

SIMULATION MULTI-AGENTS DE MODÈLES  
ÉCONOMIQUES  
Vers des systèmes multi-agents adaptatifs

THESE

présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2005

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardennes

(Spécialité : Informatique)

par

**Lilia REJEB**

**Composition du jury :**

<b>M. Jacques FERBER</b>	Professeur, université de Montpellier II	Rapporteur
<b>M. René MANDIAU</b>	Professeur, université de Valenciennes	Rapporteur
<b>M. Jean-François PERROT</b>	Professeur émérite, université de Paris VI	Président
<b>M. Geber RAMALHO</b>	Professeur à l'Université "Universidade Federal de Pernambuco", Brésil	Examineur
<b>Mme Zahia GUESSOUM</b>	Maître de conférence, Université de Reims	Directrice de thèse
<b>M. Herman AKDAG</b>	Professeur, Université de Reims	Co-directeur
<b>M. Rodolphe DURAND</b>	Professeur, groupe HEC	Invité



*A la mémoire de ma grande-mère,  
À mes parents sans qui ce projet n'aurais pu voir le jour ni  
être achevé,  
A ma fille Molka qui a pu malgré son jeune âge accepter  
notre séparation pendant les années de thèse,  
A Hichem qui a su être patient,  
A Sami, Zahra et Elias,  
Aux personnes qui me sont chères.*



# REMERCIEMENTS

Je tiens vivement à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail en particulier mes directeurs de thèse Zahia Guessoum et Herman Akdag.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers ma directrice de thèse Zahia Guessoum pour la qualité de ses conseils, sa disponibilité ainsi que le degré de responsabilisation de son encadrement qui m'ont permis de développer mon goût pour la recherche.

Je remercie également Herman Akdag pour avoir facilité mon inscription en thèse et pour son aide.

Je suis profondément reconnaissante à Rodolphe Durand pour le temps qu'il a investi pour suivre et analyser les résultats de ce travail ainsi que pour les nombreuses discussions enrichissantes.

Je tiens à remercier mes deux rapporteurs Jacques Ferber et René Mandiau pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de le juger, pour le temps qu'ils ont consacré pour la lecture de ce mémoire.

Je remercie également Jean-François Perrot de m'avoir honorée en acceptant de présider le jury et Geber Ramalho pour avoir examiné la thèse.

Je tiens à remercier Yannick Rémy pour m'avoir accueillie au sein de l'équipe MO-DECO. Je tiens à remercier aussi le directeur du LIP6 pour m'avoir accueillie durant ces années de thèse. Je remercie également tous les membres du groupe Framework et toutes les personnes du POLEIA qui m'ont aidée durant ces années de thèse.

Je tiens à manifester toute mon affection et mon amitié à :

- Amel Bouaïssi pour son soutien permanent, son encouragement et ses conseils et pour m'avoir aidée à trouver un sujet de thèse.
- Rym M'hallah pour ses conseils et pour le temps qu'elle m'a consacré à la lecture de la thèse et la révision des articles.
- Amel Bouziri pour son soutien et ses encouragements,
- Salima Chantit pour son amitié, pour sa disponibilité et pour les agréables moments qu'on a passé ensemble au bureau.
- Nora Faci & Tarek Jarraya pour leur aide précieuse, leur soutien et pour m'avoir facilité les procédures de dépôt et de soutenance de la thèse.
- David Julien pour avoir lu les premières versions de cette thèse.
- Insaf ben Amor pour son soutien et pour avoir accepté de relire la thèse.
- Raouia et Jean-Luc pour m'avoir accueillie et soutenue.

Je remercie enfin mes parents qui m'ont TOUT donné. Je remercie aussi Molka et Hichem pour leur patience et leur amour.



# RÉSUMÉ

Les théories économiques apparues suite aux travaux de Simon ont pour préoccupation majeure la compréhension de la relation continue et réciproque entre la firme et le marché. Ces théories considèrent que les firmes ont une rationalité limitée et que les marchés sont dynamiques, hétérogènes, ouverts et caractérisés par une forte compétition. Deux principales approches ont été clairement identifiées : l'écologie organisationnelle et le management stratégique. Elles étudient séparément les deux principaux problèmes de sélection et d'adaptation. La sélection matérialisée par l'intégration des formes organisationnelles n'est ainsi pas utilisée pour expliquer ou pour être expliquée en fonction de l'adaptation des firmes. De récentes réflexions s'orientent vers l'unification des deux approches. Elles soulignent l'intérêt d'étudier à la fois le processus écologique et le processus stratégique ainsi que leurs interactions. Cependant, aucun modèle, à notre connaissance, n'a encore été proposé pour étudier simultanément les deux problèmes jusque-là abordés indépendamment. Ceci est notamment dû à la complexité des systèmes économiques. L'étude de ces systèmes nécessite la modélisation des deux populations (firmes et formes organisationnelles), la dynamique de chacune de ces populations ainsi que l'étude du rapport dynamique entre elles.

Le but de cette thèse est de palier cette lacune en suggérant un modèle qui intègre les deux niveaux firmes et formes organisationnelles. Notre solution est basée sur l'utilisation des systèmes multi-agents adaptatifs. Nous avons donc montré que les systèmes multi-agents adaptatifs permettent d'étudier les deux problèmes (adaptation et sélection) simultanément et que l'adaptation ne se limite pas aux agents mais est aussi présente au niveau macro défini par les formes organisationnelles.

Nous avons donc défini un modèle de firmes basées sur la théorie des ressources. Ce modèle est simple mais reflète les caractéristiques importantes des firmes. La première partie de la thèse a permis de montrer l'intérêt des agents adaptatifs pour modéliser les firmes et les limites des modèles qui représentent les firmes sans considérer les formes organisationnelles. Elle nous a permis aussi de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation des techniques d'apprentissages dans un contexte multi-agents et les problèmes qu'il posent tel que celui de l'exploration-exploitation. La deuxième partie correspond à la modélisation des formes organisationnelles et leurs relations avec les firmes. Ceci dans le but de vérifier qu'il existe une boucle où toute variation au niveau des structures organisationnelles représentées par les formes organisationnelles est interprétée par les firmes pour leur adaptation et où l'adaptation des firmes engendre des variations au niveau des formes organisationnelles.

**Mots clés** : Adaptation, Apprentissage, Simulation de modèles économiques, Systèmes multi-agents adaptatifs, Firmes et Formes organisationnelles.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	1
1.2 Problématique . . . . .	2
1.3 Une approche de modélisation par les systèmes multi-agents adaptatifs . .	3
1.4 Organisation de la thèse . . . . .	4
<b>I Etat de l’art</b>	<b>7</b>
<b>2 Les systèmes économiques</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction . . . . .	9
2.2 Evolution des systèmes économiques . . . . .	10
2.2.1 La théorie orthodoxe . . . . .	10
2.2.2 Révolution dans la pensée économique . . . . .	11
2.2.2.1 La rationalité limitée . . . . .	12
2.2.2.2 la notion de « satisfying » ou satisfaction . . . . .	13
2.2.2.3 Les marchés dynamiques . . . . .	13

2.2.3	Conséquence des travaux de Simon . . . . .	15
2.3	Les nouvelles théories économiques . . . . .	15
2.3.1	Définition de l'économie évolutionniste . . . . .	16
2.3.2	Historique de l'économie évolutionniste . . . . .	16
2.3.3	Co-évolution entre la firme et le marché . . . . .	17
2.3.4	L'adaptation . . . . .	18
2.3.5	Les formes organisationnelles . . . . .	19
2.3.6	La sélection . . . . .	20
2.4	Les approches de modélisation des systèmes économiques . . . . .	21
2.4.1	La simulation stochastique ou numérique . . . . .	22
2.4.2	La simulation multi-agents . . . . .	23
2.4.2.1	Caractéristiques de la simulation multi-agents . . . . .	24
2.4.2.2	Intérêt de la simulation multi-agents pour les systèmes économiques . . . . .	24
2.5	Simulations multi-agents des systèmes économiques . . . . .	26
2.5.1	Les marchés simulés . . . . .	26
2.5.2	La sélection et l'adaptation . . . . .	27
2.5.3	Les formes organisationnelles . . . . .	28
2.6	Conclusion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Les agents adaptatifs</b>	<b>31</b>
3.1	Introduction . . . . .	31
3.2	Définitions . . . . .	32
3.3	Les types d'adaptation . . . . .	33

3.4	L'apprentissage dans les systèmes multi-agents . . . . .	34
3.5	Les modèles d'apprentissage . . . . .	34
3.5.1	L'apprentissage conscient et l'apprentissage inconscient . . . . .	35
3.5.2	Les modèles d'apprentissage des croyances . . . . .	35
3.6	Les techniques d'apprentissage et d'évolution et leur utilisation en économie	36
3.6.1	Les algorithmes génétiques . . . . .	37
3.6.2	Les réseaux de neurones . . . . .	38
3.6.3	L'algorithme Q-Learning . . . . .	39
3.6.4	Les systèmes de classeurs . . . . .	40
3.7	Discussion . . . . .	42
3.8	Les différents types de systèmes de classeurs . . . . .	43
3.8.1	Le LCS de Holland . . . . .	43
3.8.2	ZCS . . . . .	44
3.8.3	XCS . . . . .	44
3.8.4	ACS . . . . .	44
3.9	Conclusion . . . . .	45
<b>II</b>	<b>Modélisation</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>Les firmes</b>	<b>49</b>
4.1	Introduction . . . . .	49
4.2	L'approche à base de compétences . . . . .	50
4.3	La théorie de la firme basée sur les ressources . . . . .	50
4.3.1	Hypothèses de la théorie basée sur les ressources . . . . .	50

4.3.2	La firme selon la théorie basée sur les ressources . . . . .	51
4.4	MORE : un MODèle de firme basé sur les REssources . . . . .	53
4.4.1	Caractéristiques d'une firme . . . . .	53
4.4.2	Le modèle de Lisrel . . . . .	55
4.4.3	Comportement d'une firme . . . . .	56
4.5	Conclusion . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Les firmes adaptatives</b>	<b>59</b>
5.1	Introduction . . . . .	59
5.2	Présentation de XCS . . . . .	60
5.2.1	La représentation des classeurs . . . . .	60
5.2.2	Evolution des classeurs . . . . .	61
5.2.3	Fonctionnement de XCS . . . . .	62
5.3	Firmes basées sur XCS . . . . .	64
5.3.1	Contexte . . . . .	65
5.3.1.1	Définition du contexte . . . . .	65
5.3.1.2	Codage . . . . .	66
5.3.2	Le processus de décision de la firme . . . . .	67
5.3.3	Les paramètres de XCS pour les firmes . . . . .	68
5.4	Conclusion . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Le dilemme exploration/exploitation</b>	<b>71</b>
6.1	Introduction . . . . .	71
6.2	L'exploration . . . . .	73

6.2.1	Les techniques d'exploration . . . . .	73
6.2.2	L'exploration sans but . . . . .	73
6.2.3	L'exploration dirigée . . . . .	75
6.2.4	l'exploration dirigée dans XCS . . . . .	76
6.3	Le compromis entre exploration et exploitation . . . . .	76
6.3.1	Les méthodes utilisées dans un contexte multi-agents . . . . .	77
6.3.2	Les autres techniques . . . . .	77
6.4	Les techniques proposées . . . . .	78
6.4.1	Adaptation des techniques de Wilson . . . . .	79
6.4.1.1	Technique locale . . . . .	79
6.4.1.2	Technique globale . . . . .	80
6.4.1.3	Discussion . . . . .	81
6.4.2	Les méta-règles . . . . .	82
6.4.2.1	Stratégie basée sur la variation de la période d'exploitation	82
6.4.2.2	Stratégie basée sur la variation de la période d'exploita- tion et de la période d'exploration . . . . .	83
6.5	Conclusion . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Les formes organisationnelles</b>	<b>85</b>
7.1	Introduction . . . . .	85
7.2	Définition des formes organisationnelles . . . . .	86
7.3	Exemples de formes organisationnelles . . . . .	87
7.3.1	Les librairies . . . . .	87
7.3.2	Les unités hospitalières . . . . .	88

7.4	Modèles de formes organisationnelles . . . . .	88
7.5	Notre modélisation des formes organisationnelles . . . . .	89
7.6	Influences mutuelles des firmes et formes organisationnelles . . . . .	91
7.6.1	Relations entre firmes et formes organisationnelles . . . . .	93
7.6.2	Influence de la dynamique des formes organisationnelles sur les firmes	95
7.6.3	L'apparition de nouvelles formes organisationnelles . . . . .	96
7.7	Conclusion . . . . .	98
<b>III MOVECO</b>		<b>99</b>
<b>8</b>	<b>Implémentation et expérimentations</b>	<b>101</b>
8.1	introduction . . . . .	101
8.2	Contexte technique . . . . .	101
8.2.1	La plate-forme DIMA . . . . .	102
8.2.2	Agents adaptatifs à base de XCS . . . . .	103
8.2.3	MOVECO . . . . .	105
8.2.4	La simulation . . . . .	105
8.3	Expérimentation . . . . .	107
8.3.1	Les firmes adaptatives . . . . .	108
8.3.1.1	Les firmes basées sur les règles et les firmes basées sur XCS	108
8.3.1.1.1	Evolution de la population de firmes . . . . .	109
8.3.1.2	Analyse de sensibilité des firmes basées sur XCS . . . . .	111
8.3.1.2.1	La précision des domaines de définition des attributs . . . . .	111

8.3.1.2.2	La fonction de récompense . . . . .	112
8.3.1.2.3	Influence des paramètres de XCS . . . . .	113
8.3.1.2.4	La population initiale de classeurs . . . . .	115
8.3.1.2.5	Effet de la population initiale des firmes sur la convergence de la population de classeurs . . . . .	116
8.3.2	L'exploration/exploitation . . . . .	117
8.3.2.1	Utilisation de l'exploration dirigée dans XCS . . . . .	117
8.3.2.2	Influence de nos stratégies sur l'apprentissage des firmes . . . . .	118
8.3.2.2.1	Comparaison des firmes basées sur les meta-règles aux firmes basées sur un choix aléatoire . . . . .	119
8.3.2.2.2	Méta-règles basées sur la variation des périodes d'exploration et d'exploitation . . . . .	120
8.3.2.3	Comparaison des méta-règles aux stratégies de Wilson . . . . .	121
8.3.3	Les formes organisationnelles . . . . .	123
8.3.3.1	Comparaison des firmes s'adaptant aux formes organisa- tionnelles aux autres types de firmes . . . . .	123
8.3.3.2	Evolution de la population de formes organisationnelles . . . . .	125
8.3.3.3	Influence de la population initiale de formes organisa- tionnelles sur l'évolution de la population de formes organisa- tionnelles . . . . .	126
8.3.3.4	Evolution de la population de formes organisationnelles en fonction des types de firmes dans le marché . . . . .	127
8.3.3.5	Influence des opérateurs d'agrégation . . . . .	127
8.4	Conclusion . . . . .	131
	<b>Conclusion</b>	<b>131</b>
	<b>9 Conclusion</b>	<b>133</b>

9.1	Introduction . . . . .	133
9.2	Contributions . . . . .	134
9.2.1	Un modèle des firmes . . . . .	134
9.2.2	Un framework d’agents adaptatifs . . . . .	134
9.2.3	Une approche adaptative pour le choix entre exploration-exploitation	135
9.2.4	Un système multi-agents adaptatif . . . . .	135
9.3	Perspectives . . . . .	136
9.3.1	Améliorer la vitesse d’apprentissage des firmes . . . . .	136
9.3.2	Adapter le taux de variation des périodes d’exploration et d’explo- tation . . . . .	137
9.3.3	Etudier la variation des formes organisationnelles . . . . .	137
9.3.4	Tester notre système par la communauté économique . . . . .	138

