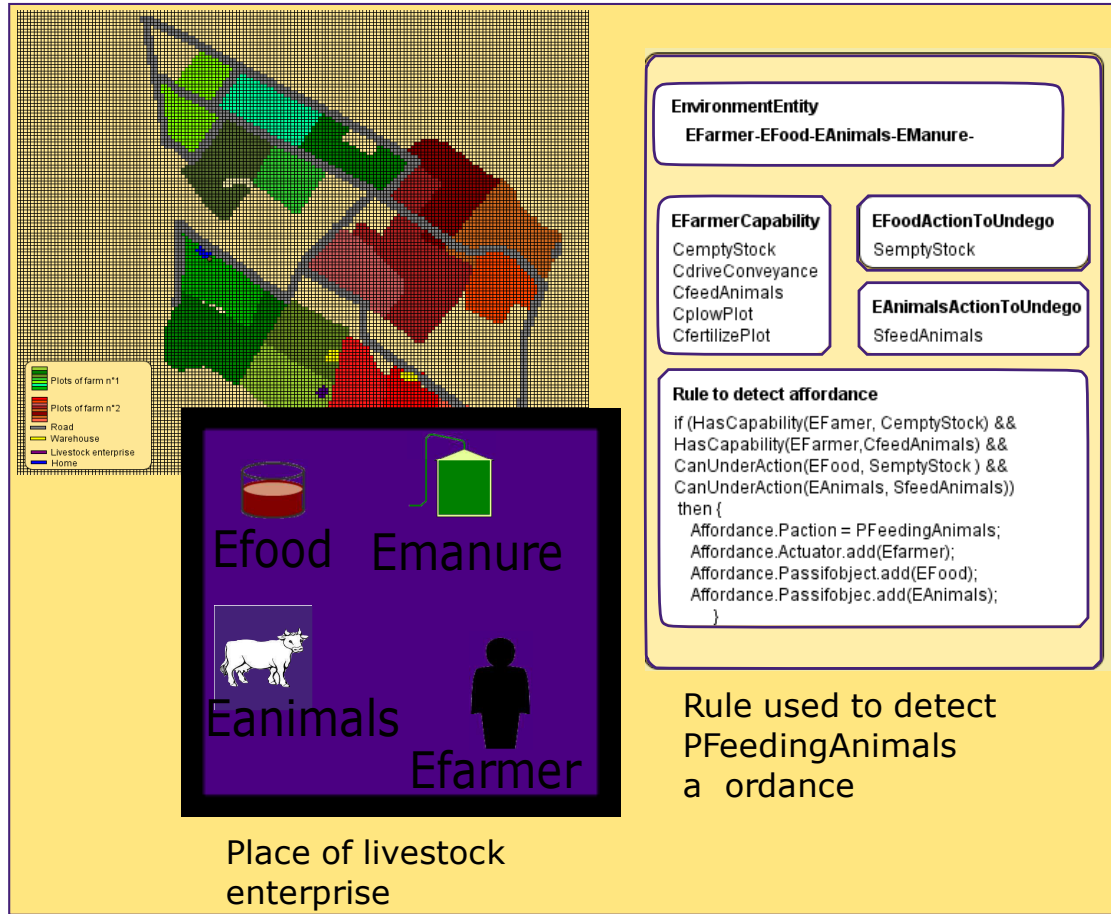


FIGURE 7.9 : exemple de détection de l'affordance « PFeedingAnimals ».

montre la figure 7.9. L'agent-place qui pilote l'atelier d'élevage ne peut percevoir que les capacités d'actions et les actions qu'une entité peut subir qui lui servent à détecter les affordances dont les actions peuvent être exécutées sur sa place. Dans le prototype nous avons défini en plus de l'action *PFeedingAnimals*, trois autres actions possibles au niveau de la place atelier d'élevage : *PCleaningEnterprise* (action qui consiste à nettoyer l'atelier), *PEemptyingStock* (action qui consiste à vider un stock d'effluent ou de nourriture) et *PMovingEntity* (action qui consiste à déplacer une entité-environnementale telle que les instances de la classe *EFarmer*). L'agent-place de l'atelier d'élevage ne peut donc pas percevoir les capacités de *EFarmer* : *CplowPlot* et *CfertilizePlot* car ce sont des capacités d'actions qui ne peuvent pas être réalisées sur la place de l'atelier d'élevage. Pour filtrer les faits portés par les entités-environnementales, nous avons indiqué dans le chapitre 6 qu'un agent utilise une fonction *Filter_K*. Pour cela, une capacité d'action d'un objet portant deux informations : (i) le libellé de la capacité d'action : lorsque le libellé est précédé par « C » cela signifie que c'est une capacité d'action. Lorsqu'il est précédé par « S » cela signifie qu'il s'agit d'une action qui peut être subie par l'entité-environnementale. (ii)

le type : indique les classes d'agents (EnterpriseAgent, RoadAgent, PlotAgent, WarehouseAgent ou HomeAgent) qui peuvent percevoir cette capacité d'action. La fonction *Filtre_K* est implémentée par une simple méthode qui consiste à vérifier si le type de la capacité d'action ou l'action à subir correspond à la classe de l'agent capable de la percevoir.

Enfin, la règle de détection d'affordance consiste à vérifier pour l'affordance de *PFeedingAnimals* s'il existe une entité-environnementale possédant la capacité *CemptyingStock* et la capacité *CfeedingAnimals* et deux entités-environnementales pouvant subir l'action *SemptyingStock* et l'action *SfeedingAnimals*. L'affordance détectée porte l'action possible : *PFeedingAnimals*, l'actuateur correspondant est l'entité-environnementale de type *Efarmer* qui porte les capacités nécessaires à l'exécution de l'action *FeedingAnimals*. Les entités-environnementales qui jouent le rôle d'objet-passifs sont de type *Efood* et *Eanimals*.

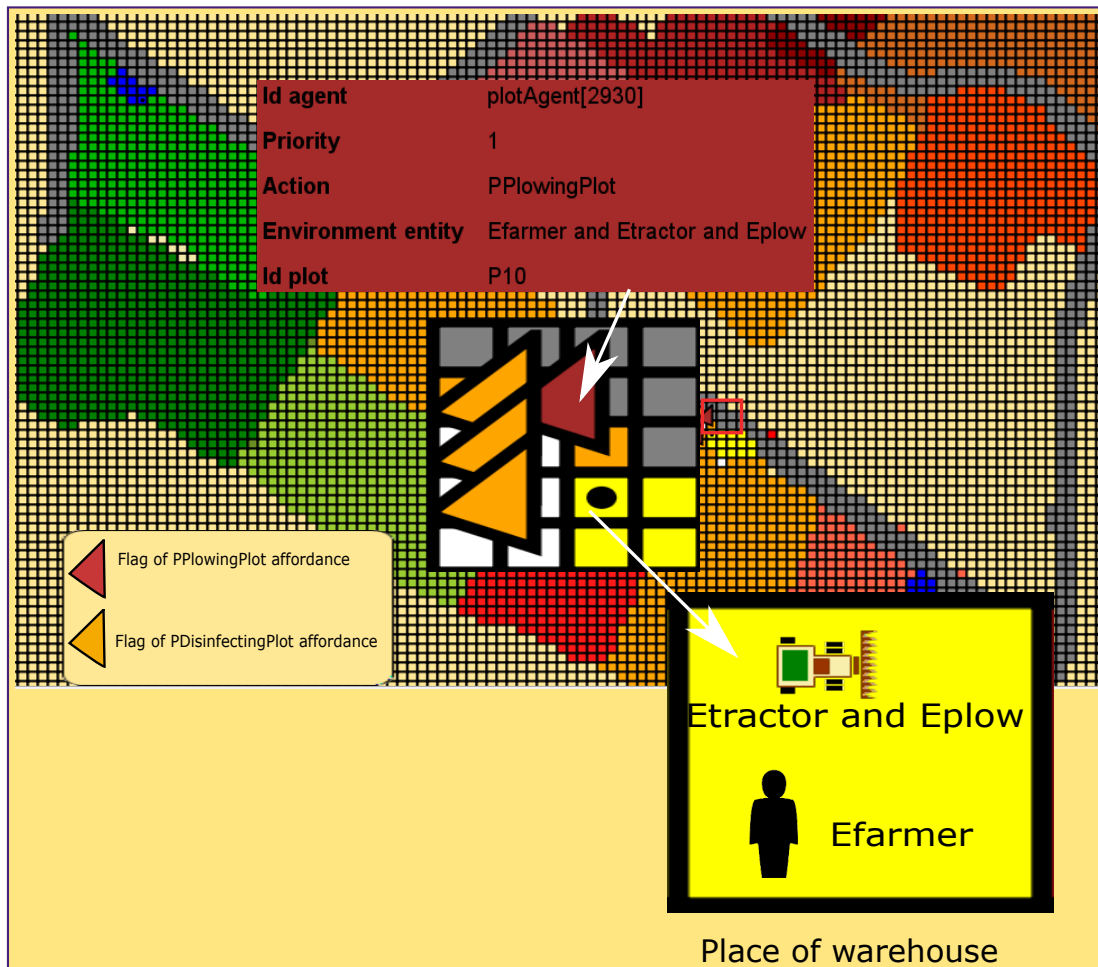


FIGURE 7.10 : exemple de dépôt de drapeaux suite à la détection de l'affordance « PPlowingPlot » qui correspond à l'action de labour.

Exemple 2 : affordance PPlowingPlot

Cet exemple illustre l'affordance de *PPlowingPlot*, détectée par un agent-place de type *EPlotAgent*. Les entités-environnementales : *Efarmer*, *Etractor*, *Eplow* qui ont mené à la détection de cette affordance ne sont pas situées sur la place de l'agent-place *EPlotAgent* mais sur une place voisine de type *EWarehouse*. Contrairement au cas précédent où l'action possible *PFeedingAnimals* peut devenir l'action à exécuter si les conditions de sa réalisation sont vérifiées ; l'agent-place *EPlotAgent* doit d'abord déposer une marque de type drapeau pour demander à l'agent *EWarehouse* de lui envoyer les entités-environnementales nécessaires à l'action *PlowingPlot* (l'action de labour de parcelle). En effet, selon notre modèle chaque agent place ne peut agir que sur les entités situées sur sa place. De plus, les agents-places ne communiquent pas de façon explicite mais par l'intermédiaire des marques. La figure 7.10, illustre le drapeau déposé par l'agent-place *EPlotAgent*. Le drapeau permet d'informer l'agent *EWarehouse* de l'action possible (*PPlowingPlot*) détectée sur la place de son voisin et de sa priorité, des entités-environnementales demandées (*Efarmer*, *Etractor* et *Eplow*), de l'agent qui a déposé le drapeau. Dans le prototype, nous avons défini deux priorités pour les actions : 0 et 1. 0 indique que l'action est urgente ou la plus prioritaire, 1 dans le cas contraire.

La figure 7.11, montre deux drapeaux déposés par deux agents-places de type *PlotAgent* appartenant à deux parcelles nommées : P11 et P4. Le diagramme d'actions sur la figure montre que l'action de *PlowingPlot* est en cours sur la parcelle P11 tandis qu'un agent-place appartenant à la parcelle P4 a pu détecter l'affordance de *PdisinfectingPlot* et a déposé un drapeau pour demander cette entité. Nous remarquons aussi, un autre drapeau déposé par un agent-place de la parcelle P11 afin d'obtenir les entités-environnementales : Efarmer, Etractor, Eplow pour réaliser à son tour l'action de *PPlowingPlot*.

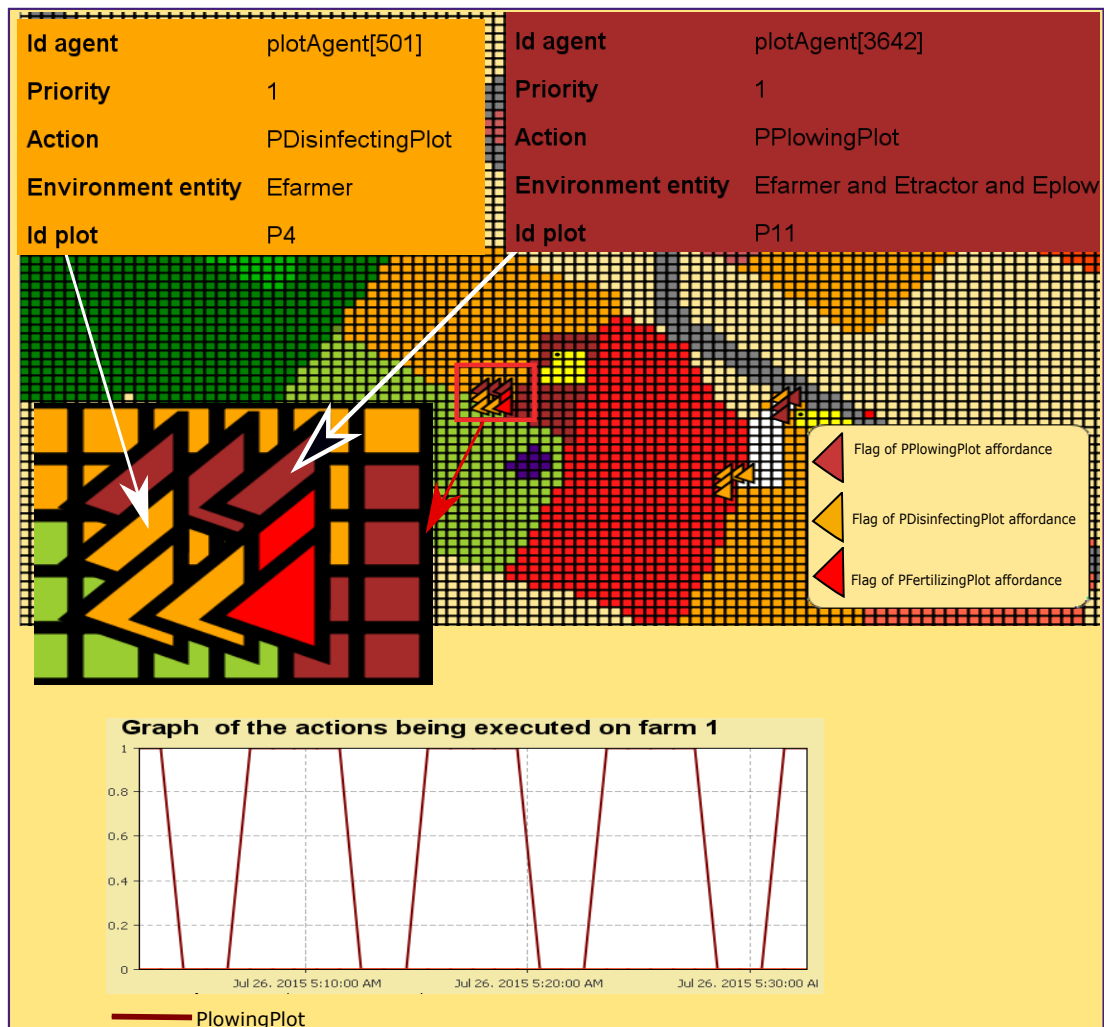


FIGURE 7.11 : exemple de dépôt de drapeaux pour l'affordance « PdisinfectingPlot » et « PPlowingPlot ».

7.3.2 Propagation de traces

Nous avons précisé dans le chapitre 6 qu’aucune entité dans le système (agent ou entité-environnementale) ne possède une carte de l’environnement spatial. D’autre part, nous avons opté pour une coordination d’agents basée sur le concept de stigmergie. La coordination dans notre cas consiste principalement à gérer le partage des ressources (représentées par des entités-environnementales) entre les agents-places. Les agents ne font donc que communiquer implicitement entre eux par l’intermédiaire des marques. Dans cette section nous montrons un exemple de propagation de traces entre deux places de deux exploitations différentes.

Dans le système de notre exemple, l’exploitation numéro 1 comporte un atelier d’élevage et elle est supposée produire du fumier utilisable comme engrais organique. Cette ressource est partagée entre les deux exploitations pour fertiliser le sol. Dans le système réel, lorsque l’agriculteur de l’exploitation numéro 2 souhaite obtenir de l’engrais, il formule sa demande auprès de l’agriculteur de l’exploitation numéro 1. Dans notre modèle, la coordination se fait entre les agents-places (l’agriculteur est représentée par une entité-environnementale sous le contrôle des agents-places) par l’intermédiaire des traces. Lorsque l’engrais est manquant chez un agent-place pour exécuter l’action d’épandage, il dépose une trace. Ceci, afin d’une part informer l’agent-place qui détient cette ressource de sa demande d’engrais et d’autre part pour qu’un chemin soit construit entre la place de l’agent demandeur d’engrais et la place de l’agent où le stock d’engrais est situé pour acheminer cette ressource.