# Table des figures

2.1	Interaction des firmes . . . . .	14
4.1	Cycle du comportement de la firme . . . . .	57
5.1	Fonctionnalités de XCS (Miramontes [105] ) . . . . .	60
5.2	La firme basée sur XCS . . . . .	64
7.1	Granulation précise et floue . . . . .	90
7.2	Les composantes du système multi-agents adaptatifs représentant les firmes et les formes organisationnelles . . . . .	92
7.3	Firmes et formes organisationnelles . . . . .	93
7.4	Caractéristiques de la valeur floue . . . . .	94
7.5	Appartenance des firmes aux formes organisationnelles . . . . .	95
7.6	Emergence d'une forme organisationnelle . . . . .	97
8.1	Diagramme de classes de l'agent XCS . . . . .	104
8.2	Diagramme de classes de MOVECO . . . . .	106
8.3	Comparaison du capital des firmes utilisant les règles à celuides firmes basées sur XCS . . . . .	109
8.4	Evolution de la population de firmes . . . . .	110
8.5	Extrait de la courbe d'évolution de la population de firmes . . . . .	110

8.6	Influence de la précision du codage sur l'évolution de la population de classeurs . . . . .	112
8.7	Comparaison du capital de firmes utilisant la fonction de récompense individuelle et collective . . . . .	113
8.8	Comparaison du capital de firmes utilisant différentes fréquences de l'algorithme génétique . . . . .	114
8.9	Comparaison de la convergence de la population de classeurs pour différentes fréquences de l'algorithme génétique . . . . .	114
8.10	Influence du taux d'apprentissage . . . . .	115
8.11	Firmes avec et sans population de classeurs initiale . . . . .	116
8.12	Convergence de la population de classeurs d'une firme basée sur XCS dans un environnement composé uniquement de firmes basées sur les règles et dans un environnement hétérogène. . . . .	116
8.13	Comparaison du capital des firmes utilisant l'exploration aléatoire, l'exploration basée sur la récence et l'exploration basée sur la fréquence . . . . .	117
8.14	Influence de l'exploration dirigée sur l'évolution de la population de classeurs	119
8.15	Comparaison du capital des firmes utilisant les méta-règles à celui des firmes utilisant un choix aléatoire . . . . .	119
8.16	Comparaison de firmes utilisant des méta-règles avec différentes périodes d'explorations . . . . .	120
8.17	Comparaison du capital des firmes utilisant les deux types de méta-règles	121
8.18	Comparaison de la convergence des firmes utilisant les deux types de méta-règles . . . . .	121
8.19	Comparaison de l'approche basée sur les méta-règles et la technique locale de Wilson . . . . .	122
8.20	Comparaison de l'approche basée sur les méta-règles et la technique globale de Wilson . . . . .	122
8.21	Comparaison du capital des firmes basées sur XCS sans perception des formes organisationnelles à celui des firmes basées sur XCS considérant la perception des formes organisationnelles . . . . .	124

8.22	Comparaison des firmes basées sur les règles, celles basées sur XCS sans perception des formes organisationnelles et les firmes basées sur XCS considérant la perception des formes organisationnelles . . . . .	124
8.23	Evolution du nombre de firmes dans les formes organisationnelles . . . . .	125
8.24	Performances des formes organisationnelles . . . . .	126
8.25	Influence de la population initiale sur l'évolution des formes organisationnelles . . . . .	126
8.26	Evolution de la population de formes organisationnelles en fonction des catégories de firmes sur le marché . . . . .	127
8.27	Influence des opérateurs d'agrégation sur le nombre de formes . . . . .	130



# Liste des tableaux

5.1	Exemple de classeur . . . . .	66
8.1	Méthodes de la composante proactive . . . . .	103
8.2	Comparaison de l'âge des firmes . . . . .	109
8.3	Comparaison de l'âge des firmes ayant différentes représentations . . . . .	111
8.4	Statistiques sur l'évolution du capital des firmes . . . . .	118
8.5	Statistiques sur le capital des firmes utilisant différentes techniques d'exploration/exploitation . . . . .	123



# Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Contexte

L'engouement et la multiplication des travaux visant à étudier les systèmes économiques au cours de ces dernières décennies, ne fait que confirmer l'importance de ces systèmes. Les premiers travaux se sont essentiellement basés sur la théorie orthodoxe ou néoclassique. Cette théorie considère que les agents économiques sont dotés d'une rationalité parfaite, et que les marchés qu'ils peuplent sont homogènes et en équilibre. Elle suppose, en effet, que les agents économiques disposent de toutes les capacités et les informations nécessaires à une prise de décision optimale. De plus, ces agents ont les mêmes préférences et les mêmes capacités et sont indépendants les uns des autres. Cette théorie se base sur la modélisation mathématique. L'utilisation des modèles mathématiques a rendu celle-ci limitative et simpliste.

La théorie orthodoxe a été abandonnée suite à la révolution de la pensée économique engendrée par les travaux de Simon [143]. Cette révolution rapproche mieux la modélisation des systèmes économiques de la réalité en les considérant comme constitués d'agents en interaction, engendrant une caractéristique d'auto-organisation et d'émergence de comportements globaux. Elle rejette l'hypothèse d'une rationalité parfaite au profit d'une rationalité limitée. L'agent dispose d'une information imparfaite et ne cherche plus à trouver une solution optimale, il recherche des solutions sous-optimales mais robustes. Les systèmes économiques sont ainsi considérés comme des systèmes dynamiques et ouverts, en perpétuel changement. Cette révolution a engendré un bon nombre de nouvelles théories parmi lesquelles, nous citons les théories évolutionnistes. Nous nous intéresserons particulièrement à la théorie de la firme basée sur les ressources pour sa capacité à relier la firme au marché. Cette théorie essaye de comprendre la corrélation entre la firme et le marché. Elle relie, d'une part, l'adaptation au niveau des firmes aux variations du marché. Elle cherche d'autre part, à déterminer l'influence de la dynamique de ce marché sur le comportement des firmes.

D'après Henderson et Mitchell [70], l'analyse de la relation réciproque entre la firme et le marché et leur influence mutuelle est encore immature. Ce n'est que récemment et après l'apparition de la **co-évolution** avec les travaux de Baum et Singh [15], Lewin et Volderba [96], Baum et Rao [14] que l'aspect bi-directionnel de la causalité a été considéré. La majorité des travaux se sont intéressés à étudier l'adaptation. Cependant, la recherche dans ce contexte a accordé peu d'attention à l'intégration des formes organisationnelles (Ethiraj [54]). Il serait donc intéressant de voir si les managers, considérés comme des entités à rationalité limitée, sont capables de s'engager dans une adaptation dans l'espace des formes organisationnelles pour accomplir une adéquation à l'environnement. Les formes organisationnelles constituent un concept très important en théories de l'organisation et de l'économie. Malheureusement, il n'existe pas encore de formalisation exacte de ce concept. Le nombre de travaux relatifs aux formes organisationnelles est aussi très réduit (Foss [59]). La majorité des travaux, tels que ceux de Baum [14], Lewin [96], Child [37] et Lee [92] considère une forme organisationnelle comme *une entité regroupant un ensemble de firmes ayant des stratégies et structures similaires*. Ces travaux sont d'ordre théorique. Ils définissent le concept de formes organisationnelles, dans le contexte d'un marché donné, et déterminent les effets historiques et institutionnels qui ont influencé l'apparition des différentes formes organisationnelles à travers le temps.

De plus, la majorité des études empiriques sur l'évolution des firmes et l'adaptation stratégique a mis l'accent sur la transformation et la restructuration des firmes et n'a pas été particulièrement concernée par la co-évolution entre les firmes et leur environnement et l'émergence de nouvelles formes organisationnelles.

## 1.2 Problématique

La problématique de cette thèse consiste à modéliser les formes organisationnelles et les firmes, et à étudier la dynamique de ces dernières ainsi que leurs relations avec les formes organisationnelles. Nous tenterons dans ce travail d'apporter des réponses aux différentes questions posées par les chercheurs en économie, à savoir :

- quel processus d'adaptation et d'apprentissage les firmes doivent-elles utiliser pour faire face à leur environnement turbulent ?
- comment établir un équilibre entre les décisions d'exploration et d'exploitation de la firme ?
- comment l'adaptation au niveau micro influence-t-elle les formes organisationnelles ? (sélection, émergence d'une organisation particulière au niveau du marché ou encore population des formes organisationnelles).
- comment les formes organisationnelles influencent-elles les performances des firmes ?

Ces deux derniers points correspondent plus spécifiquement aux questions suivantes :

- comment les firmes s'adaptent-elles à l'évolution de leur environnement ?
- comment la dynamique des firmes influence-t-elle les formes organisationnelles ?
- comment les formes organisationnelles influencent-elles l'adaptation des firmes ?
- comment ces formes organisationnelles émergent-elles ?

### 1.3 Une approche de modélisation par les systèmes multi-agents adaptatifs

La révolution de la pensée économique engendrée par les travaux de Simon [143] a causé le délaissement des modèles mathématiques en faveur de nouvelles approches de modélisation des systèmes économiques. Nous pouvons citer comme exemple la simulation multi-agents. Contrairement aux modèles mathématiques, la simulation multi-agents tient compte à la fois du niveau micro (firmes) et du niveau macro (les formes organisationnelles).

L'avantage de l'utilisation des systèmes multi-agents est de montrer comment les phénomènes collectifs surgissent à partir de l'interaction et de l'adaptation d'une population d'agents autonomes et hétérogènes. Ces modèles basés sur les agents sont aussi utilisés comme outils d'aide à la décision par les managers des firmes. Ils leur permettent de tester plusieurs configurations de marché et d'étudier les conséquences des actions individuelles des firmes sur ce marché.

Pyka et Fagiolo [119] ont identifié un nombre de caractéristiques des systèmes économiques qui motivent l'utilisation des systèmes à base d'agents. Les systèmes économiques :

- doivent être étudiés selon une perspective ascendante. Les propriétés au niveau macro doivent donc émerger des propriétés au niveau micro,
- sont considérés comme des systèmes complexes adaptatifs. Ce sont les interactions entre les agents qui engendrent l'émergence des tendances au niveau du marché,
- sont composés d'agents économiques :
  - hétérogènes dans leurs caractéristiques et comportements,
  - se comportant comme des entités dotées d'une rationalité limitée,
  - choisissant leurs actions en fonction des choix des autres agents dans le passé.
- sont non stationnaires étant donné que les actions des agents peuvent influencer leurs environnements,
- sont ouverts vu que les agents peuvent entrer et quitter le marché, ce qui augmente la turbulence de la dynamique du système.

Cette thèse est une application de la simulation multi-agents au contexte économique. Un de ses objectifs est de montrer que l'adaptation se trouve à plusieurs niveaux et non pas uniquement au niveau du comportement des agents. Plusieurs architectures d'agents et de systèmes multi-agents existent. Nous proposons d'utiliser les systèmes multi-agents adaptatifs (Cardon et Guessoum [31]) pour l'étude et la compréhension de la dynamique des systèmes économiques. Notre objectif est donc de concevoir et d'implémenter un système multi-agents complet intégrant les firmes, les formes organisationnelles et leurs interactions. Cet objectif se décline en trois sous-objectifs :

- la définition d'un modèle de firme basé sur les théories des ressources,
- la modélisation de l'adaptation des firmes en les dotant d'une capacité d'apprentissage et la résolution des problèmes inhérents tel que le dilemme d'exploration/exploitation,
- La modélisation des formes organisationnelles et de leur interaction avec les firmes.

Nos motivations sont liées à deux domaines différents :

- fournir aux économistes un outil permettant de tester la validité de leurs théories, d'affiner leurs modèles et de mieux les rapprocher de la réalité,
- fournir à travers l'étude des systèmes économiques, un bon domaine d'application de la théorie de la complexité et des systèmes multi-agents. La complexité des systèmes économiques explique l'intérêt que porte, de plus en plus, la communauté multi-agents à leur modélisation. Une branche entière appelée ACE (Agent Computational Economics) a été créée pour modéliser différents aspects de ces systèmes. Elle permet d'une part d'enrichir les modèles existants ou d'en créer d'autres et d'autre part, de vérifier la validité de certaines architectures d'agents et de systèmes multi-agents.

## 1.4 Organisation de la thèse

La première partie introduit le cadre général de la thèse. Elle est constituée de deux chapitres qui présentent l'état de l'art des thèmes abordés dans cette thèse.

Le premier chapitre synthétise et analyse les caractéristiques des systèmes économiques. Il décrit les conséquences de la révolution économique issue des travaux de Simon. Sur le plan économique, cette révolution a engendré l'apparition de nouvelles théories telle que la théorie des firmes basée sur les ressources qui nous intéresse dans cette thèse. Ce chapitre analyse ensuite les approches de modélisation des systèmes économiques. Il propose une analyse d'un ensemble de simulations multi-agents afin de situer notre travail.

Le deuxième chapitre introduit les agents adaptatifs. Il définit la notion d'agent adaptatif. Il présente et analyse différentes techniques d'apprentissage utilisées en économie.

La deuxième partie de cette thèse se rapporte à la modélisation. Elle décrit la modélisation des différentes composantes définies dans la première partie.

Le troisième chapitre s'intéresse à la présentation de MORE, notre modèle de firme basé sur la théorie des ressources. L'objectif de ce chapitre est de définir les caractéristiques de la firme et son comportement.

Le quatrième chapitre présente le framework d'agents adaptatifs proposé pour modéliser les firmes. Il décrit la technique d'apprentissage utilisée : le système de classeurs apprenants XCS. Il détaille ensuite l'intégration de XCS dans le modèle des firmes et dégage les problèmes que cette intégration pourrait engendrer.

Le cinquième chapitre traite le dilemme d'exploration/exploitation qui est un problème très important que ce soit en apprentissage ou en économie. Il présente les sous-problèmes liés à ce dilemme à savoir : le choix entre exploration et exploitation et le choix d'une technique d'exploration qui peut être soit dirigée, soit sans but. Ce chapitre propose ensuite une approche adaptative pour le choix entre l'exploration et l'exploitation.

Le sixième chapitre introduit le concept de formes organisationnelles. Il propose un modèle de formes organisationnelles. Il présente ensuite l'architecture du système multi-agents adaptatif utilisé pour modéliser les firmes, les formes organisationnelles et leur influence mutuelle.

La troisième partie décrit l'implémentation et la présentation des résultats les plus importants. Elle est constituée d'un chapitre qui intègre ces deux aspects. Elle met en valeur la facilité d'enrichissement de la plate-forme DIMA. Elle présente ensuite les résultats des expérimentations permettant de valider le modèle de firmes, le modèle de formes organisationnelles et de l'architecture multi-agents qui les lie.



Première partie

Etat de l'art



## Chapitre 2

# Les systèmes économiques

### 2.1 Introduction

La révolution de la pensée économique issue des travaux de Simon [143] a conduit à une nouvelle approche d'étude des systèmes économiques. Cette nouvelle approche étudie les systèmes économiques du point de vue de la complexité. Elle a permis une transition de l'étude des comportements prédits du modèle néoclassique à l'étude des comportements observés (Le Bas [89]). Elle a donc étendu l'approche néoclassique de l'économie en remplaçant :

- la notion d'équilibre par la notion de changement et d'évolution,
- la rationalité parfaite des agents par une rationalité limitée,
- la recherche d'une solution optimale par une recherche de solutions sous-optimales mais robustes.

Elle rapproche la modélisation des systèmes économiques de la réalité en les considérant comme complexes (holland [72]), constitués d'agents en interaction, affichant une caractéristique d'auto-organisation et d'émergence de comportements globaux cohérents (Axelrod et al. [7]). Elle a ainsi permis de mettre en valeur certains aspects des systèmes économiques qui ont été longtemps négligés malgré leur importance. Nous pouvons citer comme exemple, les formes organisationnelles (voir Section 7.2 du Chapitre 7).

La considération des formes organisationnelles implique entre autre la considération simultanée de différents niveaux d'analyse des systèmes économiques. Ces systèmes doivent donc être modélisés à l'aide d'approches autres que l'approche mathématique ou statistique. L'approche de modélisation considérée doit tenir compte des différentes caractéristiques qui conduisent à l'émergence de nouveaux comportements.

Ce chapitre est un chapitre introductif. Il permet de guider le lecteur vers la définition de la problématique. Il explique et décrit en premier lieu la révolution de la pensée économique afin de distinguer les caractéristiques des nouvelles théories économiques. Il

montre également l'intérêt de l'utilisation de la simulation multi-agents pour étudier les systèmes économiques. Il analyse enfin les travaux de simulation multi-agents modélisant les systèmes économiques afin de nous situer dans ce domaine de recherche.