La figure 7.12 montre la propagation de traces afin de coordonner un agent-place de type *PlotAgent* et l’agent-place de type *EnterpriseAgent*. L’agent-place *PlotAgent* a déposé une trace suite à l’interruption de l’action d’épandage en cours de réalisation par l’actuateur (Efarmer-Etractor-Espreader). L’interruption de cette action est due au manque d’engrais. Une quantité suffisante d’engrais fait partie des conditions de réalisation de l’action d’épandage. Sur la figure 7.12, le graphe des actions montre que l’action d’épandage est en cours sur une parcelle de l’exploitation numéro 2. Cependant, l’agent-place *PlotAgent*[2542] a dû interrompre son action et a déposé une trace de type *recherche*. Dans la phase *before step* un agent-place exécute le code de la méthode *getMark()* qui consiste à récupérer les marques déposées par ses voisins ainsi qu’à comparer le poids des marques pour garder celle de poids minimum (ceci afin de pouvoir construire le chemin le plus court). Dans la phase *on step*, l’agent-place vérifie la ressource demandée, dans le cas où il possède la ressource, il dépose une trace avec les mêmes informations que la trace perçue (récupérée par la méthode *getMark()* et met à jour le sens de la trace en ascendant). Ceci afin que le chemin final puisse être construit. Dans le cas où il ne possède pas la ressource demandée, il dépose une trace en incrémentant

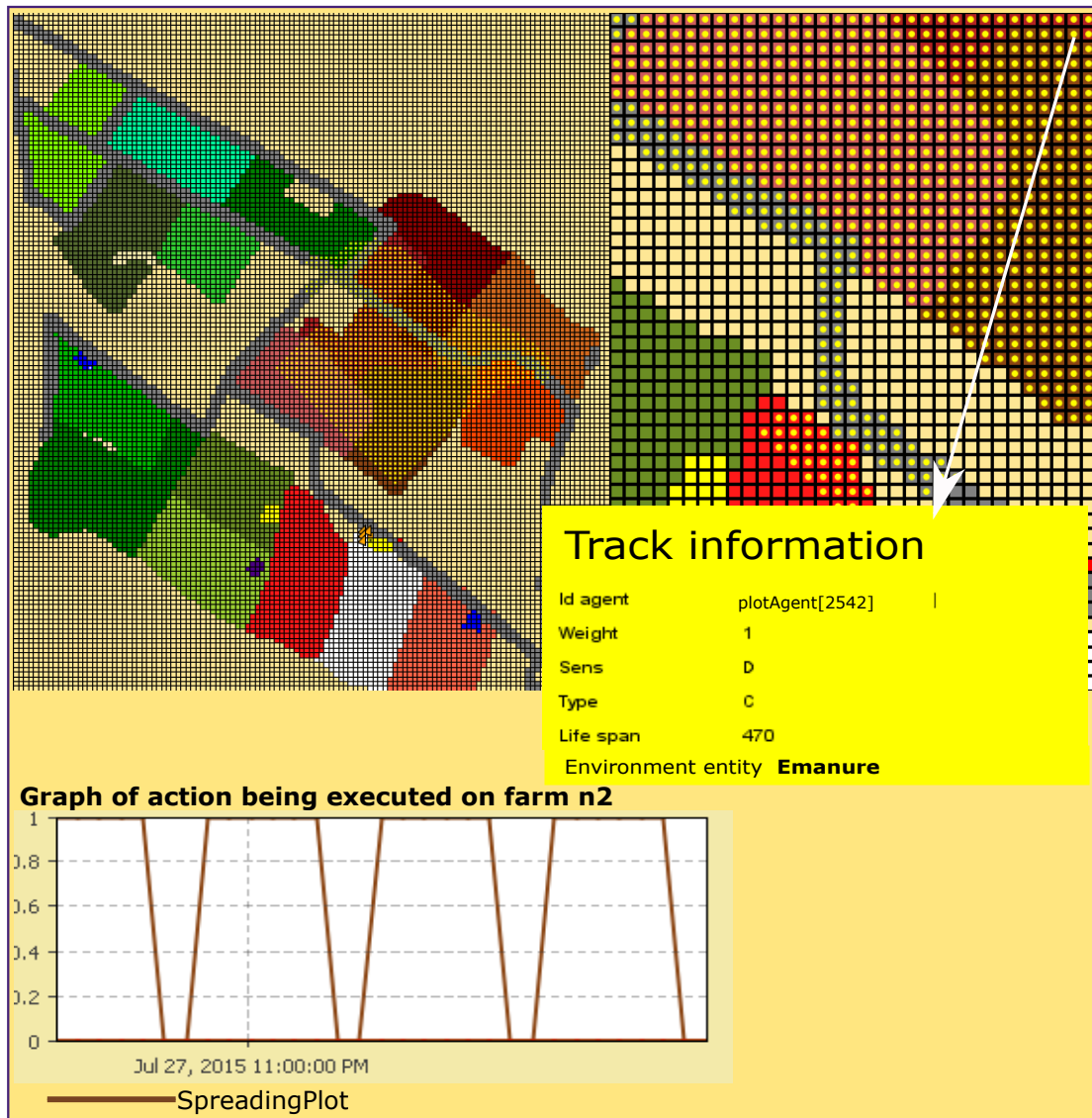


FIGURE 7.12 : construction de chemins phase descendante. Les traces sont matérialisées par les points jaunes.

son poids. Une trace est ainsi une instance de la classe *Track* portant les informations affichées sur la figure 7.12. Ces informations sont : l'identifiant de l'agent qui a déposé la trace, le poids de la trace, le sens de la trace (D pour descendant), la durée de vie de la trace (celle-ci est décrémentée par la méthode *evapMark()* à chaque pas de temps, lorsque la durée atteint 0 la trace est supprimée) ainsi que l'entité demandée (Emanure).

La figure 7.13 montre le chemin construit entre la place de *PlotAgent[2542]* et la place de l'agent *enterpriseAgent*. Le poids de la trace indique la distance en nombre de places (120 places dans cet exemple) la plus courte entre les places concernées par les chemins. Celui-ci servira donc l'agent *PlotAgent[2542]* à envoyer l'actuateur (Efarmer-Etractor) se trouvant sur sa place pour récupérer de l'engrais chez l'agent *EnterpriseAgent*. Le

cas de figure présenté dans cet exemple peut être assimilé à un type de coordination correspondant à la dépendance producteur/consommateur présenté dans le chapitre 4, section 4.1.



FIGURE 7.13 : construction de chemin en phase ascendante reliant une place de l'agent-Plot(2542) et l'atelier d'élevage (le chemin est matérialisé par les points noirs).

7.3.3 Déclenchement/exécution d'action

L'affordance *PFeedingAnimals* que nous avons montré dans la section 7.3.1 et dans la section 7.2.2.2 devient une action déclenchable lorsque ses pré-conditions sont vérifiées. La figure 7.14 illustre le déclenchement et l'exécution de cette action. Afin de déclencher cette action, l'agent-place *EnterpriseAgent* vérifie d'une part la quantité restante dans le stock de nourriture **stfood**, la quantité du stock **stanimals** (cette quantité permet d'informer s'il est nécessaire de nourrir le bétail) ainsi que l'heure indiquée par l'entité « horloge » qui doit correspondre aux heures de travail spécifiées. Lorsque ces conditions sont vérifiées, l'agent-place calcule la date de début de cette action et l'ajoute à sa liste d'actions déclenchables. L'action sera déclenchée par l'environnement dans la phase « On after step » au niveau des entités-environnementales. Il s'agit de mettre à jour l'état de l'action *FeedingAnimals* à 1 et la variable *actfeed* à vrai. Ceci permettra de vider le stock de nourriture (*stfood*) comme le montre le graphe des stocks sur la figure 7.14. L'action se termine lorsque l'état du stock **stanimals** atteint le seuil qui indique que le bétail a reçu la quantité de nourriture nécessaire. La fin de l'action consiste à mettre son état à 0, ainsi que mettre la variable *actFeed* à faux. Le graphe des stocks montre que le stock *stanimals* continue à évoluer même si l'action s'est terminée. En effet, *stanimals* se vide ce qui représente le processus de digestion des animaux.

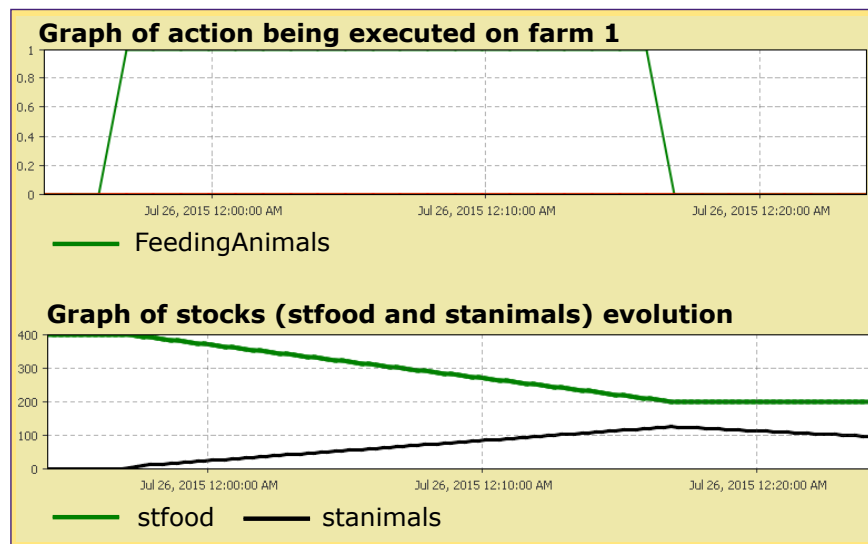


FIGURE 7.14 : exemple de réalisation de l'action « FeedingAnimals ». Nous remarquons sur cette figure que le stock *stfood* s'est vidé de 200 unités, tant dis que le stock *stanimals* s'est rempli de 120 unités. Ceci est dû à la consommation simultanée des animaux au cours du remplissage du stock *stanimals*.

7.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'implémentation du modèle ainsi que l'expérimentation sur des cas d'écoles. Dans l'implémentation proposée nous retrouvons les algorithmes de propagation et évaporation de traces proposés dans le modèle. Les mécanismes liés au modèle d'affordance ainsi qu'à l'action. L'affordance est détectée par un agent-place en se basant sur les capacités d'action et les actions pouvant être subies par les entités-environnementales situées sur sa place. L'action est également déclenchée et exécutée par un agent-place. Ce dernier se base seulement sur la perception de son environnement local. Nous avons implémenté dans ce prototype la dynamique interne de certaines entités par des modèles DS qui sont contrôlés par les actions des agents. Les modèles DS sont largement utilisés dans les systèmes agricoles, le but était de pouvoir réutiliser ces modèles et les intégrer dans notre système multi-agents.

Le système agricole utilisé comme exemple dans notre prototype est composé de deux exploitations constituées de 6952 places pilotées par 6952 agents, deux entités-environnementales représentant les agriculteurs et 12 entités-environnementales représentant les stocks, les moyens de transport....

Un système de taille réelle devrait pouvoir comporter plusieurs dizaines d'exploitations, une centaine d'agriculteur, et plusieurs centaines d'entités représentants les différents stocks, ressources... Une entité dans le monde réel (acteurs, ressources) est considérée comme une entité-environnementale dans notre modèle. La simulation d'un système réel nécessiterait donc d'implémenter les classes d'entités non encore considérées dans l'implémentation actuelle ainsi que tous les processus qui permettent de produire les effets des actions et ainsi produire des situations réalistes de déclenchement et de réalisation d'actions. La structure spatiale des exploitations et l'échelle de partitionnement de l'espace spécifie le nombre d'agents à intégrer dans la simulation. Par conséquent, au-delà des aspects relatifs aux performances de simulation que nous n'avons évidemment pas encore testées, nous pouvons dire que les cadres conceptuel de notre modèle et logiciel du prototype probatoire que nous avons implémenté nous paraissent adaptés à la simulation de systèmes agricoles de tailles réelles.

Chapitre 8

Conclusion générale

Avec les changements climatiques, l'évolution des politiques de gestion, les prix du marché et la volonté des agriculteurs d'améliorer leurs pratiques tout en respectant les contraintes imposées par les décideurs publics et l'environnement, il devient de plus en plus difficile d'avoir une vision claire de l'évolution des systèmes agricoles. Ceci est aussi vrai pour n'importe quel système et dans notre vie de tous les jours. Le monde actuel évolue rapidement, l'accès à l'information est de plus en plus facile grâce à internet. Ceci, nous amène à affronter dans notre quotidien diverses situations auxquelles nous devons nous adapter. Comment agit un acteur humain et quels sont les facteurs qui influencent son comportement fait encore débat au sein de différentes communautés scientifiques : psychologie, anthropologie, sociologie, sciences de la cognition, etc. Néanmoins, les théories de l'action et les travaux autour de cette question que nous avons présentés dans la première partie État de l'art (chapitre 1), nous ont permis de définir un ensemble de déterminants de l'action notamment le rôle important de la situation dans la détermination de l'action au niveau opérationnel. En partant de cette base théorique, nous avons montré en abordant les modèles existants autour de l'action dans le domaine agricole, la nécessité de reconsidérer la vision de l'action et de sa modélisation dans les systèmes de production agricoles (SPA), qui se base généralement sur les notions de décision et de planification. Ainsi, une conceptualisation plus appropriée de l'action au niveau opérationnel consiste à mettre l'accent sur l'émergence de l'action dans les situations construites par l'interaction entre l'acteur et son environnement.

Afin de proposer un modèle d'action située, nous nous sommes intéressés à deux concepts, le concept d'affordance et le concept de stigmergie dont nous avons montré les relations étroites et leurs apports bénéfiques à la représentation de l'action située. En effet, le concept d'affordance stipule que notre environnement nous dicte à tout instant un éventail d'actions possibles. Afin d'extraire ces possibilités d'actions, nous nous sommes

intéressés aux travaux sur le concept d'émergence. Le concept de stigmergie met en avant l'idée de nous coordonner avec les acteurs de notre environnement en utilisant des marques déposées dans l'environnement après nos actions. Nous avons donc proposé un modèle qui combine à la fois le concept d'affordance et le concept de stigmergie dans un système multiagents. La section suivante décrit nos contributions ainsi que les avantages du modèle que nous proposons. La section 8.2 décrira les limites de notre modèle ainsi que nos perspectives.

8.1 Publications réalisées pendant la thèse

Conférence internationale (avec actes et comité de lecture)

Z. Afoutni, R. Courdier and F. Guerrin, A Multiagent System To Model Human Action Based on the Concept of Affordance. In 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2014), 28-30 August, 2014 - Vienna, Austria, Full Paper, DOI : 10.5220/0005141606440651, pp. 644 - 651, 2014.

Z. Afoutni, R. Courdier and F. Guerrin, Modelling Situated Action based on Affordances and Stigmergy, Poster in 6th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO-2012), Lyon (France), September 10-14 2012.

Z. Afoutni, R. Courdier and F. Guerrin, A model to represent human activities in farming systems based on reactive situated agents. In 19th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2011), ISBN : 978-0-9872143-1-7, pp. 2901-2907, December 2011.

Z. Afoutni, R. Martin-Clouaire, R. Courdier, G. François, Coordination of activities : application of some concepts and formalizations to agricultural systems simulation, In The International Conference on Modeling and Applied Simulation (MAS 2010), October 13-15, Fes, Morocco, , pp. 25-31, 2010.

Conférence nationale (avec actes et comité de lecture)

Z. Afoutni, R. Courdier and F. Guerrin, Représentation de l'action humaine basée sur l'affordance vue comme propriété émergente du couple acteur/environnement, Présentation Longue, In Journées Francophones Systèmes Multi-Agents (JFSMA'14), Lorient-sur-Drôme, France, oct. 8-10, Rémy Courdier, Jean-Paul Jamont (Eds.), Cepa-dues Editions, ISBN 978.2.36493.154.1, pp. 129-138, 2014.