## 2.2 Evolution des systèmes économiques

Les récents travaux de recherche en économie considèrent les firmes comme des entités dynamiques caractérisées par leur croissance. Ils étudient les répercussions de la croissance des firmes sur le plan économique. Ils tentent de concilier l'évolution économique et la croissance des firmes. Ces travaux considèrent la firme comme une entité ayant ses propres caractéristiques individuelles et un rôle particulier à jouer en économie. Ils essaient de comprendre le lien entre la croissance de la firme et l'évolution économique, ce qui n'est pas le cas de « la théorie orthodoxe ».

### 2.2.1 La théorie orthodoxe

La théorie orthodoxe a vu le jour entre les années 1940 et 1970 (Dréan [47]). Elle se propose d'analyser des systèmes économiques en équilibre où les agents économiques n'interagissent pas avec leur milieu extérieur. Ces agents économiques ont un comportement individuel et indépendant. Ils ont pour objectif la maximisation de leur utilité. Ils sont considérés comme des automates cherchant l'équilibre des échanges dans un monde où le temps et l'incertitude n'existent pas. Les modèles économiques se basant sur cette théorie ont surtout mis l'accent sur l'analyse statique du système. La théorie orthodoxe est fondée sur les hypothèses suivantes :

**Marché en équilibre** La théorie orthodoxe suppose que l'environnement est statique. Elle ne tient pas compte de l'interaction des agents économiques qui le composent. Elle cherche plutôt à optimiser leur utilité. En effet, les agents économiques sont analysés dans un contexte social, politique et constitutionnel donné.

**Rationalité parfaite** La théorie orthodoxe suppose que l'ensemble des états possibles du marché est connu, a priori, par l'agent économique. Béjean et al. [16] précisent que la rationalité parfaite suppose que l'agent économique est doté d'une **capacité cognitive illimitée** et qu'il possède toutes les capacités nécessaires au traitement de l'information. En d'autres termes, elle suppose que l'agent connaît toutes ces actions, qu'il est qualifié pour évaluer avec exactitude les conséquences associées à chacune de ses actions, et qu'il est enfin capable de déceler parmi ces actions, l'action optimale (Kechidi [81]).

La rationalité parfaite suppose ainsi que ces agents sont dotés de la capacité irréaliste de résolution de problèmes NP-complets ou encore mal définis <sup>1</sup>. Kechidi [81] note

---

<sup>1</sup>Cette remarque est tirée d'un site introduisant la complexité [44]

que cette rationalité implique que l'agent peut maximiser son utilité en supposant une information parfaite.

Cette conception de la rationalité repose sur une séparation entre les décisions économiques et le contexte social et historique comme le montre Cahuc [30] dans Beitone[18] : *En économie, le principe de rationalité signifie que les individus agissent en utilisant au mieux les ressources dont ils disposent, compte tenu des contraintes qu'ils subissent. (...). L'individu rationnel ou encore homo oeconomicus, est égoïste (...). Son comportement est défini indépendamment de toute contrainte macro sociale.*

Lors de sa prise de décision, l'agent économique se limite à maximiser ses recettes. Il offre un produit homogène et exclut toute stratégie de diversification. Par ailleurs, il ignore l'incertitude dans la mesure où il considère que le comportement des autres agents économiques est prévisible. Bejéan et al. [16] soulignent que l'agent opte, pour considérer l'incertitude :

- soit pour l'intégration dans ses calculs de coûts forfaitaires de recherche d'information sur les stratégies des autres détenteurs de l'information ignorée,
- soit pour l'association des croyances (probabilités) aux différentes conséquences possibles de ses décisions.

L'approche orthodoxe est simpliste et limitative en terme du nombre et d'hétérogénéité des agents. Elle considère que le marché passe d'un état d'équilibre à un autre. Or cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée dans les marchés réels. Cette approche simplifie aussi les relations entre agents en supposant qu'ils sont indépendants les uns des autres. Elle pose d'après Bromiley [26] certains problèmes en management stratégique : ses hypothèses peuvent conduire à des généralisations de résultats incorrects. Kochugovindan [83] a noté que les modèles qui supposent un équilibre général au niveau du marché ne peuvent pas fournir une représentation idéale de l'économie.

Tous ces points débouchent sur une situation divergente et conflictuelle entre la théorie économique orthodoxe et la réalité économique, entre la tendance d'un équilibre du marché et l'équilibre lui même tel que l'a remarqué Schumpeter [134] et l'a repris Durand [50]. Tous ces éléments ont conduit à une révolution de la pensée économique dont l'objectif principal consiste à expliquer l'évolution économique.

## **2.2.2 Révolution dans la pensée économique**

Simon [140] souligne que l'économie classique ne permet pas d'une manière absolue de décrire les processus que les gestionnaires utilisent pour prendre des décisions dans des situations complexes. Une des alternatives qu'il propose est l'étude de l'économie à travers la théorie de la complexité. Cette nouvelle vision des systèmes économiques a donné naissance à deux sujets de recherche différents :

- la rationalité des processus de raisonnement impliqués dans le comportement économique,

– la complexité des processus de modélisation des systèmes économiques.

Ces deux sujets orientent les chercheurs en économie vers une considération des systèmes économiques comme des systèmes complexes.

Les travaux de Simon [143] ont eu un apport décisif dans le renouvellement de la pensée économique. Ces apports ont permis de considérer l’aspect social et de migrer d’une vision purement économique à une vision socio-économique en introduisant la notion de « bounded rationality <sup>2</sup> ». Simon [142] a révolutionné les représentations des raisonnements en socio-économie en se basant sur ses recherches en psychologie cognitive.

Simon remplace la rationalité parfaite par la rationalité limitée et la notion d’optimisation par la notion de satisfaction (satisfying). Il suggère de modéliser les systèmes économiques comme des systèmes ouverts, dont les comportements sont complètement imprévisibles (voir Le Moigne [90]). Ces différents points sont détaillés dans les sections suivantes.

### 2.2.2.1 La rationalité limitée

La notion de rationalité limitée de Simon a fait l’objet de récentes recherches telles que celles de Kechidi [81] et Béjean et al. [16]. Elle a engendré de nombreuses discussions quant à son interprétation. Beitone [18] considère que la rationalité est limitée lorsque le comportement est le résultat d’un processus approprié de prise de décision.

Béjean et al. [16], considèrent qu’en réalité les décisions successives des individus modifient l’éventail des états possibles du marché. Il n’est donc pas possible de supposer que la liste des états du marché est déterminée au préalable. La rationalité limitée, contrairement à la rationalité parfaite, prend en compte l’information imparfaite. D’après Simon [140], *le processus rationnel est celui qui intègre progressivement l’information acquise au processus de choix, permettant ainsi de parvenir à une solution considérée parmi les meilleures possibles mais qui n’est plus nécessairement la solution optimale au regard de la rationalité parfaite.*

Les préférences des individus évoluent en fonction d’informations nouvelles et de l’expérience acquise. Elles se construisent par **apprentissage** et deviennent un objet d’étude pertinent. Pour en tenir compte, il faut envisager un autre mode de décision basé sur *l’expérience, la mémoire et le raisonnement*. Hommes [74] montre que l’agent ayant une rationalité limitée doit formuler ses attentes en se basant sur les informations observables et adapter ses règles de prévision quand il effectue des observations supplémentaires.

Béjean et al. [16] soulignent que la rationalité limitée confère une force d’**adaptation** à la réalité du système à analyser : un système complexe et évolutif. Cette rationalité a l’avantage :

---

<sup>2</sup> « bounded rationality » est traduite en français sous le nom de rationalité limitée ou procédurale.

- de prendre en compte un environnement décisionnel évolutif,
- d’avoir une plus grande richesse cognitive,
- de permettre une plus grande liberté dans les critères de décision de l’individu.

La rationalité limitée a engendré des changements dans la façon de poser et de résoudre les problèmes économiques. En mettant l’accent sur l’aspect délibératif de la prise de décision et l’appréhension des comportements individuels, elle cherche à identifier la **méthode** de prise de décision et non ses **motivations** autrement dit : identifier l’objectif à poursuivre (Le Moigne [91]).

### 2.2.2.2 la notion de « satisfying » ou satisfaction

Dans la plupart des cas, l’individu confronté à un choix, construit un modèle simplifié de la réalité en se référant à sa propre expérience. Son comportement est donc plus habituel que raisonné. Quand il ne se réfère pas à son expérience, l’individu, faute de temps, d’information ou de capacité, cherche une solution pour lui apporter une certaine satisfaction. Sa rationalité limitée ne lui permet pas de trouver la solution optimale. Par exemple, lors de l’achat d’un produit, le consommateur ne parcourt pas toujours tous les magasins de la ville mais simplement acquiert le produit présentant le meilleur rapport qualité/prix dans le même magasin. Il fait par conséquent un choix raisonnable mais sur la base d’une information incomplète.

Béjean et al. [16] notent que le raisonnement humain issu d’une rationalité limitée, peut être caractérisé par une recherche sélective à l’intérieur d’un large espace de possibilités. La recherche s’arrête lorsqu’une solution satisfaisante est trouvée. Cette prise de décision se caractérise par un mécanisme permettant de déterminer les options d’actions possibles et par une règle de décision appelée satisfaction.

Cette notion de satisfaction est sous-estimée par les économistes mais joue un rôle important dans la réduction du temps nécessaire à l’aboutissement à une solution. Simon [139] montre qu’en l’absence de tout algorithme d’optimisation, le coût de la recherche de la meilleure solution tend à croître, au moins linéairement avec la taille de l’espace analysé. En revanche, le coût de recherche d’une solution *satisfaisante*<sup>3</sup> dépend simplement de la densité de distribution des solutions de qualités diverses dans cet espace et non pas de sa dimension globale. Cette notion de satisfaction est donc plus appropriée au monde réel.

### 2.2.2.3 Les marchés dynamiques

Les deux points décrits dans les sections 2.2.2.2 et 2.2.2.1 ne vont pas de pair avec une étude des marchés en équilibre. L’objectif est passé donc de l’optimisation de marchés en équilibre à la recherche d’un équilibre autant que possible pour ces marchés. Ceci conduit

---

<sup>3</sup>Ce terme a été défini par Simon. Sa traduction ne correspond pas exactement à satisfaisant mais intègre aussi les nuances de « adéquat », « convenable » et « suffisant » [90]

à favoriser l'auto-régulation de ces systèmes par des boucles de rétroaction à la place d'une planification centrale.

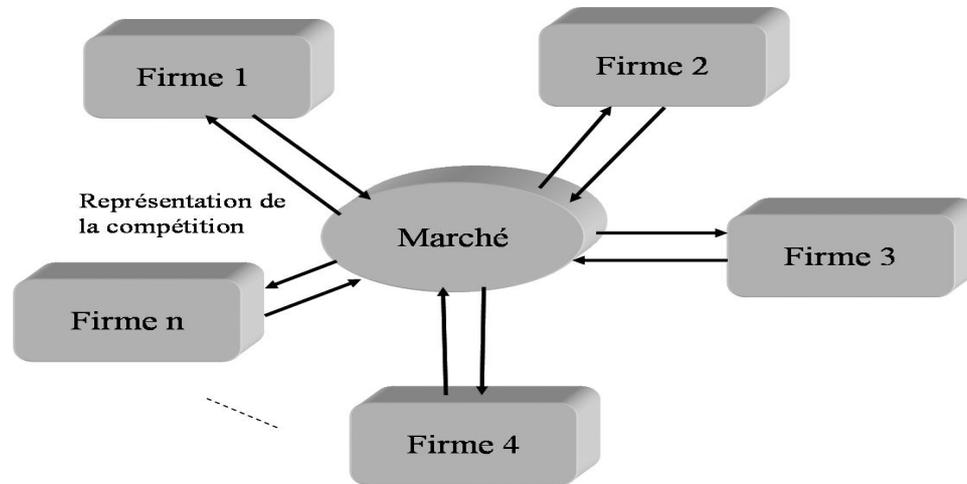


FIG. 2.1 – Interaction des firmes

Les marchés sont caractérisés par un ensemble de firmes en interaction. En effet, les firmes ne sont pas des entités isolées mais interagissent avec d'autres firmes. Cette interaction peut être : (i) directe comme dans le cas où les firmes ont des actions commerciales communes, (ii) indirecte en considérant l'effet des autres firmes sur le marché ou en observant les stratégies des firmes qui ont réussi. Pour se rapprocher plus de la réalité d'un marché compétitif, nous optons pour une interaction **indirecte**. Celle-ci s'effectue à travers des échanges d'informations par l'intermédiaire du marché et à travers l'observation de l'impact des actions des différentes firmes sur ce marché (Voir Figure 2.1).

Le marché présente les caractéristiques suivantes :

1. Forte compétitivité : l'importance croissante de l'information et du savoir-faire a engendré une forte concurrence entre les firmes, ainsi qu'une incertitude et une complexité accrues.
2. Un nombre important de firmes.
3. Incertitude : le marché est incertain étant donné qu'il est impossible de définir à l'avance tous les états du marché. Ceci est dû au fait qu'il est difficile de cerner l'évolution de l'ensemble des facteurs conditionnant l'avenir. La prédiction de ces facteurs est dépendante d'informations ayant trait à l'environnement naturel (effet du climat sur une récolte), à l'environnement social ou politique (effet des guerres par exemple) ou encore au comportement des autres firmes qui peuvent être influencées à leur tour par le marché.
4. Stabilité / turbulence : plusieurs facteurs sont à l'origine de la dynamique du marché. Nous pouvons notamment citer :
  - l'évolution des technologies du jour au lendemain,
  - l'arrivée de nouveaux concurrents,
  - la réorganisation des structures des firmes,

- la structuration du marché (nombre de concurrents et leurs poids, position de l’entreprise par rapport à ses concurrents, l’apparition des formes organisationnelles) qui définit elle même l’importance de la pression concurrentielle directe,
- la disparition de certaines firmes,
- l’hétérogénéité des firmes dans leur structure et leur comportement.

### 2.2.3 Conséquence des travaux de Simon

Simon [144] a conclu que *la compréhension actuelle de la dynamique des systèmes économiques réels est grossièrement imparfaite. Nous manquons particulièrement d’informations empiriques sur la façon dont les acteurs, ayant des capacités cognitives limitées, élaborent des anticipations du futur et de la façon dont ils utilisent ces anticipations pour édifier leur propre comportement.*

Cette révolution de la pensée économique, introduite par les travaux de Simon, a donc engendré :

- l’apparition de nouvelles théories en économie telles que la théorie comportementale de la firme (March et Simon [100]), l’économie évolutionniste (Schumpeter [134], Nelson et Winter [108]), la théorie des ressources (Penrose [112] ), la théorie évolutionniste de la firme basée sur les ressources (Durand [50, 49]). L’objectif de ces théories est d’expliquer le comportement des agents économiques et des systèmes économiques en général,
- la considération des systèmes économiques comme des systèmes complexes adaptatifs (les travaux de Arthur [4], Holland [72], ACE [157]) et le recours à l’approche systémique pour la modélisation de tels systèmes complexes. Cette approche de modélisation met l’accent sur l’interaction, l’organisation, l’émergence et la complexité et intègre des approches nouvelles de modélisation basées sur les outils de l’intelligence artificielle (Le Moigne [91]).

Nous consacrerons le reste de ce chapitre à la description des approches de modélisation de ces systèmes ainsi qu’à l’analyse des nouvelles théories pour identifier et mettre en valeur les éléments à considérer pour avoir une bonne modélisation des systèmes économiques.

## 2.3 Les nouvelles théories économiques

Les innovations, introduites par March et Simon [100] en organisation et le travail de Cyert et March [39] (the behavioral theory of the firm), ont engendré la naissance d’une nouvelle théorie : l’économie de l’évolution ou l’économie évolutionniste.

### 2.3.1 Définition de l'économie évolutionniste

**Définition 1** *l'économie évolutionniste est une tentative de considérer un système économique, du point de vue du monde entier ou du point de vue de ses parties, comme un processus continu dans l'espace et dans le temps (Boulding [21]).*

L'économie évolutionniste englobe des idées de plusieurs économistes tels que Arthur [4] et Nelson et Winter [108]. Elle suppose selon Singh [145] que :

- les agents économiques sont dotés d'une rationalité et de capacités cognitives limitées,
- l'objectif de ces agents est la recherche de la satisfaction et non de l'optimisation,
- l'utilisation de l'apprentissage organisationnel est nécessaire.