Z. Afoutni, R. Courdier and F. Guerrin, Modélisation de l'action située basée sur les affordances et la stigmergie, Journées Francophones Systèmes Multi-Agents (JFSMA'12), Honfleur, France, October 17-19, ed. Cepadues, ISBN 978.2.36493.037.7, pp. 17-19, 2012.

8.2 Contribution

Les travaux conduits dans cette thèse ont pour but de représenter l'action humaine le plus fidèlement possible à la réalité. Le but est de produire un cadre méthodologique de simulation de l'action humaine permettant de simuler les comportements adoptés par les acteurs dans les situations rencontrées sur le terrain et les conséquences de ces actions. Afin de répondre à cet objectif nous nous sommes positionnés dans une vision située de l'action.

Notre contribution concerne donc la modélisation de l'action située dans le cadre des systèmes multi-agents.

L'action dans les systèmes multi-agents est au cœur du cycle de vie de l'agent défini, selon son type, par deux ou, éventuellement, trois phases : Perception /« Délibération »/ Action. Cependant, bien que l'action fasse partie du cycle comportemental typique de l'agent, elle est généralement vue uniquement comme l'application du résultat de la seule phase de délibération. L'action elle-même et la modification de l'environnement qui s'ensuit sont considérées comme implicites. Par conséquent, les SMA actuels permettent de modéliser la phase de perception/délibération qui précède l'action et la conséquence de l'action en faisant l'hypothèse que l'action proprement dite sera forcément exécutée jusqu'à son terme.

Nous avons montré dans ce travail que l'action est un processus complexe qui possède une épaisseur temporelle et une dimension spatiale. Nous avons donc modélisé l'action comme un processus dynamique spatialisé, possédant des états évoluant dans le temps. L'influence d'une action sur l'état du système dépend de son évolution. Par exemple, considérons l'action de vidange d'un stock. Selon qu'elle se déroule et se termine normalement ou qu'elle est interrompue ou annulée, la quantité restante en stock après l'action ne sera pas la même. La situation créée suite à l'exécution d'une action peut donc varier selon l'état de l'action et influencera ainsi différemment le déroulement de la simulation. Nous avons implémenté notre modèle d'action en le couplant au sein d'un SMA avec différents modèles de DS. La couche SMA est responsable de la détermination de l'action à exécuter ainsi que de la gestion de son état tandis que les processus correspondant aux effets induits par ces actions sont implémentés par des DS. Ceci permet de mieux simuler la dynamique des SPA. Par exemple, l'action d'irrigation d'une parcelle, peut être représentée par un stock d'eau qu'un actuateur ouvre lorsque l'action d'irrigation

est déclenchée. L'action en elle-même a sa propre durée qui peut être différente de la durée effective de l'écoulement du flux d'eau dans la parcelle. En implémentant ceci par un DS, cela permet aux processus induits par l'action d'irrigation d'évoluer de façon continue et donc de refléter la réalité même si l'action d'irrigation en elle-même peut être déjà terminée.

L'action est donc induite par la situation construite par l'interaction entre l'acteur et son environnement. Pour cela, nous avons établi une architecture où nous avons inversé le rôle de l'acteur (du monde réel) et le rôle de la situation. L'acteur est vu comme une entité non autonome sous le contrôle de la situation. Celle-ci dicte l'action à l'acteur par le biais d'un agent abstrait qui observe l'interaction entre l'acteur, appelé dans notre modèle actuateur et les objets passifs de l'environnement. Alors une fois notre architecture établie, la question est de savoir comment l'agent identifie l'action à effectuer dans la situation qu'il observe. Pour cela nous avons exploité le concept d'affordance mais vu sous un angle différent de celui proposé jusqu'à présent et qui constitue une contribution originale dans la modélisation des affordances. Le concept d'affordance stipule que les possibilités d'action sont proposées par les objets de l'environnement à l'acteur. Cependant, comme nous l'avons montré dans la première partie État de l'art (chapitre 2), la question de savoir où se situe l'affordance au niveau du couple acteur/environnement a suscité un débat. La définition qui est la plus défendue est celle qui considère l'affordance comme une émergence du couple acteur/environnement. Les modèles d'affordances existants dans le contexte des SMA les considèrent comme étant portées par les objets de l'environnement. C'est le cas dans les travaux de [Cornwell *et al.*, 2003] et [Raubal, 2001a]. L'inconvénient principal concerne le nombre de relations (agent/objet) à évaluer pour déterminer les affordances qui peut augmenter considérablement en fonction du nombre d'agents et d'objets du système. Un agent doit être en mesure d'extraire l'affordance suscitée par tout objet présent dans son champ de perception. Plus le nombre d'objets augmente, plus l'agent doit être doté d'un nombre élevé de règles. Or, toutes les actions ne sont pas forcément possibles à tout instant et partout dans l'espace. Un agent peut donc porter des règles qui ne sont pas pertinentes pour identifier les affordances. Le modèle d'affordance que nous avons proposé considère l'affordance plutôt comme une propriété émergente du couple acteur/environnement. Pour cela nous avons proposé une représentation de l'environnement spatial ainsi qu'une modélisation d'affordance qui exploite les caractéristiques de l'espace en termes des possibilités d'action dans les différentes portions de l'espace. Nous avons proposé une représentation où l'espace est constitué d'un ensemble de places, tout en préservant les caractéristiques d'une représentation continue. En effet, une place ainsi que toute autre entité sont caractérisées par des coordonnées réelles. Chaque place est attribuée à un agent qui est responsable de la détection des affordances émergeant des interactions entre les entités

environnementales présentes. La particularité réside dans le fait que les règles nécessaires à l'identification des affordances ainsi que les percepts d'un agent sont fonction des actions possibles sur sa place. De ce fait, un agent a accès seulement aux percepts qui lui sont pertinents. De plus il détient un nombre limité de règles, car sa place ne lui permet qu'un nombre limité d'actions. Par conséquent, le nombre de relations entre agents et entités environnementales est réduit considérablement.

Une fois l'affordance détectée, elle constitue une nouvelle connaissance qui est matérialisée dans l'environnement par des artefacts. Ceci simule une sorte de mémoire portée par l'environnement. Les affordances matérialisées dans l'environnement par un agent peuvent être perçues et incluses dans le processus de sélection d'actions de ses voisins. Ceci, permet de construire un système où chaque agent est indépendant tout en se coordonnant avec les autres agents du système de façon indirecte par le biais de la stigmergie (dépôt et propagation dans l'environnement de marques porteuses de sens pour les agents).

Ces marques, grâce aux informations qu'elles portent et à leur propagation permettent de réguler le partage entre agents des entités nécessaires à l'action ainsi que l'ordre d'exécution des actions grâce aux priorités véhiculées par ces marques.

Les travaux conduits dans cette thèse ont donc permis de contribuer scientifiquement à la représentation de l'action située et à la modélisation des affordances dans les systèmes multi-agents situés.

8.3 Perspectives

Nous avons proposé durant cette thèse un modèle **conceptuel** de l'action. Ce modèle fournit une bonne base et offre l'opportunité de travaux futurs.

8.3.1 Perspective sur le plan modélisation

Afin de rendre notre modèle générique, nous envisageons de porter notre attention sur la formalisation des différents concepts proposés notamment d'unifier la représentation des faits portés par les entités-environnementales ainsi que les méta-connaissances nécessaires à la détection des affordances. Ceci, permettra de rendre le modèle générique et par conséquent réutilisable pour la simulation d'actions dans d'autres domaines d'application.

D'autres part, nous envisageons de porter une attention au développement d'une méthodologie de conception d'un modèle basé sur les concepts proposés. En effet, le

modèle proposé donne un cadre pseudo formel pour décrire un modèle des systèmes dont la dynamique est grandement influencée par les actions. Cependant, la construction même du modèle et la spécifications des différentes phases citées dans le chapitre 6, section 6.1 nécessite le développement d'une méthodologie de construction d'un tel modèle.

Par ailleurs, nous avons proposé dans cette thèse des mécanismes de coordination implicites. Les algorithmes de propagation de marques que nous avons proposés induisent une lourdeur de calcul. En effet, une marque déposée sur une place sera propagée sur toutes les places de l'environnement. Ceci mène à l'émergence d'un nombre élevé de chemins. Ceci n'est pas bénéfique dans le cas d'une simulation qui comporte plusieurs exploitations où chaque exploitation est constituée de plusieurs parcelles. Un nombre élevé d'agents est donc amené à effectuer de nombreux calculs inutiles. Une solution possible serait d'introduire un niveau supérieur d'agents coordinateurs où chaque agent serait responsable du pilotage d'un ensemble de places (et non pas d'une seule place comme dans le modèle actuel), par exemple l'ensemble des places d'une même parcelle de terrain. Afin de trouver un chemin entre deux places, le calcul se ferait en deux phases. La première phase consisterait à propager des marques sur des parcelles, afin de trouver un chemin qui relie celles où se situent les places recherchées. La deuxième phase consisterait alors à propager à l'échelle des places les marques uniquement sur les parcelles identifiées lors de la première phase de propagation. Ainsi, les mécanismes de coordination proposés ne répondent pas à toutes les situations possibles. Par exemple, la coordination entre un agriculteur et son fournisseur d'effluent peut se faire par le processus de négociation. Il serait intéressant donc de contribuer par un modèle de coordination qui combine à la fois un modèle de coordination explicite et un modèle de coordination implicite en fonction du besoin de la situation rencontrée.

8.3.2 Perspectives sur le plan applicatif

Nous nous sommes souciés dans le prototype proposé de montrer comment les différents concepts du modèle peuvent être implémentés ainsi que l'intérêt et la validité de ces concepts. Nous avons ainsi expérimenté notre modèle sur un ensemble de cas d'école.

L'implémentation actuelle constitue une bonne base pour le développement d'un outil permettant de simuler complètement et efficacement des systèmes d'action réels complexes. Nous envisageons particulièrement de traiter la question du couplage de systèmes basés sur différentes approches de modélisation. Apporter une solution à cette question permet ainsi plus de liberté aux modélisateurs d'utiliser l'approche de modélisation qui convient à leurs problématiques et de réutiliser des modèles déjà existants. Nous avons fait un premier travail en combinant dans notre implémentation un système multi-agents

avec des modèles basés sur la dynamique des systèmes. Ce travail s'avère prometteur et mériterait d'être approfondi.

Bibliographie

- Z. AFOUTNI, R. COURDIER et F. GUERRIN : Représentation de l'action humaine basée sur l'affordance vue comme une propriété émergente du couple acteur/environnement. *In Principe de Parcimonie - JFSMA 14 - Vingt-deuxièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 129–138, 2014.
- Z. AFOUTNI, F. GUERRIN et R. COURDIER : Modelling situated action based on affordances and stigmergy. *In Sixth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO 2012*, pages 175–180, 2012.
- P. E. AGRE : *Computation and Human Experience*. Cambridge University Press, New York, USA, 1997.
- P. E. AGRE et D. CHAPMAN : Pengi : an implementation of a theory of activity. *In Proceedings of the sixth National conference on Artificial intelligence*, pages 268–272. AAAI Press, 1987.
- J. F. ALLEN : An interval-based representation of temporal knowledge. *In Proceedings of the seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 221–226. Morgan Kaufmann, 1981.
- J. F. ALLEN : Towards a general theory of action and time. *Artificial intelligence*, 23(2):123–154, 1984.
- F. ANDRIAMASINORO et R. COURDIER : Integration of generic motivations in social hybrid agents. *In Regulated Agent-Based Social Systems*, pages 281–300. Springer, 2004.
- ANYLOGIC : Anylogic. [http://http://www.anylogic.com](http://www.anylogic.com), 2000.
- O. BALCI : The implementation of four conceptual frameworks for simulation modeling in high level languages. *In Proceedings of the 20th Conference on Winter Simulation*, pages 287–295. ACM Press, 1988.

- S. BANDINI, S. MANZONI et C. SIMONE : Dealing with space in multi-agent systems : a model for situated MAS. *In Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems : part 3*, pages 1183–1190. ACM, 2002.
- S. BANDINI, S. MANZONI et G. VIZZARI : Multi-agent approach to localization problems : The case of multilayered multi-agent situated system. *Web Intelligence and Agent Systems*, 2(3):155–166, 2004.
- S. BANDINI, S. MANZONI et G. VIZZARI : A spatially dependent communication model for ubiquitous systems. *In Environments for Multi-Agent Systems*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 74–90. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- J. E. BARDRAM : Plans as situated action : an activity theory approach to workflow systems. *In Proceedings of the fifth conference on European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, pages 17–32. Kluwer Academic, 1997.
- O. BOISSIER, S. GITTON, P. GLIZE *et al.* : Caractéristiques des systèmes et des applications. *Systèmes multi-agents/Observatoire français des techniques avancées, ARAGO 29*, 2004.
- G. BOURGUIN : *Un support informatique à l'activité coopérative fondé sur la Théorie de l'Activité : le projet DARE*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000.
- F. BOUSQUET, I. BAKAM, H. PROTON et C. Le PAGE : Cormas : Common-pool resources and multi-agent systems. *In Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, volume 1416, pages 826–837. Springer-verlag, 1998.
- R. A. BROOKS : Intelligence without reason. *In Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 569–595, Sydney, Australia, 1991a. Morgan Kaufmann.
- R. A. BROOKS : Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, 47(1):139–159, 1991b.
- R. A. BROOKS et J. H. CONNELL : Asynchronous distributed control system for a mobile robot. *In Proceedings of SPIE's Cambridge Symposium on Optical and Optoelectronic Engineering*, pages 77–84, 1986.
- S. BRÜCKNER : *Return from the Ant*. Thèse de doctorat, Humboldt University, 2000.
- A. CHERO : What we perceive when we perceive affordances : Commentary on Michaels (2000) "information, perception, and action". *Ecological Psychology*, 13(2): 111–116, 2001.

- A. CHEMERO : An outline of a theory of affordances. *Ecological psychology*, 15(2):181–195, 2003.
- W. J. CLANCEY : *Situated Cognition : On Human Knowledge and Computer Representations*. Cambridge University Press, New York, USA, 1997.
- W. J. CLANCEY : Simulating activities : Relating motives, deliberation, and attentive coordination. *Cognitive Systems Research*, 3(3):471–499, 2002.
- N. COLLIER : Repast : An extensible framework for agent simulation. *Natural Resources and Environmental*, 8(4), 2001.
- D. D. CORKILL : Blackboard systems. *AI Expert*, 6(9):40–47, 1991.
- J.B. CORNWELL, K. O'BRIEN, B.G. SILVERMAN et J.A. TOTH : Affordance theory for improving the rapid generation, composability, and reusability of synthetic agents and objects. *In Proceedings of the 12th Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation*, 2003.
- R. COURDIER, F. GUERRIN, F. ANDRIAMASINORO et J. M. PAILLAT : Agent-based simulation of complex systems : application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(3), 2002.
- M. J. CROS, M. DURU, F. GARCIA et R. MARTIN-CLOUAIRE : Simulating rotational grazing management. *Environment International*, 27(2):139–145, 2001.
- M. J. CROS, M. DURU, F. GARCIA et R. MARTIN-CLOUAIRE : Simulating management strategies : the rotational grazing example. *Agricultural Systems*, 80(1):23–42, 2004.
- D. DAVID : *Prospective Territoriale par Simulation Orientee Agent*. Thèse de doctorat, Université de La Reunion, 2010.
- D. DAVID et R. COURDIER : See emergence as a metaknowledge - a way to reify emergent phenomena in multiagent simulations ? *In Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART)*, pages 564–569, 2009.
- D. DAVID, D. PAYET, A. BOTTA, G. LAJOIE, S. MANGLOU et R. COURDIER : Un couplage de dynamiques comportementales : le modèle DS pour l'aménagement du territoire. *In Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 129–138. Cepadues Editions, 2007.
- R. DAVIS et R. G. SMITH : Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. *In Communication in Multiagent Systems*, pages 51–97. Springer, 2003.
- Y. DEMAZEAU : From interactions to collective behaviour in agent-based systems. *In Proceedings European Conference on Cognitive Science*, pages 117–132, 1995.