L'unité de base de cette théorie est la firme. Le terme firme est utilisé pour caractériser une entreprise quand l'aspect économique est prépondérant dans l'entreprise. *La firme représente essentiellement le versant économique de l'entreprise, c'est à dire ses outils de production, ses rendements ou sa rentabilité* (Durand [50]).

L'économie évolutionniste constitue le chaînon qui permet de passer de la vision de la croissance de la firme basée sur la recherche de rentes organisationnelles à l'évolution économique. Cette théorie engendre différentes préoccupations, allant de l'évolution des formes organisationnelles<sup>4</sup> individuelles aux régimes technologiques nationaux en passant pas les cycles économiques (Freeman et Forey 1992, Durand [50]).

### 2.3.2 Historique de l'économie évolutionniste

L'approche évolutionniste a vu le jour à travers les travaux de Schumpeter [134] qui a considéré l'équivalence entre l'évolution biologique et l'évolution économique. Cependant, le travail qui a eu le plus de succès et qui est considéré comme représentatif de cette théorie est celui de Nelson et Winter [108]. Ces derniers attribuent à la firme la capacité de délibérer en plus de ses compétences techniques. Ils se basent sur la notion de routines organisationnelles<sup>5</sup>. Ces routines sont la manifestation de la mémoire de la firme ainsi que de ses capacités de réponses et d'actions (Durand [50]). Les firmes choisissent ainsi, une stratégie à partir d'un ensemble de stratégies existantes et en fonction de leurs performances relatives. Ces performances relatives sont mesurées par la profitabilité relative et par le taux d'utilisation de cette stratégie par les autres firmes.

Le modèle de Nelson et Winter [108] ne permet pas, cependant, d'analyser et de comprendre les comportements et les processus internes de la firme. Les routines qu'il utilise

---

<sup>4</sup>Entité rassemblant un ensemble de firmes similaires par leurs structures et leurs stratégies. Elle sera définie plus en détail plus loin dans ce chapitre.

<sup>5</sup>Comportement régulier d'une firme reposant sur l'activation de qualifications en vue d'atteindre certains objectifs (Nelson et Winter [108])

sont un approfondissement de la notion d'aptitude, mais n'abordent qu'indirectement les ressources. De ce fait, ce modèle a été enrichi par la théorie des ressources introduite par Penrose [112]. Cette théorie a permis d'apporter un fondement théorique robuste à la notion de firme. Elle définit les firmes comme des agents ou des acteurs à l'origine de leurs propres transformations. La firme est donc considérée comme un ensemble de ressources en continuelle transformation. Une firme, à un moment particulier, est un entrepôt de caractéristiques idiosyncrasiques qui distinguent la firme des autres firmes dans le même marché (Winter [174]). La théorie des ressources a permis de relier la firme au marché. Durand [53] considère que les processus internes de la firme tels que le processus d'innovation, d'apprentissage et de sélection parmi plusieurs choix, ont leur part d'explication de l'évolution des marchés. La question centrale de cette nouvelle théorie est de comprendre les *relations continues et réciproques de la firme et du marché et leur influence mutuelle*. L'intérêt s'est porté spécialement sur l'analyse de la relation entre l'adaptation au niveau des firmes, la sélection et la dynamique du marché.

### 2.3.3 Co-évolution entre la firme et le marché

Sarasvathy et Simon [131] suggèrent que le marché qui sélectionne les individus les plus performants n'est pas toujours indépendant des décideurs et qu'il est possible non seulement de s'adapter à l'évolution du marché mais aussi de l'influencer et de concevoir certaines de ses parties.

Il est donc préférable de comprendre les liens entre la firme et le marché et entre les choix passés et les performances futures. Durand et al [53] ont mis l'accent sur le fait que la sélection au niveau du marché est dépendante du choix d'actions par les firmes qui influencent à leur tour la sélection au niveau du marché.

Henderson et Mitchell [70] notent que l'analyse de la relation réciproque entre la firme et le marché et leur influence mutuelle est encore immature. Les économistes se sont intéressés à ce problème en utilisant des modèles très réduits de firmes. Les chercheurs en organisation et en stratégie par contre, se sont intéressés uniquement à l'étude de l'organisation et la dynamique interne de la firme tout en considérant des modèles simples du marché. De plus, dans tous ces modèles, la direction de la causalité entre les firmes et le marché est unidirectionnelle. Seul l'effet du marché sur les firmes est considéré. Ce n'est que récemment et après l'apparition de la **co-évolution** avec les travaux de Baum et Singh [15], Lewin et Volderba [96], Baum et Rao [14] que l'aspect bi-directionnel de la causalité a été considéré. En introduisant l'aspect bi-directionnel, ces chercheurs ont montré que l'étude des systèmes économiques devrait intégrer simultanément plusieurs niveaux d'analyse et que la structure organisationnelle du marché représentée par les formes organisationnelles est une composante importante qu'il faut prendre en compte pour modéliser un système économique complet.

Baum et Rao [14] décrivent la co-évolution en terme de deux aspects théoriques : une double hiérarchie incluant une hiérarchie écologique et une hiérarchie généalogique reliées mutuellement par le modèle V-S-R (variation, sélection, rétention). La hiérarchie généalogique fait référence à la succession à travers le temps des types d'organisation économique à différents niveaux. Elle intègre les organisations et les formes organisationnelles. La hiérarchie écologique correspond aux manifestations réelles des types d'organisations appartenant à la hiérarchie généalogique. Elle correspond aux firmes, populations de firmes, etc.

Comprendre la relation entre la firme et le marché revient à considérer la causalité descendante/ascendante dans ces hiérarchies. Plusieurs travaux, tels que celui de Levinthal [94], Bruederer et al. [27], Volberda et al. [165], ont ensuite essayé de montrer qu'il existe un lien entre l'adaptation au niveau des firmes et la sélection au niveau du marché. Ils ont tenté de répondre aux questions suivantes :

- comment les firmes peuvent-elles apprendre et s'adapter aux variations du marché ?
- comment l'apprentissage et l'adaptation des firmes peuvent ils affecter le marché ?

Par exemple, les variations sélectionnées au niveau des ressources sont dépendantes des technologies sélectionnées au niveau des firmes et des formes organisationnelles sélectionnées au niveau des populations (Durand [52]). La causalité ascendante stipule que l'individu influence le groupe. En effet, cette causalité considère que les changements macroscopiques sont dus à de petits événements survenus au niveau micro.

Il nous est nécessaire à ce stade de détailler les processus et les aspects liés à la co-évolution entre la firme et son marché.

### 2.3.4 L'adaptation

Si nous considérons la firme comme unité de base de notre analyse, l'adaptation correspond à la manière dont une firme s'ajuste aux variations du marché afin de maintenir ou améliorer ses performances. L'adaptation est le processus de décision de la firme définie par sa capacité à détecter les signaux du marché, sélectionner l'information la plus importante et décider en fonction de cette information. Les adeptes de ce mécanisme, tels que Levinthal [94], Pajares [110], Bruederer et Singh [27], Lomi et Larsen [97], Dosi [45] supposent que les firmes sont flexibles et dotées d'une capacité d'apprentissage leur permettant de faire face aux variations continues de leur marché. Cette notion d'adaptation permet d'améliorer la rationalité en permettant l'enrichissement des connaissances de la firme.

La nature incertaine et imprévisible du marché rend l'adaptation plus difficile. Mais l'adaptation contribue à son tour à l'incertitude puisqu'elle influence le marché. Cette hypothèse est confirmée par Bréchet [24] qui considère la firme comme une entité active qui par sa propre action et son propre intérêt est capable de modifier l'état du marché, c'est à dire les comportements des unités avec lesquelles elle est en relation.

L'adaptation selon Sornn-Friese [149] peut être statique ou dynamique :

- l'adaptation statique correspond uniquement à une réaction automatique aux pressions et aux changements de l'environnement. Cette réaction peut être par exemple, définie par un ensemble statique de règles définies a priori,
- l'adaptation dynamique correspond à un changement organisationnel incluant d'un côté un comportement organisationnel proactif et de l'autre côté un comportement réactif et protecteur.

C'est ce deuxième type d'adaptation qui correspond à l'approche évolutionniste. Une firme adaptative est donc une firme qui, selon Dawid [43], se doit de répondre continuellement aux variations de son environnement en s'adaptant aux éventualités qui se présentent. Cependant, la recherche dans ce contexte a accordé peu d'attention à la **l'intégration des formes organisationnelles**<sup>6</sup> (Ethiraj [54]). Il est donc intéressant de voir si les managers considérés comme des entités à rationalité limitée sont capables de s'engager dans une adaptation dans l'espace des formes organisationnelles pour accomplir une adéquation au marché.

Teece [154] souligne que l'adaptation dans le courant des ressources, correspond à la transformation des ressources et des aptitudes. Elle est dépendante d'une part, du changement et de la mutation et d'autre part, de l'innovation, de l'information et de l'apprentissage. Ces derniers influencent aussi bien la forme organisationnelle de la firme que sa capacité d'innover et de croître.

### 2.3.5 Les formes organisationnelles

Le concept de formes organisationnelles a capté l'attention de plusieurs chercheurs en comportement organisationnel, psychologie sociale, théorie informatique des organisations ainsi qu'en management des ressources humaines et sociologiques (voir Foss [59]). Nous nous intéressons à cette notion du point de vue de l'économie évolutionniste et organisationnelle.

Le concept de forme organisationnelle est récent mais très important tant en économie qu'en théorie de l'organisation. Un numéro spécial de la revue *Academy of Management science* (2001) lui a été consacré. C'est un concept lié à la notion de co-évolution. Les formes organisationnelles constituent l'organisation d'une industrie. L'utilisation et la création des connaissances dépendent essentiellement de ces formes organisationnelles (Sornn-Friese [149]). Daft et al. [41] montrent que les formes organisationnelles sont un mélange des caractéristiques de la firme et du marché.

La considération des formes organisationnelles constitue l'un des moyens de survie d'une firme dans un marché turbulent. Baum et Rao [14] soulignent que l'appartenance à une forme organisationnelle compétitive et robuste peut garantir la survie de la firme.

---

<sup>6</sup>Ce concept sera détaillé dans la section suivante

La notion de forme organisationnelle signale, d'après Foss [59], que l'organisation de l'économie n'est pas statique, mais change à travers les innovations organisationnelles. Elle se réfère aux modes de contrôle des transactions et à la façon dont la firme structure ses relations avec les autres firmes.

Malheureusement, il n'existe pas encore de définition précise de ce concept<sup>7</sup>. Le nombre de travaux relatifs aux formes organisationnelles est aussi très réduit (Foss [59]). La majorité des travaux, tels que ceux de Baum [14], Lewin [96], Child [37], Lee [92] considèrent une forme organisationnelle comme *une entité regroupant un ensemble de firmes ayant des stratégies et structures similaires*. Ils sont d'ordre théorique. Ils essaient de définir le concept de formes organisationnelles et déterminent les effets historiques et institutionnels qui ont influencé l'apparition des différentes formes organisationnelles à travers le temps. L'évolution des formes organisationnelles d'après Janczak et al. [77] incombe à une combinaison de facteurs, notamment économiques, technologiques, informationnels et politiques.

Witteloostuijn et al. [176] présentent une typologie des formes organisationnelles en firmes généralistes et spécialistes. Cette typologie permet de classer les firmes sur la base des stratégies qu'elles adoptent en relation avec l'utilisation des ressources et de leur position dans l'espace des ressources. Une firme spécialiste occupe une niche étroite et fournit des services ou produits à des clients spécifiques alors qu'une firme généraliste fournit ses services et produits à un large spectre de consommateurs.

Janczak et al. [77] notent que les changements du contexte organisationnel, des technologies et processus utilisés au sein des firmes auxquels les gestionnaires font face ont amené les chercheurs à s'intéresser à l'adaptation et à la flexibilité afin de trouver des explications aux nouvelles formes organisationnelles. D'après Lewin et al. [96], l'explication de l'émergence de nouvelles formes organisationnelles demeure un défi en matière de théorie de l'organisation.

### 2.3.6 La sélection

Simon [138] et Plunket [114] identifient deux formes possibles de sélection :

- la sélection par les firmes de données et d'information sur la base de critères d'évaluation hérités du passé ;
- la sélection environnementale classique des firmes qui sont performantes.

Une autre distinction basée sur les courants théoriques représentant l'évolutionnisme, est fournie par Durand [52]. Selon le courant écologique, la sélection s'opère au niveau des populations de firmes en compétition. Chaque population est caractérisée par une forme organisationnelle (voir Section 2.3.5). C'est le rapport d'adéquation entre les pressions de l'environnement et l'inertie des formes organisationnelles qui détermine la transformation ou la disparition de certaines d'entre elles. La sélection est donc caractéristique des formes

---

<sup>7</sup>Plusieurs définitions seront présentées dans le chapitre 7.

organisationnelles. Selon le courant évolutionniste par contre, la sélection s'opère par les firmes au niveau du choix des ressources ou des routines. Il est cependant utile de considérer simultanément ces différents niveaux afin de construire un modèle complet.

La sélection a été longtemps considérée au niveaux des firmes comme indépendante de l'adaptation. Cependant, les travaux récents tels que Metcalfe [102], Simon [144], Bruederer et Singh [27], Levinthal [94], Singh [145] considèrent au contraire qu'il existe un lien entre la sélection et l'adaptation au niveau des firmes. Metcalfe [102], note que la sélection est liée au marché et aux performances des firmes et le bien être social. Il considère que la sélection est un processus qui fonctionne sous l'influence de différents facteurs : l'entrée de nouvelles firmes sur le marché disposant chacune de ses propres ressources, l'élimination des firmes non profitables et la modification de l'importance des technologies rentables (Metcalfe [102]). Les deux processus de sélection et d'adaptation sont, en effet, complémentaires et non conflictuels et doivent par conséquent être étudiés simultanément.

Cette relation entre adaptation et sélection a été aussi soulignée par l'approche écologique (Singh [145]). Les récentes recherches ont démontré que ni la sélection, ni l'adaptation n'étaient capables d'expliquer à elles seules la stratégie et la structure organisationnelle (Lewin et al. [96]). Chacune met l'accent sur un niveau d'analyse différent et peut être incorporée dans un cadre évolutionniste. L'approche évolutionniste fournit un cadre conceptuel général qui, s'il est bien défini, peut fournir un nouveau regard aux changements du comportement des firmes et aux variations au niveau des populations de firmes (Singh et lumsden [146]).

## 2.4 Les approches de modélisation des systèmes économiques

Nous présentons dans cette section les approches de modélisation des systèmes économiques qui à leur tour ont subi une évolution parallèle à celle des systèmes économiques. Cette section met l'accent sur le passage de l'utilisation des mathématiques pour modéliser les systèmes économiques vers l'utilisation d'autres types d'approches basés sur les outils de l'intelligence artificielle.

Durand, LeMoigne et Simon [144] considèrent que la simulation est le meilleur moyen pour comprendre les systèmes économiques complexes. Elle permet de tenter tout type d'expérience sans qu'il est nécessaire d'engager une expérimentation en grandeur nature avec les risques qu'elle représente, surtout quand elle implique des entreprises ou des économies. La simulation est non seulement un outil de modélisation pour l'étude de systèmes économiques ou autres mais aussi un objet d'étude elle-même, permettant d'améliorer la compréhension de certaines des propriétés de ces systèmes. Elle utilise des techniques informatiques issues de l'intelligence artificielle (automates cellulaires, algorithmes génétiques, etc.) Hutzler [75].

La simulation ne constitue pas une preuve irréfutable mais doit être considérée comme un prolongement rationnel de test d'un modèle théorique. Elle doit donc reposer sur un modèle théorique précis dont la validité a été déjà attestée afin qu'elle n'ait pas un statut de preuve auquel elle ne peut pas prétendre.

### 2.4.1 La simulation stochastique ou numérique

Un modèle stochastique est une description de la réalité sous forme d'un ensemble de paramètres numériques et d'un ensemble de relations mathématiques qui décrivent la manière dont certains de ces paramètres, appelés causes, agissent sur d'autres appelés effets (Drogoul [48]). La simulation stochastique a été utilisée pour modéliser les systèmes économiques basé sur la théorie orthodoxe. Elle repose sur des hypothèses génériques de fonctionnement et de comportement et possède une théorie générale, due à son caractère de démonstration logique (Durand [49]). La simulation stochastique permet de déterminer les stratégies optimales dans un contexte statique. Elle nécessite en contre partie une simplification excessivement réductrice des agents et des conditions d'organisation de l'échange économique, spécialement en ce qui touche à leur agencement temporel (O'Driscoll [109]).

Durant, plusieurs années, la simulation a été utilisée pour appliquer des traitements analytiques des modèles mathématiques (Troitzsch [160]). Rivero et al. [126] par exemple, proposent la combinaison de la formulation, via l'économétrie et la résolution, via une simulation numérique, de modèles d'équations différentielles non linéaires. Ces modèles présentent certains problèmes :

- ils sont difficiles à résoudre,
- le progrès technologique et le changement des stratégies impliquent généralement un changement des coefficients des équations,
- le comportement des variables ne peut être ajusté par une distribution de probabilité puisque les événements cruciaux tels que les décisions d'investissement ne sont pas appropriés aux répétitions,
- la stratégie des agents ne dépend pas uniquement des états passés et présents du système mais des attentes des agents concernant le comportement futur du système.

En plus de ces points, Durand [49] a identifié quatre limites qui s'opposent à l'utilisation de l'approche basée sur les mathématiques pour modéliser les systèmes économiques considérés du point de vue de l'approche évolutionniste :

1. Les comportements de la firme et ses informations changent à travers le temps. Il s'en suit que l'évolution de la réalité économique représentée par les modèles mathématiques est très simplifiée et que les phénomènes inter-temporels ne sont pas pris en compte (Durand [49]).
2. L'hétérogénéité des comportements de la firme. L'utilisation des modèles mathématiques repose sur l'homogénéité des comportements. Elle est donc réductrice et ne correspond pas à la réalité économique comportant une diversification des procédés de production et de structures organisationnelles.

3. Le système économique est un système ouvert caractérisé par l'apparition de nouvelles firmes innovatrices et la disparition des firmes dont les ressources et les compétences sont devenues obsolètes. Or les modèles mathématiques les considèrent comme étant en équilibre.
4. L'évolution économique peut provenir de plusieurs sources : de flux d'innovation, de la concurrence entre les firmes, du fonctionnement même des marchés, de la modification des règles de l'organisation (Witt [175]). L'intégration de ces changements et innovations est difficile dans les modèles mathématiques.

D'après Drogoul [48], le point de vue de la simulation stochastique sur le phénomène qu'elle simule est macroscopique. Elle ne prend pas en compte les composantes microscopiques tels que le comportement des composantes et leurs interactions. Elle modélise le système considéré comme un tout (Troitzsch [160]). Elle ne permet pas d'expliquer le *pourquoi* de certains comportements collectifs qui résultent de l'agrégation d'actions individuelles. Or, ces phénomènes sont omniprésents en économie. Par conséquent, la simulation stochastique n'est pas adaptée à la présentation des modèles économiques.

Ces problèmes peuvent être résolus par la simulation multi-agents. C'est un outil puissant pour l'analyse économique, permettant une spécification du modèle plus flexible et l'inclusion de plus de suppositions ajustées (Richiardi [125]). Ces systèmes permettent une modélisation plus réaliste des marchés. Ils feront l'objet de la section suivante.

## 2.4.2 La simulation multi-agents

Ferber [56] note que la simulation multi-agents permet d'étudier les systèmes complexes. Elle représente la complexité d'un phénomène à travers l'interaction d'un ensemble d'entités simples appelées agents. Chaque agent peut :

- communiquer avec les autres agents en vue d'échanger des informations,
- percevoir et agir sur tout ou une partie de l'environnement. Il est idiosyncrasique<sup>8</sup> dans le sens où il possède ses propres règles et logiques de perception et d'action (Durand [49]),
- appliquer ses connaissances, compétences et autres ressources individuelles pour accomplir ses objectifs individuels (Ferber [56]).

En d'autres termes, un agent est doté des propriétés suivantes :

- autonomie : l'agent contrôle ses actions en fonction de son état interne et de son environnement, sans intervention externe,
- proactivité : l'agent a sa propre activité et son propre but et ne fait pas que réagir à l'environnement,
- adaptation (voir Guessoum [67]) : L'agent est capable de réguler ses aptitudes (communicationnelles, comportementales, etc.) en fonction du ou des agents avec lesquels il interagit et / ou de l'environnement dans lequel il évolue.

---

<sup>8</sup>Idiosyncrasie : idiosugkrasia " tempérament particulier ", de sugkrasis " mélange ". Disposition personnelle particulière, généralement innée, à réagir à l'action des agents extérieurs, Le petit Robert

### **2.4.2.1 Caractéristiques de la simulation multi-agents**

Au contraire des approches de modélisation basées sur la définition d'équations mathématiques, où la dynamique du système est définie dès le début par des relations fonctionnelles entre entités, la simulation multi-agents se propose de modéliser explicitement les comportements des entités et considère que la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, résulte directement de l'interaction des comportements, au niveau microscopique (Parunak et al. [111]). En effet, l'approche multi-agents permet de modéliser chaque individu, son comportement et les interactions qui découlent de la mise en commun de ces individus. La dynamique globale du système est alors issue de l'ensemble de ces individus.

La simulation multi-agents permet de tester rapidement le changement de certaines hypothèses; elle permet aussi d'intégrer de nouveaux agents et d'éditer, sur un plan pratique, les résultats pour comparer les expérimentations les unes aux autres. Elle essaye d'expliquer ce qui se passe dans un système et confirme par l'approche des systèmes complexes adaptatifs que l'objectif de la science n'est pas de prédire mais d'expliquer (Kochugovindan et al. [83]).

La simulation multi-agents préserve l'hétérogénéité du système à simuler. Elle se caractérise par la possibilité de représenter plusieurs niveaux de granularité dans les systèmes hétérogènes (Ferber [55]).

Toutes les caractéristiques de la simulation multi-agents décrites ci-dessus en font un bon outil pour la modélisation des systèmes économiques.

### **2.4.2.2 Intérêt de la simulation multi-agents pour les systèmes économiques**

La simulation multi-agents a acquis une grande notoriété et un grand intérêt en économie ces dernières années. Elle est de plus en plus utilisée. Elle fournit une réponse au manque de modèles qui étudient les dynamiques dans une société composée d'agents artificiels ayant une rationalité limitée (Hoog [164]). Les systèmes multi-agents permettent de représenter les individus et leur comportement. En modélisant les comportements des individus, ils permettent de considérer les effets non linéaires des interactions entre les différents acteurs du système (BenSaid [17]).

Durand [49] montre que l'intérêt de la simulation multi-agents pour les modèles économiques est triple : théorique, méthodologique et technique. Sur le plan théorique, la simulation multi-agents constitue un prolongement essentiel de la réflexion qui peut être menée dans le cadre du courant des ressources. Sur le plan méthodologique, à la différence des méthodologies classiques, la simulation ne nécessite pas d'hypothèses fortes sur le comportement optimal ou rationnel de l'agent économique. Sur le plan technique, elle

donne le maximum de liberté à la définition idiosyncrasique de la firme. Elle permet de représenter la firme par un agent capable d'agir en fonction des variations du marché.

La simulation multi-agents apporte des solutions aux limites de l'approche mathématique. Elle permet de :

- représenter les phénomènes inter-temporels en économie,
- représenter, à travers les systèmes multi-agents, des comportements hétérogènes,
- ne pas tenir compte de l'hypothèse de bouclage de modèle et de représenter par exemple l'évolution sans avoir une contrainte de demande ou de budget,
- représenter un système continuellement évolutif et évite par conséquent la considération de l'équilibre ; elle permet de relier la décision de la firme et son action,
- prendre en considération les conséquences du choix stratégique sur les propriétés des ressources engagées par l'agent dans le processus concurrentiel (Durand [49]).

La simulation multi-agents permet aussi de préserver l'hétérogénéité du système à simuler, puisqu'elle représente plusieurs niveaux de granularité dans des systèmes hétérogènes (Ferber [55]). Les économistes ont besoin de tels outils pour représenter leur vision du monde réel. Cette vision est souvent composée d'acteurs qui appartiennent à des niveaux de hiérarchisation différents et dont le comportement dépend de leurs niveaux de définition (BenSaid [17]). Elle se distingue des autres approches par le fait qu'elle permet de tenir compte à la fois de plusieurs niveaux d'analyse : le niveau micro et le niveau macro. Dawid [43] souligne que la simulation multi-agents lie, d'une part, les stratégies individuelles, la structure du marché et les effets micro et d'autre part, le développement de certaines variables économiques au niveau macro tels que la croissance économique et le nombre de firmes.

Lopez-Peredes [98] indique que les résultats des simulations multi-agents utilisées confirment qu'il est possible de reproduire les comportements humains et ouvrent ainsi une voie prometteuse pour la simulation et l'ingénierie de la compétition stratégique.

Cette approche de simulation des systèmes économiques par des systèmes multi-agents a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs. Une approche nommée ACE (Agent Computational Economics) a été créée. Cette approche considère les systèmes économiques comme des systèmes adaptatifs complexes (Tessfatsion [157]). Elle est pluridisciplinaire puisqu'elle fait intervenir les études en sciences cognitive, informatique et économique. Les recherches inhérentes à cette méthodologie s'orientent vers plusieurs axes de recherche pour :

- comprendre les régularités dans le comportement global du système et démontrer que ces régularités sont le résultat des interactions entre les agents. Ce qui revient à étudier les systèmes économiques par une approche ascendante,
- étudier l'impact de l'apprentissage sur l'économie,
- développer des simulations afin d'étudier les processus économiques à travers des expérimentations contrôlées,
- étudier le lien entre l'individu et les groupes sociaux.

Notre travail se situe au carrefour de ces différents axes de recherches.

## 2.5 Simulations multi-agents des systèmes économiques

Plusieurs travaux récents ont utilisé la simulation multi-agents dans le domaine économique. Parmi ces travaux, nous pouvons citer ceux de Rivero et al. [126], Pajares et al. [110], Phan [113] et Yildioğlu [180, 179, 178]. Les sections suivantes nous permettent d'analyser avec plus de détails ces travaux afin de situer notre travail. Cette analyse met l'accent, entre autre, sur les aspects suivants : les modèles économiques utilisés, la considération de la sélection et de l'adaptation, la considération des formes organisationnelles. Les architectures d'agents utilisées seront considérées dans le chapitre suivant.

### 2.5.1 Les marchés simulés

La majorité des simulations multi-agents des systèmes économiques s'est intéressée à l'étude du comportement global du marché. Ce comportement émerge de l'interaction d'un ensemble de firmes. Ces travaux essaient d'expliquer l'apparition de certaines tendances dans la dynamique du marché. Ils mettent en valeur la nécessité de l'adaptation et de l'apprentissage des firmes. Ils essaient d'expliquer la connexion entre les stratégies que les firmes utilisent pour répondre aux changements dans leurs marchés compétitifs (Lomi et Larsen [97]). Ces travaux considèrent deux types de marchés :

- les simulations des marchés financiers ont suscité l'intérêt des chercheurs en économie. Ceci s'explique par le nombre de travaux de simulations apparus. Le Baron [88] et Grothmann [65] ont élaboré une synthèse de ces travaux. L'objectif de ces simulations est d'expliquer certains phénomènes complexes du marché tels que les effets de bulles des prix ou les crashes du marché. D'autres simulations telles que celles de Schulenburg et al. [133], LeBaron [87], [88], Arthur [5], se sont intéressées davantage à la modélisation du comportement des agents dans les marchés financiers,
- les simulations des changements technologiques, qui essaient d'établir un lien entre l'innovation technologique au niveau des firmes et la dynamique de l'industrie. Ce lien est basé essentiellement sur les traits comportementaux et organisationnels des firmes qui sont dans la majorité des cas, représentés par les routines définies dans la Section 2.3.2 (Dosi [46]). Nous pouvons citer comme travaux, basés sur le modèle de Nelson et Winter, ceux de Yildioğlu [180, 179, 178], Dawid [43], Ballot et Taymaz [10], Smith et al. [148]. D'autres simulations basées sur d'autres modèles s'intègrent aussi dans cette catégorie. Il s'agit par exemple des travaux de Rivero et al. [126], Pajares et al. [110], Boero et al. [19] et enfin Bagnall et al [9] qui simulent le marché anglais de la génération d'électricité.

Notre modèle s'intègre dans la deuxième catégorie de simulations. La constatation que l'on peut faire à ce niveau est qu'aucun de ces travaux ne se fonde sur le modèle des firmes basé sur les ressources (voir Section 2.3.2) alors que celui-ci s'est avéré plus avantageux que le modèle de Nelson et Winter quant à l'étude de la relation entre la firme et le marché.

## 2.5.2 La sélection et l'adaptation

Les simulations des systèmes économiques peuvent être classifiées en catégories dépendantes de la granularité de l'unité d'analyse considérée. Deux catégories principales de travaux ont été identifiées :

**Les travaux qui considèrent la firme comme une organisation d'agents** considèrent la firme comme étant un système à part entière à étudier. Celle-ci est considérée dans ce cas comme étant une organisation d'agents autonomes (Voir Carley [33], Carley [32], Carley et al. [34], Dal Forno et al. [42], Sun et Naveh [151], Barr et al. [13]). L'objectif de ces travaux consiste à trouver la structure la plus adéquate des firmes.

**Les travaux qui considèrent la firme comme unité d'analyse** modélisent le processus de prise de décision des firmes et étudient son impact au niveau du marché. Parmi ces travaux nous pouvons citer celui de Rivero et al. [126], Pajares et al. [110], Phan [113], Yildioğlu [180, 179, 178], Mitlohner [107], Bagnall [9], Schulenburg et al. [133], LeBaron [87], Ben Said [17], Dawid [43], Dosi et Nelson [46], Ballot et al. [10]. Ces travaux se sont focalisés sur la modélisation du comportement des firmes et l'étude de leur interaction. Ils essaient de trouver une solution pour améliorer la rationalité limitée de la firme et comprendre l'émergence de phénomènes collectifs au niveau du marché.

La majorité de ces simulations telles que celles de Yildioğlu [180, 179, 178], Rivero et al. [126] et Pajares et al. [110] considèrent que les agents ont une rationalité limitée et utilisent donc des architectures d'agents adaptatifs et des algorithmes d'apprentissage ou d'évolution pour modéliser le comportement des firmes. Ce point sera détaillé dans le chapitre suivant.

Certaines simulations considèrent dans leurs expérimentations l'hétérogénéité au niveau des comportements des firmes, d'autres se limitent à l'hétérogénéité des paramètres internes. Ils comparent ainsi des populations d'agents ayant le même comportement et se différenciant par leurs paramètres initiaux.

Le nombre de firmes considérées diffère aussi d'une simulation à une autre. Ceci dépend de l'objectif du travail. Certaines simulations considèrent un nombre important de firmes se comptant par centaines ou milliers, alors que d'autres se limitent uniquement à une dizaine de firmes.

**Les travaux qui s'intéressent aux populations de firmes** font partie de la théorie de l'écologie des populations. Nous pouvons citer parmi ces travaux celui de Lomi et Larsen [97] qui s'intéressent à l'étude des interactions de firmes et leur impact sur la dynamique des populations de firmes. Ils mettent plutôt l'accent sur la sélection. Ils analysent l'apparition et la disparition de firmes et considèrent que ces indicateurs sont dépendants de l'interaction de la firme avec son voisinage. Lomi et Larsen [97] supposent une rationalité parfaite des agents. Les agents, modélisés dans ce travail, prennent leurs décisions en se basant sur des informations relatives à des indicateurs au niveau micro ou macro.

Nous remarquons que les travaux de simulations multi-agents des systèmes économiques se sont intéressés soit à l'adaptation, soit à la sélection. Aucun travail n'a considéré simultanément ces deux aspects.