- J. L. DENEUBOURG : Application de l'ordre par fluctuations à la description de certaines étapes de la construction du nid chez les termites. *Insectes Sociaux*, 24(2):117–130, 1977.
- J.L. DENEUBOURG, S. ARON, S. GOSS et J. M. PASTEELS : The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of insect behavior*, 3(2):159–168, 1990.
- J.L. DENEUBOURG et S. GOSS : Collective patterns and decision-making. *Ethology Ecology & Evolution*, 1(4):295–311, 1989.
- M. D'INVERNO, D. KINNY, M. LUCK et M. WOOLDRIDGE : A formal specification of dMARS. In *Intelligent Agents IV Agent Theories, Architectures, and Languages*, pages 155–176. Springer-Verlag, 1997.
- M. D'INVERNO et M. LUCK : Understanding agent systems. *Springer-Verlag*, 2001.
- M. DORIGO, E. BONABEAU et G. THERAULAZ : Ant algorithms and stigmergy. *Future Generation Computer Systems*, 16(8):851–871, 2000.
- M. DORIGO et L. M. GAMBARDELLA : A study of some properties of Ant-Q. In *Parallel Problem Solving from Nature*, volume 1141, pages 656–665. Springer, 1996.
- M. DORIGO et L. M. GAMBARDELLA : Ant colonies for the travelling salesman problem. *BioSystems*, 43(2):73–81, 1997.
- M. DORIGO, V. MANIEZZO et A. COLORNI : Ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 26(1):29–41, 1996.
- H.L. DREYFUS : *What computers can't do : a critique of artificial reason*. Harper & Row, 1972.
- A. DROGOUL : *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1993.
- E. H. DURFEE et V. R. LESSER : Partial global planning : A coordination framework for distributed hypothesis formation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(5):1167–1183, 1991.
- Y. ENGSTRÖM : Activity theory and individual and social transformation. In *Perspectives on activity theory*, pages 19–38. Cambridge University Press, 1999a.
- Y. ENGSTRÖM : *Perspectives on Activity Theory*, chapitre Activity theory and individual and social transformation, pages 19–38. Cambridge University Press, 1999b.

- O. ETZIONI et D. WELD : A softbot-based interface to the internet. *Communications of the ACM*, 37(7):72–76, 1994.
- J. FERBER : *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris, France, 1995.
- J. FERBER et J. P. MÜLLER : Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems*, pages 72—79, 1996.
- E. FIANYO, J.P. TREUIL, E. PERRIER et Y. DEMAZEAU : Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes : the representation of time. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1534, pages 226–236. Springer-Verlag, 1998.
- R. E. FIKES et N. J. NILSSON : Strips : A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3):189–208, 1972.
- F. GARCIA : *Autour de l'action planifiée en environnement incertain*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
- M. GARDNER : Mathematical games : The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223(4):120–123, 1970.
- D. GELERTER : Generative communication in Linda. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 7(1):80–112, 1985.
- M. P. GEORGEFF : Communication and interaction in multi-agent planning. In *Distributed Artificial Intelligence*, pages 200–204. Morgan Kaufmann, 1988.
- M. P. GEORGEFF et A. L. LANSKY : Procedural knowledge. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 74(10):1383–1398, 1986.
- M. GHALLAB, D. NAU et P. TRAVERSO : *Automated Planning : Theory & Practice*. Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 2004.
- J. J. GIBSON : *The theory of affordances*. Lawrence Erlbaum and Associates, New Jersey, USA, 1977.
- J. J. GIBSON : *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, USA, 1986.
- P. P. GRASSÉ : La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *etcubitermes* sp. la théorie de la stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes sociaux*, 6(1):41–80, 1959.

- A. GRIGNARD, P. TAILLANDIER, B. GAUDOU, D. A. VO, N. Q. HUYNH et A. DROGOUL : Gama 1.6 : Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation. In *PRIMA 2013 : Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 117–131. Springer, 2013.
- F. GUERRIN : Magma : A simulation model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and electronics in agriculture*, 33(1):35–54, 2001.
- F. GUERRIN : Simulation of stock control policies in a two-stage production system : Application to pig slurry management involving multiple farms. *Computers and electronics in agriculture*, 45(1):27–50, 2004.
- F. GUERRIN : *Représentation des connaissances pour la décision et l'action*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 2007.
- F. GUERRIN : Modelling agricultural production systems using an action-flow-stock ontology. In *Int. Workshop on Modelling and Applied Simulation, Amantea, Italy*, pages 17–19, 2008.
- F. GUERRIN : Dynamic simulation of action at operations level. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 18(1):156–185, 2009.
- HADELI, P. VALCKENAERS, Ma. KOLLINGBAUM et H. Van BRUSSEL : Multi-agent coordination and control using stigmergy. *Computers in Industry*, 53(1):75 – 96, 2004.
- A. HELLEBOUGH, G. VIZZARI, A. UHRMACHER et F. MICHEL : Modeling dynamic environments in multi-agent simulation. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1):87–116, 2007.
- N. R. JENNINGS : Coordination techniques for distributed artificial intelligence. *Foundations of distributed artificial intelligence*, pages 187–210, 1996.
- N. R. JENNINGS, P. FARATIN, A. R. LOMUSCIO, S. PARSONS, M. J. WOOLDRIDGE et C. SIERRA : Automated negotiation : prospects, methods and challenges. *Journal of Group Decision and Negotiation*, 10(2):199–215, 2001.
- N. R. JENNINGS, K. SYCARA et M. WOOLDRIDGE : A roadmap of agent research and development. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1(1):7–38, 1998.
- R. B. JOHNSTON : *The problem with planning : the significance of theories of activity for operations management*. Thèse de doctorat, School of Business Systems Monash University, 1998.
- K. S. JONES : What is an affordance ? *Ecological psychology*, 15(2):107–114, 2003.

- B. A. KEATING et R. L. MCCOWN : Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70(2):555–579, 2001.
- K. KOFFKA : *Principles of Gestalt psychology*. Harcourt, Brace, 1935.
- F. KSONTINI : *Modèle d'agent fondé sur les affordances : application à la simulation de trafic routier*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.
- Y. KUBERA : *Simulations orientées interaction des systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université Lille 1, 2010.
- Y. KUBERA, P. MATHIEU et S. PICAULT : Everything can be agent! In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pages 1547–1548. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010.
- Y. KUBERA, P. MATHIEU et S. PICAULT : Ioda : An interaction-oriented approach for multi-agent based simulations. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 23(3):303–343, 2011.
- K. KUUTTI : Context and consciousness. chapitre Activity theory as a potential framework for human-computer interaction research, pages 17–44. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1995.
- J. LAVE : *Cognition in Practice : Mind, Mathematics and Culture in Everyday Life*. Cambridge University Press, New York, USA, 1988.
- A. N. LEONT'EV : Activity and consciousness. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.*, 1978.
- P. LIVET : *Qu'est-Ce Qu'une Action ?* Librairie Philosophique J. Vrin, 2005.
- M. LUYAT et T. REGIA-CORTE : Les affordances : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. *Année psychologique*, 109(2):297, 2009.
- P. MAES : Situated agents can have goals. *Robotics and autonomous systems*, 6(1):49–70, 1990.
- C. MALCOLM et T. SMITHERS : Symbol grounding via a hybrid architecture in an autonomous assembly system. *Robotics and Autonomous Systems*, 6(1):123–144, 1990.
- T. W. MALONE et K. CROWSTON : What is coordination theory and how can it help design cooperative work systems? In *Proceedings of the 1990 ACM conference on Computer-supported cooperative work*, pages 357–370. ACM, 1990.