### 2.5.3 Les formes organisationnelles

La notion de formes organisationnelles est récente et a été négligée au niveau des travaux de simulation multi-agents des systèmes économiques. En effet, il n'existe presque pas, à notre connaissance, de travaux empiriques considérant les formes organisationnelles et leur relation avec l'adaptation des firmes. Cette constatation est confirmée par Foss [59]. Seuls quelques travaux, n'utilisant pas la simulation multi-agents, tels que ceux de Levinthal [94] et Bruederer et Singh [27] ont souligné la nécessité de considérer les formes organisationnelles. Ils ont essayé de modéliser cette relation en utilisant des modèles simples basés uniquement sur la recherche de la forme organisationnelle la plus performante parmi les formes organisationnelles avoisinantes. Ces travaux représentent les firmes par un ensemble de routines et utilisent un algorithme génétique pour sélectionner les formes organisationnelles les plus performantes. Le modèle utilisé pour représenter les firmes est trop simple et ne reflète pas la réalité. Il est basé sur une représentation binaire. Ces travaux utilisent généralement la notion de paysage de performances. A l'exception de ces travaux, la majorité des travaux reliés à ce concept est d'ordre théorique. Ces travaux essaient de présenter les facteurs qui influencent l'apparition de nouvelles formes organisationnelles et ceux qui les altèrent (Voir Baum et Rao [14], Lewin et Volberda [96], Lewin et al. [95], Forte et al. [58]).

## 2.6 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre montre que les systèmes économiques sont des systèmes complexes et que la modélisation d'un système économique complet, doit prendre en considération :

1. la rationalité limitée des firmes. Celle-ci est due à une information imparfaite et incomplète du marché dynamique. Pour en tenir compte, il faut doter la firme d'une capacité d'adaptation afin de lui permettre de construire graduellement sa base de connaissances tout en jonglant entre l'exploration de nouvelles connaissances et l'exploitation des connaissances déjà acquises lors du choix d'actions,
2. les formes organisationnelles ce qui revient à réifier le niveau macro,
3. la co-évolution entre la firme et son marché en tenant compte à la fois des processus d'adaptation et de sélection.

Ceci a débouché sur les interrogations suivantes :

- quels processus d'adaptation les firmes doivent elles utiliser ?
- comment l'adaptation au niveau des firmes influence-t-elle les formes organisationnelles ?

– comment les formes organisationnelles vont elles influencer les firmes ?

La simulation multi-agents est l'approche la plus appropriée pour modéliser les systèmes économiques. Elle permet :

- de modéliser la dynamique d'un ensemble hétérogène de firmes en compétition. Cette hétérogénéité peut provenir notamment, des paramètres internes des firmes ou de leur processus de décision,
- de modéliser l'interaction entre le niveau micro caractérisé par les firmes et le niveau macro caractérisé par les formes organisationnelles.

Cependant, la performance de la simulation multi-agents va dépendre de la solidité de l'analyse du problème décelé et de la modélisation du comportement des agents. Sans elle, il n'est pas possible de capturer les caractéristiques de la dynamique globale du système. Nous pouvons ajouter à cette constatation, le fait que la majorité des travaux de simulation multi-agents des systèmes économiques a spécialement mis l'accent sur la modélisation de l'adaptation au niveau des firmes tel que nous le montrera plus en détail le chapitre suivant. Ces travaux ont négligé un aspect important à savoir, la modélisation des formes organisationnelles et leur relation avec les firmes. Ceci constituera l'objectif de notre travail.



# Chapitre 3

## Les agents adaptatifs

### 3.1 Introduction

L'agent est considéré d'après Ferber [56] comme un processus cyclique comportant trois phases successives : perception, délibération, action. La délibération correspond à la prise de décision suivant des règles subjectives susceptibles de changer au cours du temps. Le processus de délibération constitue l'aspect le plus important dans l'architecture d'un agent. La nature de l'architecture d'agent est donc caractérisée par son processus décisionnel plus que ses processus de perception et d'action (Michel [104]).

Le choix de l'architecture d'agent est une tâche très délicate qui devrait être réalisée avec le plus de précautions possibles pour avoir une représentation fidèle de l'entité modélisée. Plusieurs architectures ont été mises au point depuis la création des systèmes multi-agents. Elles se différencient par le niveau de rationalité du processus décisionnel de l'agent (Michel [104]). Les plus connues sont les architectures cognitives et les architectures réactives.

**Les architectures réactives** Les agents réactifs ne font que réagir d'une manière mécanique aux stimuli qu'ils perçoivent. Ils n'ont pas de représentation de leur monde.

**Les architecture cognitives** Les agents cognitifs disposent d'une capacité de raisonnement, d'une aptitude à traiter des informations diverses liées au domaine d'application, et des informations liées à la gestion des interactions avec les autres agents et l'environnement (Guessoum [67]). L'une des architectures les plus connues est l'architecture BDI (Belief, Desire, Intentions).

**Les architectures hybrides** Les agents hybrides intègrent l'aspect cognitif et réactif. Les architectures hybrides sont complexes et s'avèrent non appropriées à la modélisation d'agents dont le comportement est très simple.

La nature complexe et dynamique des systèmes économiques font des agents cognitifs, les agents les plus appropriés pour ces systèmes. Par contre, la nécessité de l'adaptation nous oriente vers un type particulier d'agents : les agents adaptatifs. Ces agents reposent sur l'utilisation de l'apprentissage. Ils peuvent engendrer de nouveaux produits et services, de nouveaux processus de production et la création de nouvelles formes organisationnelles (Sornn-Friese [149]). L'apprentissage est un processus qui améliore les capacités de décision de la firme et spécialement les décisions concernant l'utilisation efficace des ressources dans un marché changeant (Dosi et Marengo [46]).

Durant ces vingt dernières années le nombre de techniques d'apprentissage utilisées en économie a augmenté d'une manière importante (Brenner [25]). Ces modèles se différencient par leur niveau de complexité mesuré par le nombre de paramètres qu'ils considèrent. Ils peuvent par exemple décrire l'apprentissage au niveau individuel ou au niveau de la population ou encore inclure une mémoire des événements passés.

Ce chapitre définit le concept d'agent adaptatif et nous permet d'exposer les techniques d'apprentissage utilisées en économie pour représenter l'adaptation des firmes. Il nous permet ainsi de déterminer la méthode la plus appropriée pour notre application.

## 3.2 Définitions

Maes [99] considère que l'agent doit s'adapter aux variations de son environnement. Un agent possède un jeu d'actions possibles, des capteurs qui le renseignent sur son environnement et ses objectifs variés. L'agent voudrait intégrer les retombées de ses actions afin d'améliorer ses choix d'actions. Un tel agent, qui devrait apprendre au cours de toutes ses expériences, passe par deux phases : une phase d'apprentissage, et une phase de pratique. L'apprentissage doit être axé sur les objectifs et sur les actions complexes. Il doit être autonome (le minimum possible de supervision). De plus, le modèle d'apprentissage doit permettre la gestion des erreurs telle que l'imprécision.

Cette définition s'attache à distinguer des caractéristiques d'agents ainsi que des méthodes générales permettant la réalisation d'agents adaptatifs. Toutes ces caractéristiques sont pertinentes, mais sont insuffisantes pour bien définir un agent adaptatif. Elles ne constituent pas un modèle dans le sens propre du terme. Il manque pour cela toute la partie descriptive de l'architecture, des comportements et de l'information nécessaire à l'apprentissage.

Une autre définition des agents adaptatifs a été donnée par Cardon et Guessoum [31]. Un agent adaptatif est un système qui cherche la satisfaction de ses tendances fondamentales. Pour cela, il adapte sa structure et modifie son comportement de manière à corréliser ses tendances et son environnement. Un agent adaptatif est donc un agent qui possède la capacité d'adaptation en plus des autres caractéristiques d'agent : telles que l'autonomie, la proactivité, l'intelligence et la sociabilité. Par adaptation, nous caracté-

risons la capacité de l'agent à modifier son comportement et ses objectifs en fonction de ses interactions avec son environnement et avec les autres agents.

### 3.3 Les types d'adaptation

D'après Guessoum [67], l'adaptation peut être

- structurelle : il s'agit d'adapter la structure de l'agent à l'évolution de son environnement. La réorganisation de la liste des accointances d'un agent à l'arrivée de nouveaux agents dans le système est un exemple de cette adaptation,
- comportementale : il s'agit d'adapter le processus de décision de l'agent à l'évolution de son environnement. Adapter par exemple, le choix des actions à la situation du marché tel est le cas des firmes.

Selon Pham et al. [113], l'adaptation comportementale peut être statique ou dynamique. L'adaptation est statique quand on dote les agents de règles de comportements obtenues par la simulation de l'évolution de l'environnement et des réactions de l'agent à cet environnement. Ces règles sont figées et nécessitent la prévision des changements possibles de l'environnement au moment de la conception de l'agent. L'adaptation est, par contre, dynamique quand les règles de comportement sont construites dynamiquement au fur et à mesure que l'environnement change. Pham et al. [113] considèrent l'adaptation dynamique comme étant la capacité de l'agent à s'adapter aux changements imprévus de son environnement par son évolution continue sans l'interruption de son exécution. Ce type d'adaptation nécessite des capacités d'apprentissage.

Maes [99] propose différentes méthodes d'adaptation dynamique :

- apprentissage par renforcement : l'agent effectue l'action la mieux notée, puis modifie la note en fonction des résultats. Il explore dans un pourcentage  $n$  de cas. Il suggère parmi ces méthodes, l'utilisation des systèmes de classeurs<sup>1</sup>. Dans ces systèmes, l'agent choisit parmi les classeurs qui correspondent à la situation la mieux notée. Il effectue les opérations correspondantes et améliore les notes des derniers classeurs utilisés quand le résultat est probant. Ces classeurs sont, par la suite, croisés génétiquement afin de conserver une exploration de l'environnement,
- construction de modèles : l'agent construit des modèles statistiques des actions qu'il effectue. En se référant à ces modèles, il choisit l'action qui le fera le plus progresser. En fonction des résultats et par corrélation avec ce qu'il a déjà appris, il modifie ses modèles pour en sélectionner le meilleur.

L'apprentissage est un domaine de recherche grandissant et important que ce soit pour la technologie agent (comment construire un agent réellement apprenant) ou pour l'économie (comment simuler les agents apprenants). Selon Simon [141], l'apprentissage résulte en des changements adaptatifs dans un système. Il permet à ce dernier de réaliser

---

<sup>1</sup>Les classeurs sont des règles de type condition-action, auxquelles on rajoute une variable permettant leur évaluation.

la même tâche ou des tâches similaires d'une manière plus effective quand elles sont rencontrées de nouveau.

Selon Szabo [153], le phénomène d'apprentissage inclut intrinsèquement la supposition d'une rationalité limitée puisqu'il considère que la connaissance d'une firme est déficiente. Par conséquent, des erreurs et de mauvaises décisions seraient possibles. Des conclusions sont établies à partir de ces erreurs et permettent de les éviter et d'affiner les connaissances.

Nous nous intéressons dans le cadre de ce travail à l'adaptation par apprentissage. Nous définissons en premier lieu l'apprentissage et nous nous pencherons ensuite, sur les techniques d'apprentissage et d'évolution utilisées dans le cadre des agents économiques.

### 3.4 L'apprentissage dans les systèmes multi-agents

Deux catégories d'apprentissages peuvent être utilisées dans les systèmes multi-agents :

- l'apprentissage individuel se réalise indépendamment des autres agents. Il n'est pris en considération que lorsque tous les éléments du processus d'apprentissage sont exécutés par le même agent et ne nécessite aucune interaction avec les autres agents (Sen et Weiss [135]),
- l'apprentissage multi-agents nécessite par contre la présence des autres agents et leur interaction. Il étend la première catégorie d'apprentissage pour tenir compte de l'influence de l'information échangée avec les autres agents ou encore des normes et conventions qui règlent leurs comportements (Weiss [167]).

Nous considérons le deuxième type d'apprentissage dans notre modèle étant donné qu'une firme ne peut évoluer toute seule mais doit considérer les autres firmes présentes sur le marché pour prendre ses décisions. Les connaissances des firmes incluront une représentation de leur environnement caractérisé par les autres firmes sur le marché.

### 3.5 Les modèles d'apprentissage

Les modèles d'apprentissage sont classés en deux grandes catégories :

- l'apprentissage inconscient ou encore l'apprentissage par renforcement selon la littérature en psychologie (Brenner [25]),
- l'apprentissage conscient ou encore l'apprentissage cognitif.

### 3.5.1 L'apprentissage conscient et l'apprentissage inconscient

L'apprentissage inconscient a lieu quand l'agent ignore ce qu'il est en train d'apprendre. C'est un mécanisme qui fonctionne automatiquement et continuellement dans les processus où aucune réflexion cognitive ne prend place ( Brenner [25]).

L'apprentissage conscient a lieu quand l'agent est capable de réfléchir sur ses actions et leurs conséquences. Il est divisé en deux catégories :

- l'apprentissage basé sur les routines où les agents apprennent en se basant sur des règles et routines fixes telles que l'imitation des comportements des autres agents par exemple. Cet apprentissage met l'accent sur l'une des caractéristiques de l'apprentissage : l'imitation, l'expérimentation, la collecte d'expériences et la satisfaction ou (satisfying),
- l'apprentissage des croyances où les agents attribuent un sens aux connaissances acquises lorsqu'ils sont en train de raisonner sur leur situation et de retenir les actions les plus appropriées. Ils construisent ainsi des croyances sur les relations et les événements futurs (Brenner [25]). Grâce à cet apprentissage, les agents réfléchissent sur leurs comportements et construisent des modèles de leurs conséquences.

L'apprentissage basé sur les routines est considéré comme une approximation de l'apprentissage des croyances. Il souffre du manque de compréhension de la situation de l'agent et ne permet donc pas de décrire un processus d'apprentissage réel. Il ne peut décrire l'apprentissage d'une manière précise que dans certaines circonstances. La sélection de l'un des modèles dépend du choix entre un modèle complexe et réaliste ou un modèle approximatif.

Nous nous intéressons dans ce qui suit aux modèles d'apprentissage des croyances pour les deux raisons suivantes :

- les décisions prises par les firmes sont si importantes, qu'elles peuvent causer leur faillite. Les gestionnaires doivent donc comprendre la situation dans laquelle se trouve leur firme pour prendre leur décision,
- notre objectif est de se rapprocher le plus possible de la réalité dans notre modélisation du comportement de la firme. Il nous faut donc un modèle d'apprentissage assez générique.

### 3.5.2 Les modèles d'apprentissage des croyances

Cette catégorie de modèles est considérée par les psychologues comme étant une sous-catégorie des modèles d'apprentissage cognitif. Brenner [25] inclut dans cette catégorie les modèles d'apprentissage des croyances en économie, les modèles d'apprentissage rationnel et plusieurs modèles issus de l'intelligence artificielle.

La majorité de ces modèles est basée sur une hypothèse selon laquelle une représentation du monde réel est développée dans le cerveau. Brenner a réparti les modèles d'apprentissage des croyances en quatre catégories :

- les modèles de jeux fictifs " fictitious play" développés dans le contexte des jeux,
- les modèles d'apprentissage dont l'objectif est l'optimisation. Nous pouvons citer comme exemple, l'apprentissage bayésien ou l'apprentissage du moindre carré,
- les modèles inspirés de la psychologie tels que l'apprentissage des règles et l'apprentissage stochastique des croyances "stochastic belief learning",
- les modèles issus de l'intelligence artificielle tels que la programmation génétique, les systèmes de classeurs, le Q-learning et les réseaux de neurones.

Les modèles de jeux fictifs supposent que l'agent est capable de mémoriser toutes les stratégies passées de ses concurrents, ceci est utopique. D'après Brenner [25], ces modèles émettent des suppositions fortes sur la rationalité des agents. Cette hypothèse sur la rationalité est aussi considérée par les modèles dont l'objectif est l'optimisation. Par conséquent, ces deux catégories de modèles ne seront pas considérées dans ce qui suit. Elles vont à l'encontre de notre objectif de modéliser une rationalité limitée de l'agent. Les modèles basés sur la psychologie quant à eux nécessitent des informations sur les croyances des agents qui ne sont pas toujours disponibles.

Nous allons donc mettre l'accent plus précisément sur les modèles issus de l'intelligence artificielle. Les modèles considérés par Brenner sont :

**La programmation génétique** inspirée des algorithmes génétiques. Elle se différencie de ces derniers par les éléments codés et optimisés qui sont des formules et des structures de programmes et non des stratégies comme c'est le cas des algorithmes génétiques.

**Les systèmes de classeurs** représentent les connaissances sous formes de classeurs. Ces classeurs sont évalués et leur population est mise à jour à l'aide d'un algorithme génétique.

**Les réseaux de neurones** reproduisent le cerveau humain sur ordinateur. Ils ont été récemment utilisés dans la littérature pour modéliser l'économie.

D'autres modèles issus de l'intelligence artificielle tels que le Q-learning, les algorithmes génétiques ont été aussi utilisés pour représenter l'apprentissage dans les systèmes économiques.

Tous ces modèles seront présentés et analysés dans la section suivante.

### **3.6 Les techniques d'apprentissage et d'évolution et leur utilisation en économie**

L'intérêt récent porté à la modélisation de l'adaptation dans les systèmes économiques a engendré l'utilisation de plusieurs techniques issues du domaine de l'évolution et de l'apprentissage. Ces techniques seront analysées dans les sections suivantes.

### 3.6.1 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (Holland [71]) se basent sur des concepts de l'évolution biologique telles que la variation par croisement, mutation et sélection en se référant à l'aptitude ou la qualité (fitness). Les algorithmes génétiques produisent plusieurs solutions à un problème en générant des améliorations aux solutions existantes. L'algorithme génétique manipule généralement une chaîne de caractères qui code une position dans l'espace de recherche des états de l'environnement. Les chaînes sont regroupées dans des tables de recherche ou de consultation qui spécifient les actions à entreprendre selon un historique particulier.

Les tables de recherches utilisées par les algorithmes génétiques n'ont pas de mémoire locale mais sont dotées d'une entrée pour chaque état de l'environnement. Ces tables peuvent devenir énormes quand l'espace des états de l'environnement est important (Flake [57]).

Les algorithmes génétiques ont été utilisés par Bruederer et al. [27] dans leur modélisation de l'évolution organisationnelle. Ils ont été utilisés pour prouver que la sélection et l'adaptation s'influencent mutuellement. Ce travail est basé sur le modèle de Nelson et Winter [108] qui modélise les organisations comme étant des ensembles de routines. Leur modélisation correspond dans l'algorithme génétique à une chaîne binaire où chaque routine est représentée par un bit. Une population de chaînes créées aléatoirement représente initialement les firmes. De nouvelles chaînes sont, à leur tour, créées à partir des chaînes présentant les meilleures aptitudes à travers la recombinaison ou croisement. La mutation par contre permet d'innover et donc de déterminer de nouvelles routines. Une des difficultés rencontrées par les algorithmes génétiques est la conservation de règles ayant un sens après le croisement et la construction d'une bonne fonction de définition de l'aptitude.

Les algorithmes génétiques ont été utilisés par Yildizoglu [180] pour les décisions d'investissement en Recherche & Développement (R&D) d'un ensemble de firmes. Ces firmes sont construites selon le modèle de Nelson et Winter. Elles représentent les stratégies par des chromosomes. La firme essaie un nombre fixe de stratégies durant sa durée de vie. Ces stratégies sont évaluées en fonction de la dynamique de l'industrie et du comportement des autres firmes. Cependant, leur effet n'est pas immédiat, il faut donc les utiliser fréquemment afin de les évaluer. La moyenne des profits durant cette période donne la qualité de la stratégie. Une fois toutes les stratégies évaluées, une nouvelle population est générée en utilisant les opérateurs de mutation, croisement et sélection. La meilleure stratégie est conservée pour chaque période.

Les firmes utilisant les algorithmes génétiques ont été comparées à des firmes non apprenantes. Ces dernières utilisent des règles figées de comportements. Cette comparaison a montré que les algorithmes génétiques sont des techniques commodes mais pas exactes pour représenter l'apprentissage des firmes. En effet, cette technique limite l'apprentissage des firmes à une exploration complète de leur espace de stratégies (les taux de profits

des investissements en R&D) mais ne détermine pas des stratégies satisfaisantes pour les différents états de l'environnement (Yildizoglu [180]). De plus, elle doit réellement utiliser chaque stratégie pour pouvoir l'évaluer. Par conséquent l'apprentissage devient très lent.

Pour les problèmes complexes demandant un codage sur des chaînes longues (100 par exemple), la recherche dans un espace entier est impossible vu la croissance exponentielle du nombre d'états de cet espace en fonction de la chaîne binaire (Flake [57]).

### 3.6.2 Les réseaux de neurones

Le réseau prend les données, applique un ensemble de paramètres (les poids) et une fonction de transformation pour produire un résultat. Les réseaux de neurones sont des machines apprenantes puisqu'ils ajustent les poids à l'arrivée de nouvelles données. Ces ajustements ont pour fin l'apprentissage des modèles qui génèrent les données.

Les réseaux de neurones peuvent être constitués de plusieurs couches. Dans ce cas, les données seront considérées comme des entrées pour la première couche et seront traitées par une ou plusieurs couches intermédiaires cachées. Le réseau produit des sorties qui seront comparées aux résultats réels pour déterminer l'erreur. Les poids seront par la suite ajustés afin de réduire cette erreur. Dans leur description de base, les réseaux de neurones sont considérés comme des boîtes noires.

Les réseaux de neurones ont été utilisés par Yildizoglu [178] pour compléter l'apprentissage par les algorithmes génétiques. Ils construisent un modèle de la dynamique de l'économie. Le réseau de neurones servira à évaluer les règles sans les utiliser de manière effective. Il permettra de comparer les décisions d'investissement alternatives en terme de leur résultats compétitifs. L'intégration d'un réseau de neurones et d'un algorithme génétique améliore les résultats (profit, bien être social). Cependant ces résultats sont sensibles au type de réseaux de neurones utilisés.

Les réseaux de neurones ont été utilisés par Barr [13] pour modéliser des firmes et étudier la relation entre la structure de la firme et le niveau d'instabilité et d'incertitude du marché. Dans ce travail, la firme est considérée comme une unité de traitement de l'information. Barr a défini des critères de stabilité et d'incertitude et a étudié le comportement de la firme dans différentes combinaisons de ces critères. Cependant, ce travail n'étudie pas le cas où la firme est en compétition avec d'autres firmes.

Les réseaux de neurones sont tolérants aux fautes (manque d'un neurone). Ils ont une capacité de généralisation et d'apprentissage des poids. Ces systèmes sont considérés comme une boîte noire, étant donné que leurs paramètres sont difficilement explicables dans la réalité, et ne permettent donc pas d'expliquer le comportement des firmes. De plus, leur représentation reste complexe et cette complexité est liée à l'importance de l'espace des états de l'environnement (Sutton [152])

### 3.6.3 L'algorithme Q-Learning

L'algorithme Q-Learning a été défini par Watkins [166] en 1989. C'est un algorithme d'apprentissage par renforcement. Il apprend les qualités associées aux couples "condition - action" à travers l'expérience tout en considérant des récompenses à long terme. Il conserve ces couples avec leur qualité ou évaluation dans des tables.

A chaque période, la qualité correspondante au couple "condition-action" activé est mise à jour :

$$Q(s_{t-1}, a_{t-1}) = Q(s_{t-1}, a_{t-1}) + \beta(r_t + \gamma \max_{a \in A} [Q(s_t, a) - Q(s_{t-1}, a_{t-1})]) \quad (3.1)$$

où  $s_{t-1}, a_{t-1}$  correspondent à la condition et à l'action à l'instant  $t - 1$  et  $r_t$  est la récompense issue de l'application de l'action  $a$  et  $s_t$  est l'action à l'instant  $t$ .

Cet algorithme ne nécessite pas un modèle interne de l'environnement et peut être utilisé dans l'apprentissage (Tesauro [155]). Cependant, il souffre du problème de convergence dans le cas où l'espace des états est étendu.

Le Q-learning a été utilisé par Tesauro [156] pour modéliser des décisions économiques consistant à fixer les prix dans un marché compétitif. Cette décision est prise dans un environnement où tous les agents sont adaptatifs, ce qui en fait un environnement évolutif et dépendant de l'historique. Cet algorithme a été utilisé dans un jeu de taille réduite, limité à deux agents, pour que l'espace des états ne soit pas trop grand et puisse être représenté par les tables de Q-fonctions.

Il a été aussi utilisé par Kutchinski et al. [86] pour déterminer les stratégies des vendeurs permettant de fixer les prix sur un marché. L'utilisation du Q-learning a donné de meilleurs résultats que ceux obtenus par l'utilisation de règles simples pour de tels systèmes. Cet algorithme a été associé à un mécanisme de Boltzmann de choix d'action (voir Chapitre 6) pour sélectionner les prix. Ce mécanisme essaye de trouver un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Le Q-Learning a permis en effet, de converger vers des stratégies optimales par rapport aux autres techniques. Les vendeurs utilisant le Q-learning en prenant en considération leurs rivaux ont développé de meilleures stratégies.

Etant donné que la taille de la table de valeurs utilisée par le Q-Learning et le temps nécessaire à leur remplissage augmentent exponentiellement avec la taille de l'espace des états, la méthode Q-Learning s'avère inadaptée aux problèmes réels où cet espace d'états est important (Wilson [169]). Le Q-Learning ne capte pas les régularités de l'environnement et ne peut donc pas éviter l'explosion exponentielle. C'est ce qui empêche son utilisation dans notre modèle.

### 3.6.4 Les systèmes de classeurs

L'idée de base des systèmes de classeurs est issue des travaux de Holland [71]. Un système de classeurs est un autre système adaptatif qui combine plusieurs systèmes d'adaptation (Flake [57]) en une seule forme qui (i) possède à la fois l'apprentissage et l'évolution et (ii) ressemble à celle utilisée dans les systèmes sociaux, culturels, économiques et autres systèmes compétitifs. Les systèmes de classeurs combinent les algorithmes génétiques et l'apprentissage par renforcement ainsi que la récompense des actions. Ils jouent le rôle d'un pont entre l'évolution et l'adaptation (Flake [57]).

Pour Wilson [169], un système de classeurs apprenant est un système qui cherche à gagner un renforcement à partir de son environnement en se basant sur un ensemble de règles de types "condition-action" nommées classeurs. Le principe de base de ces systèmes est de percevoir l'état de l'environnement, de choisir une action et d'évaluer ensuite les classeurs en fonction de la récompense renvoyée par l'environnement. L'évaluation des classeurs va déterminer la valeur sélective de chaque classeur. Cette valeur sélective sera ensuite utilisée par l'algorithme génétique pour sélectionner les classeurs à reproduire. Deux types de systèmes de classeurs existent. Ils se différencient par leur mode d'application des algorithmes génétiques. L'algorithme génétique est de type Pittsburg quand le génome représente une population de règles et est de type "Michigan" quand le génome représente un seul classeur. Les systèmes de type "Michigan" permettent une adaptation en ligne n'utilisant qu'une seule base de classeurs (Gerard [61]). Nous nous intéressons donc à ce type de systèmes de classeurs.

Contrairement aux algorithmes génétiques, les systèmes de classeurs apprenants ont la capacité de généralisation. Ils associent des stratégies aux états de l'environnement (Yildizoglu [179]). De cette façon les firmes ne sont pas tenues de considérer toutes les stratégies possibles pour tous les états de l'environnement.

Plusieurs systèmes de classeurs ont vu le jour, CS1 de Holland, ZCS, XCS, ACS. Ils se basent tous sur le même principe et se différencient par leur architecture. Ces systèmes seront décrits plus profondément dans la Section 3.8 afin de justifier le choix du système de classeurs XCS utilisé dans ce travail.

Les systèmes de classeurs apprenants ont été principalement utilisés en économie dans le domaine des marchés financiers Schulenburg [133] LeBaron [87]. Ces systèmes se sont appuyés sur le modèle LCS de Holland [72]. Le modèle de Holland est caractérisé par un ensemble de messages internes et par l'évaluation des règles en terme de force (strength). L'ensemble des messages internes définit l'état interne du système et constitue une sorte de mémoire. Ces travaux confirment que les systèmes de classeurs sont une bonne technique de modélisation des agents économiques. LeBaron [87] a utilisé les systèmes de classeurs non pas pour déterminer une stratégie mais pour déterminer les paramètres de prévision. Les classeurs sont évalués en fonction de la précision de la prévision. Le Baron [87] a remarqué que les systèmes de classeurs s'avèrent une forme intuitive d'aborder

les comportements basés sur les règles dans les marchés financiers mais contiennent des complications -d'ordre pratique- qui rendent leur implémentation ardue.

Schulenburg et Ross [133] ont utilisé les systèmes de classeurs pour représenter des commerçants en compétition dans un scénario de marché réel. Dans ce marché, les prix et les dividendes journaliers sont transmis aux agents d'une manière exogène afin de mettre l'accent uniquement sur le comportement des commerçants tout en occultant l'effet de leurs actions sur le marché. Un ensemble d'agents commerçants, se différenciant par l'information qu'ils reçoivent, sont considérés. Schulenburg et al. [133] ont conclu que les systèmes de classeurs sont capables de représenter des commerçants en compétition. Ces agents ont permis de trouver de bonnes règles en exploitant l'inertie du marché. Cependant, ce modèle n'intègre pas l'impact des agents sur le marché alors qu'il s'agisse d'une dimension réelle.

Le système LCS a été aussi utilisé par Mitlohner [107] pour modéliser une prise de décision simple permettant de trouver le prix optimal d'un produit à l'instant  $t$  en se basant sur les données à l'instant  $t - 1$ . Mitlohner a comparé les résultats trouvés par le système de classeurs à ceux trouvés par un humain. Il a montré que les systèmes de classeurs permettent d'obtenir un prix optimal mais que leur vitesse d'apprentissage est insatisfaisante. Ce travail a été utilisé dans un système mono-agent.

LCS a été aussi utilisé par Rivero et al. [126] pour modéliser des agents qui prennent leurs décisions en se basant sur l'anticipation de l'état futur de l'environnement. Cette anticipation est exprimée par le calcul de l'utilité estimée. Il s'agit d'une valeur exprimant le bonheur attendu de l'agent suite à l'application de l'action considérée. Cette utilité est calculée en fonction de l'historique de l'environnement et de l'évolution de l'utilité. Ce travail montre qu'un classeur est une implémentation correcte du modèle anticipatif de l'agent. Cependant, ce travail s'est limité à la présentation du modèle sans l'appliquer.

Les modèles récents de systèmes de classeurs, tels que XCS, sont plus concernés par l'apprentissage et les prévisions à travers l'inclusion des erreurs de prédiction dans l'évaluation de la fitness des classeurs. Le système XCS a été utilisé par Yildizoglu [180] pour modéliser les firmes basées sur le modèle de Nelson et Winter [108]. La partie condition des classeurs est représentée par une chaîne de 8 bits représentant certains indicateurs telles que l'augmentation ou la stagnation du prix du marché. La récompense<sup>2</sup> a été définie par le taux de profit ou la productivité du capital. Les expériences ont montré que ce système est plus adapté que les algorithmes génétiques pour l'apprentissage des firmes. Il est plus efficace pour faire face à la dynamique des technologies. Ce système n'a été testé que dans un environnement homogène. Quatre populations de firmes homogènes ont été comparées. Ce travail n'a donc pas essayé ces firmes dans des populations hétérogènes. De plus, ces systèmes ont été appliqués sans tenir compte de leur vitesse d'apprentissage.

XCS a été utilisé aussi par Bagnall [9] pour modéliser un agent adaptatif permettant de faire des offres dans le domaine de la génération d'électricité pour le marché anglais.

---

<sup>2</sup>reward

L'architecture d'agents définie dans ce travail utilise deux systèmes de classeurs différents. Le premier système  $CS_A$  développe un ensemble de règles garantissant que l'agent ne subira pas de pertes et le deuxième système  $CS_B$  permet de découvrir des règles maximisant le profit. Ces deux systèmes sont des versions modifiées du système de classeur XCS. Ils sont en relation avec un contrôleur qui estime les récompenses des actions en fonction de leurs deux objectifs et cible l'objectif sur lequel il faut mettre l'accent. Si ce contrôleur trouve que la prédiction d'un des systèmes de classeurs est inacceptable, il va lui faire parvenir une demande de couverture (création d'un nouveau classeur). Cette architecture permet aux agents de se comporter comme dans un système réel. Les stratégies générées sont comparables aux stratégies réelles. Cette architecture n'a toujours pas été essayée dans des environnements dynamiques.

### 3.7 Discussion

Une bonne technique d'adaptation du processus de décision des firmes doit tenir compte des aspects suivants :

- répondre aux variations du marché qui surviennent à court et long termes,
- agir continuellement,
- être dotée d'un pouvoir explicatif,
- considérer son expérience du passé pour ne pas reproduire les mêmes erreurs,
- être capable de construire un modèle de l'environnement en ne disposant que des informations locales et de celles publiées par les autres firmes,
- être capable d'anticiper les effets des actions sans les utiliser réellement,
- être capable de fournir des solutions dans un environnement où l'espace des états possibles est très étendu.