- T. W. MALONE et K. CROWSTON : The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1):87–119, 1994.
- G. MARTIN, M. DURU, R. MARTIN-CLOUAIRE, J.P. RELIER, J.P. THEAU, O. THÉRON et L. HOSSARD : Towards a simulation-based study of grassland and animal diversity management in livestock farming systems. *Proc. iEMSs2008*, pages 783–791, 2008.
- R. MARTIN-CLOUAIRE et J. P. RELIER : Modelling and simulating work practices in agriculture. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1):42–53, 2009.
- J. MCCARTHY et P. J. HAYES : Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In *Machine Intelligence*, pages 463–502. Edinburgh University Press, 1969.
- D. MEIGNAN, O. SIMONIN et A. KOUKAM : Simulation and evaluation of urban bus-networks using a multiagent approach. *International Journal of Simulation, Modeling, Practice and Theory (SIMPAT)*, 15(6):659–671, 2007.
- F. MICHEL : *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2004.
- G.A. MILLER : *Plans and the structure of behavior*. Henry Holt and company, 1960.
- D. MORLEY et K. MYERS : The spark agent framework. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AA-MAS)*, pages 714–721. IEEE Computer Society, 2004.
- J.P. MÜLLER : A conceptual model for agent interaction. In S. M. DEEN, éditeur : *Proceedings of the Second International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems(CKBS-94)*, pages 213–234, DAKE Centre, University of Keele, UK, 1994.
- B. A. NARDI : Context and consciousness. chapitre Studying context : a comparison of activity theory, situated action models, and distributed cognition, pages 69–102. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1995.
- A. NEWELL et H. A. SIMON : *Computers and Thought*, chapitre GPS, A program that simulates human thought, pages 279–293. AAAI Press, 1963.
- D. A. NORMAN : Cognition in the head and in the world : An introduction to the special issue on situated action. *Cognitive Science*, 17(1):1–6, 1993.
- J. J. ODELL, H. V. D. PARUNAK, M. FLEISCHER et S. BRÜCKNER : Modeling agents and their environment. In *Agent-oriented software engineering III*, pages 16–31. Springer Berlin Heidelberg, 2003.

- A. OMICINI, A. RICCI, M. VIROLI, C. CASTELFRANCHI et L. TUMMOLINI : Coordination artifacts : Environment-based coordination for intelligent agents. *In Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pages 286–293. IEEE Computer Society, 2004.
- M. PAPASIMEON : *Modelling agent-environment interaction in multi-agent simulations with affordances*. Thèse de doctorat, The University of Melbourne, 2009.
- H. V. D. PARUNAK : A survey of environments and mechanisms for human-human stigmergy. *In Proceedings of the 2Nd International Conference on Environments for Multi-Agent Systems*, pages 163–186. Springer-Verlag, 2006.
- H. V. D. PARUNAK, H. S. BRÜCKNER et J. SAUTER : Digital pheromones for coordination of unmanned vehicles. *Environments for Multi-Agent Systems*, pages 246–263, 2005.
- D. PAYET, R. COURDIER, T. RALAMBONDRAINY et N. SÉBASTIEN : Le modèle à temporalité : pour un équilibre entre adéquation et optimisation du temps dans les simulations agent. *In Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 63–76, 2006.
- M. A. PEOT et D. E. SMITH : Conditional nonlinear planning. *In Proceedings of the first international conference on Artificial intelligence planning systems*, pages 189–197. Morgan Kaufmann, 1992.
- L. QUÉRÉ : La situation toujours négligée ? *Réseaux*, 15(85):163–192, 1997.
- A. S. RAO et M. P. GEORGEFF : BDI agents : From theory to practice. *In proceedings of the first International Conference on Multi-Agent Systems*, pages 312–319, 1995.
- M. RAUBAL : *Agent-based Simulation of Human Wayfinding : A Perceptual Model for Unfamiliar Buildings*. Thèse de doctorat, Vienna University of Technology, 2001a.
- M. RAUBAL : Ontology and epistemology for agent-based wayfinding simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(7):653–665, 2001b.
- M. RAUBAL et R. MORATZ : A functional model for affordance-based agents. *In Towards Affordance-Based Robot Control*, pages 91–105. Springer-Verlag, 2008.
- A. RICCI, M. VIROLI et A. OMICINI : Programming MAS with artifacts. *In Programming multi-agent systems*, pages 206–221. Springer-Verlag, 2006.
- P. RICHARDS : *Agriculture as a performance*, pages 39–43. Intermediate Technology Publications, London, farmer first : farmer innovation and agricultural research édition, 1989.

- S. J. RUSSELL et P. NORVIG : *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Pearson Education, 2 édition, 2003.
- E. D. SACERDOTI : Planning in a hierarchy of abstraction spaces. *Artificial intelligence*, 5(2):115–135, 1974.
- E. SAHIN, M. ÇAKMAK, M. R. DOGAR, E. UGUR et G. UCOLUK : To afford or not to afford : A new formalization of affordances toward affordance-based robot control. *Adaptive Behavior*, 15(4):447–472, 2007.
- K. SCHMIDT et C. SIMONE : Coordination mechanisms : Towards a conceptual foundation of cscw systems design. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 5(2-3):155–200, 1996.
- M. J. SCHOPPERS : Universal plans for reactive robots in unpredictable environments. *In Proceedings of the 10th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI)*, pages 1039–1046. Morgan Kaufmann, 1987.
- P. SEQUEIRA, M. VALA et A. PAIVA : What can i do with this ? : finding possible interactions between characters and objects. *In Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–7. ACM, 2007.
- R. SHAW : The agent-environment interface : Simon’s indirect or Gibson’s direct coupling ? *Ecological Psychology*, 15(1):37–106, 2003.
- M. SIERHUIS, W. J. CLANCEY et R. J.J. Van HOOFF : Brahms : a multi-agent modelling environment for simulating work processes and practices. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 3(3):134–152, 2007.
- H. A. SIMON : *Les sciences de l’artificiel*. Collection Folio/essais. Gallimard, 2004.
- R. G. SMITH : The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 100(12):1104–1113, 1980.
- V. O. SNOW et S. J. LOVATT : A general planner for agro-ecosystem models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(2):201–211, 2008.
- T. A. STOFFREGEN : Affordances as properties of the animal-environment system. *Ecological Psychology*, 15(2):115–134, 2003.
- L. SUCHMAN : Writing and reading : A response to comments on plans and situated actions. *The Journal of the Learning Sciences*, 12(2):299–306, 2003.

- L. A. SUCHMAN : *Plans and situated actions : the problem of human-machine communication*. Cambridge University Press, New York, USA, 1987.
- G. THERAULAZ et E. BONABEAU : A brief history of stigmergy. *Artificial life*, 5(2):97–116, 1999.
- M. D. TRAVERS : *Programming with Agents*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- M. T. TURVEY : Affordances and prospective control : An outline of the ontology. *Ecological psychology*, 4(3):173–187, 1992.
- P. VALCKENAERS, M. KOLLINGBAUM et H. Van BRUSSEL : Multi-agent coordination and control using stigmergy. *Computers in Industry*, 53(1):75–96, 2004.
- J. VAYSSIÈRES, F. GUERRIN, J. M. PAILLAT et P. LECOMTE : Gamede : A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises part I –Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems*, 101(3):128–138, 2009.
- J. VAYSSIÈRES, P. LECOMTE, F. GUERRIN et U. B. NIDUMOLU : Modelling farmers’ action : decision rules capture methodology and formalisation structure : a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island. *Animal*, 1(05):716–733, 2007.
- M. VIEZZER et C. NIEYWENHUIS : Learning affordance concepts : some seminal ideas. *In In In Proceedings of the Workshop on Modeling Natural Action Selection at the 2005 International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Edinburgh University Press, 2005.
- L.S. VYGOTSKY : *Mind in society*. Transcribed by : Andy Blunden and Nate Schmolze. Cambridge, MA : Havard University Press, 1930.
- D. H. D. WARREN : Generating conditional plans and programs. *In 12th Proceedings of the Summer Conference on Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour*, page 344–354. Edinburgh University Press, 1996.
- D. WEYNS, A. OMICINI et J. ODELL : Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1):5–30, 2007.
- D. WEYNS, H. V. D. PARUNAK, F. MICHEL, T. HOLVOET et J. FERBER : Environments for multiagent systems state-of-the-art and research challenges. *In Proceedings of the First international conference on Environments for Multi-Agent Systems*, pages 1–47. Springer-Verlag, 2005.

- U. WILENSKY : Netlogo. Rapport technique, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999. URL <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- T. De WOLF et T. HOLVOET : Emergence versus self-organisation : Different concepts but promising when combined. *In Engineering self-organising systems*, pages 1–15. Springer, 2005.
- J. WOODCOCK et J. DAVIES : *Using Z : specification, refinement, and proof*. Prentice-Hall, Inc., 1996.
- M. WOOLDRIDGE : *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*, chapitre Intelligent Agents, pages 27–73. MIT Press, 1 édition, 1999.