Les réseaux de neurones ne sont pas très appréciés en économie car d'une part il est difficile de construire un réseau de neurone capable de reproduire avec exactitude le cerveau humain, puisqu'on ne dispose pas de toutes les informations. D'autre part, les réseaux de neurones agissent comme des boîtes noires. Ils ne peuvent expliquer le comportement de la firme tel qu'il est désiré par les chercheurs en économie. De plus, ils deviennent très complexes lorsqu'il s'agit d'un espace d'états important. Les réseaux de neurones souffrent d'explosion combinatoire.

Le Q-learning a les mêmes inconvénients. Il souffre d'un manque de convergence quand l'environnement est dynamique et l'espace des états de l'environnement est large.

Les algorithmes génétiques font une recherche dans l'environnement mais n'associent pas les états de l'environnement à des actions précises. Les algorithmes génétiques ne prennent pas en considération les états de l'environnement qui ne peuvent pas être anticipés. Les tables de recherches qu'ils utilisent n'ont pas de mémoire locale et doivent représenter à chaque fois tous les états de l'environnement, ce qui devient irréalisable quand ce dernier est très important (Flake [57]). De plus, les algorithmes n'ont pas la capacité de généralisation permettant de construire un modèle de l'environnement.

La programmation génétique présente quelques problèmes quant à l'interprétation des opérateurs génétiques (croisement et mutation) puisque nous codons ici des formules et non pas des stratégies (Brenner [25]).

Nous optons donc pour les systèmes de classeurs. Ces systèmes permettent à la firme de :

- construire graduellement un modèle de son environnement sous la forme de règles,
- raisonner sur ce modèle pour évaluer chaque action avant son utilisation,
- évaluer ces actions.

Les systèmes de classeurs apprenants combinent une composante d'apprentissage par renforcement et une composante d'évolution pour modéliser un système adaptatif. Ils raisonnent sur l'état courant, en utilisant leur expérience, les situations qu'ils ont déjà rencontrées, les actions qu'ils ont entreprises et les récompenses qu'ils ont attribuées à leurs actions. Ils utilisent leur expérience et non pas celle de leurs prédécesseurs tel est le cas des algorithmes génétiques (Flake [57]). Ces systèmes permettent de généraliser en exploitant des régularités dans la dynamique de l'agent et de son environnement (Gérard [61]).

## 3.8 Les différents types de systèmes de classeurs

De nombreux systèmes de classeurs apprenants sont apparus LCS, ZCS (Wilson [172]), (XCS(précision) [173], ACS (anticipation) [150], FCS (Flous) [20], etc.). Ces systèmes sont présentés brièvement dans les sections suivantes.

### 3.8.1 Le LCS de Holland

Le système de base de Holland LCS utilise une quantité nommée « force » pour évaluer les classeurs. Cette « force » est obtenue par un algorithme « Bucket brigade » qui utilise la rétro-propagation de la récompense environnementale sur les classeurs. Elle constitue une valeur sélective pour les algorithmes génétiques.

Ce système est également caractérisé par une liste de messages. Cette liste inclut les messages traduisant la perception de l'environnement et ceux traduisant les actions ou les messages de sorties. Si la condition d'un classeur est appariée à un message de la liste, le classeur est activé et les messages qui ont activé ce classeur sont ultérieurement éliminés. Le classeur envoie ensuite sa partie action à la liste de messages. Les messages qui peuvent être interprétés sont transformés en action et sont ensuite supprimés. D'autres messages vont rester dans la base et sont appelés « messages internes ». L'ensemble de ces messages définit l'état interne du système.

Ces messages constituent la mémoire de l'agent, sans laquelle, l'agent serait purement réactif (Gérard [61]). Cependant, les systèmes LCS sont pénalisés par un ralentissement de l'apprentissage suite à un accroissement important du nombre de messages internes. Ce nombre augmente à son tour l'espace de recherche des algorithmes génétiques.

### **3.8.2 ZCS**

ZCS, défini par Wilson [172], a la même structure que XCS à part qu'il n'utilise pas la liste des messages. Il n'a donc plus de mémoire et n'est valide que dans le cas des problèmes Markoviens. Il devient réactif et ne fonde ses décisions que sur la situation perçue. Il est donc plus simple que le modèle de Holland. Son utilisation a révélé que la force est inadéquate comme mesure sélective quand on est en présence d'une chaîne d'actions successives.

### **3.8.3 XCS**

XCS a résolu le problème de chaînes d'actions en apprenant un modèle de la fonction de récompense. Il remplace la mesure de force par une mesure de prédiction qui représente la récompense attendue quand le système applique l'action à la condition correspondante. Cette quantité est déterminée par le « Q-learning » et non pas par le « Bucket brigade ». XCS se distingue aussi par l'utilisation de la généralisation pour diminuer le modèle de récompense. La généralisation réduit le nombre de classeurs en les regroupant dans des classeurs plus généraux, ceux ayant des conditions similaires et proposant la même action.

### **3.8.4 ACS**

Les systèmes anticipatoires tels que ACS [150], YACS et MACS [61] rajoutent l'anticipation de l'état futur de l'environnement à la fonction de récompense. Le classeur dans ACS contient donc en plus une partie effet permettant d'établir une relation entre l'état antérieur et ultérieur à l'exécution de l'action. Ils sont aussi caractérisés par une quantité permettant d'évaluer la qualité de cette anticipation. Ces systèmes n'utilisent plus les algorithmes génétiques pour l'évolution de leur base de règles mais les remplacent par des heuristiques. L'utilisation d'un tel système dans le cadre d'un système dynamique est impossible puisque l'état suivant de l'environnement ne dépend pas uniquement de l'action de l'agent mais dépend aussi de tous les autres agents dans l'environnement. Nous ne pouvons donc l'utiliser dans le cadre de notre travail.

### 3.9 Conclusion

Cette revue des systèmes de classeurs apprenants nous a permis d'opter pour XCS puisqu'il traite des problèmes complexes (Holmes et al. [73]). Il apprend un modèle de la fonction de récompense attendue alors que les modèles précédents ne cherchent qu'à trouver une solution au problème de maximisation de la fonction de récompense attendue (Gérard [61]). Le système XCS détecte et représente les régularités de l'environnement. Il en résulte que la complexité de l'apprentissage dans XCS n'est pas dépendante de la largeur de l'espace, comme c'est le cas du Q-learning et des réseaux de neurones. Elle est dépendante de la complexité de l'environnement (Wilson [169]). XCS construit un ensemble de règles lisibles permettant de comprendre la façon avec laquelle le système est en train de s'adapter à un problème spécifique ou à un environnement changeant (Miramontes [105] Bonarnini [20]), ce qui présente un grand avantage dans le contexte des systèmes économiques.

D'après Holmes et al. [73] XCS peut traiter des problèmes d'apprentissage complexes insolubles par les modèles précédents (LCS, ZCS). Il produit des solutions extrêmement compactes constituées d'un nombre réduit de classeurs généraux. Kovacs [85] a montré que XCS découvre des classeurs fiables : dans chaque situation appariée à la condition d'un classeur, choisir l'action proposée mène toujours au même cumul de récompenses. Un classeur fiable a donc une erreur faible et par conséquent une valeur sélective forte. Ceci fait de XCS le système de classeurs apprenants le plus étudié, le plus élaboré et le plus appliqué. Nous choisissons XCS pour modéliser les firmes.

Les travaux utilisant les systèmes de classeurs pour modéliser les processus de décision des firmes tel que celui de Yildizoglu [179] se basent dans leur perception du monde réel sur une représentation binaire qui ne traduit pas d'une manière précise le monde réel. D'autres travaux tel que celui de Bagnall [9] ont utilisé ces systèmes dans un contexte statique. De plus, toutes les simulations se sont limitées à l'utilisation directe de ces systèmes sans tenir compte des problèmes qu'ils peuvent engendrer tel que le dilemme d'exploration/exploitation, la convergence, etc. Notre modèle se différencie des travaux existant par l'utilisation des systèmes de classeurs dans un contexte dynamique, par la considération d'un nombre important de paramètres de différentes natures dans la perception des firmes et par le traitement du problème d'exploration/exploitation très important en apprentissage.

Nous proposons donc d'utiliser ces systèmes dans un contexte dynamique et complexe. Le système de classeur sera utilisé pour modéliser le processus de décision des firmes, dont la modélisation selon la théorie basée sur les ressources fera l'objet du chapitre suivant.



Deuxième partie

Modélisation



# Chapitre 4

## Les firmes

### 4.1 Introduction

Les travaux récents en économie visent à étudier les systèmes économiques par une approche ascendante (bottom-up). Cette approche nécessite la modélisation des unités de base du système économique (agents économiques) ainsi que l'analyse de leur comportement et leurs interactions. Le but de cette modélisation est de déduire les tendances du système dans son ensemble.

Les chercheurs en économie tels que Coutinet [38], Thornhill et Amit [158] se sont particulièrement intéressés à l'identification et à l'analyse des facteurs de florès ou déconfiture (succès ou échec) des firmes pour expliquer les divergences de leurs performances.

Les approches basées sur les compétences telles que les approches évolutionnistes (Nelson et Winter [108], Schumpeter [134]), la théorie des ressources (Penrose [112], Barney [12], Tywoniak [163]), permettent de fournir des explications plausibles pour comprendre le comportement des firmes en tenant compte de leur environnement concurrentiel. Elles associent, donc, certains comportements organisationnels aux modifications de l'environnement des firmes et des nouvelles conditions de compétitivité.

Ce chapitre est consacré à la modélisation des firmes en se basant sur l'approche par compétence et à l'identification des critères permettant leur survie dans un environnement concurrentiel. Une firme est considérée, dans ce travail, comme une entité autonome capable de prendre des décisions. Ce chapitre est organisé comme suit. La deuxième section présente plus en détail l'approche par les compétences. La troisième section présente la théorie des ressources que nous utiliserons dans notre travail. Cette présentation a pour but de mettre en valeur les caractéristiques de la firme selon la théorie des firmes basée sur les ressources. La quatrième section décrit MORE, notre modèle.

## 4.2 L'approche à base de compétences

L'approche à base de compétence définit la firme en fonction de ce qu'elle est capable de faire. La notion de compétence est interprétée d'une manière différente selon les théories. Elle est traduite :

- en terme de *routines* dans la théorie évolutionniste (voir Section 2.3.2). La routine caractérise les capacités de la firme. La capacité définit l'habileté (skill), l'expérience et la connaissance que la firme possède (Richardson [124]). Les routines sont considérées par Zollo et Winter [184], comme étant des modèles ou "patterns" stables de comportements qui caractérisent la réaction de la firme à un stimulus interne ou externe. Ces routines peuvent être opérationnelles ou administratives (Nelson et Winter [108]). Les routines opérationnelles correspondent à l'exécution de procédures connues alors que les routines administratives correspondent à la recherche de nouvelles procédures. Les compétences s'en différencient par le fait qu'elles peuvent décrire ce que la firme peut faire. La compétence est en effet une mesure de la capacité de la firme à résoudre à la fois les problèmes techniques et organisationnels,
- en terme de *ressources* dans la théorie des firmes basée sur les ressources (voir Section 2.3.2). Les ressources incluent en même temps des caractéristiques physiques, financières, humaines et organisationnelles. Durand [50] considère qu'une ressource est plus précise qu'une compétence. Les ressources sont idiosyncrasiques, tacites, inimitables et difficilement échangeables. Ces ressources et compétences sont spécifiques à la firme et sont la source de son avantage concurrentiel<sup>1</sup>.

## 4.3 La théorie de la firme basée sur les ressources

Le modèle de firme sur lequel se base notre travail se fonde sur la théorie de la firme basée sur les ressources. Nous entamerons cette section par l'énumération des caractéristiques de cette théorie pour passer ensuite à la définition des firmes.

### 4.3.1 Hypothèses de la théorie basée sur les ressources

Tywoniak [163] a remarqué que le modèle de firme basé sur les ressources est en étroite relation avec les théories évolutionnistes en économie et en sociologie. Il permet une analyse équilibrée et pertinente de la stratégie des firmes. Sa conception de la firme conduit à des représentations plus réalistes tant pour le praticien que pour le chercheur (Tywoniak [163]). Le courant des ressources peut être considéré comme un bon point de départ pour l'analyse des forces et des faiblesses relatives des firmes (Rugman et al. [130]). Il est basé sur les hypothèses suivantes :

---

<sup>1</sup>la valeur qu'une firme peut créer pour ses clients en sus des coûts supportés par la firme pour la créer (Porter [117])

- les processus organisationnels sont considérés comme des ensembles de routines (Grant [64]) formant une "mémoire organisationnelle" (Girod [62]),
- la rationalité des acteurs est limitée (2.2.2.1) : les dirigeants de la firme ont une image des opportunités stratégiques, qui peut être influencée soit par la modification des conditions concurrentielles, soit par l'acquisition des connaissances (Durand [50]). La firme ne dispose pas de tous les éléments lui permettant de faire le meilleur choix d'actions, et la rationalité de ce choix serait limitée (Simon [137]). Cette notion est liée aux capacités restreintes dans la réception, le stockage et le traitement de l'information et de la communication,
- la firme évolue dans un environnement sélectif.

### 4.3.2 La firme selon la théorie basée sur les ressources

La définition de base de la firme en terme de ressources est celle de Penrose [112] :

**Définition 2** *Une firme n'est pas uniquement une entité administrative qui lie et coordonne les activités de nombreux groupes d'individus mais est également une collection de ressources productives et de compétences<sup>2</sup> pour lesquelles des décisions de gestion sont prises au cours du temps quant à leurs différents usages. Les ressources sont de deux types :*

- *physiques (usines, équipements, terrains matière première, etc.),*
- *humaines ( travail qualifié ou non, etc.).*

Des définitions plus précises ont été par la suite proposées par Grant [64], Barney [12]. Ces définitions regroupent les ressources en quatre catégories :

- le capital financier,
- le capital physique,
- le capital humain qui inclut la formation, l'expérience, les relations, le discernement des managers et des travailleurs de la firme,
- le capital organisationnel qui comprend la structure de la firme, ses plans, ses systèmes de contrôle, sa culture et sa réputation, les relations informelles entre la firme et le marché.

Grant [64] opte pour une classification en ressources physiques et humaines, financières, organisationnelles, technologiques et de réputation. Les configurations des ressources, permettant de tirer profit de l'avantage concurrentiel des firmes, ne sont pas connues a priori.

Une compétence correspond à la capacité d'un ensemble de ressources à réaliser une tâche ou une activité (Grant [64]). Les compétences sont regroupées en général selon leur

---

<sup>2</sup>Le terme "aptitude" est aussi utilisé pour désigner les compétences dans les travaux dans le courant des ressources

niveau d'agrégation : les compétences opérationnelles<sup>3</sup>, les compétences fonctionnelles<sup>4</sup>, les compétences organisationnelles<sup>5</sup> et les compétences dynamiques<sup>6</sup>. Ces dernières incluent les capacités d'adaptation aux changements (Plunket [114]). Chaque firme développe un style de traitement de l'information qui lui est propre en fonction de sa base de savoir originelle, où dominant soit théorisation et codage (exploration) soit intégration et utilisation (exploitation). Les firmes qui favorisent l'exploration sont des firmes innovatrices, mais ont parfois du mal à exploiter les connaissances nouvelles. celles qui favorisent l'exploitation savent aisément intégrer des savoirs déjà connus mais doivent parfois faire appel à des compétences extérieures pour développer de nouveaux concepts (Tywoniak [163]). L'avantage concurrentiel est obtenu par un choix judicieux des compétences en fonction du contexte. Plus la concurrence est forte, plus l'environnement est instable et plus la firme a besoin de compétences sophistiquées (Tywoniak [163]). Ces compétences nécessitent d'être améliorées par un apprentissage continu par essais erreurs par exemple.

La croissance de la taille et de la performance des firmes est limitée par les opportunités de production. Elle est fonction de la collection de ressources productives contrôlées par la firme et du cadre administratif employé pour coordonner l'utilisation de ces ressources. Il s'en suit que la manière dont les ressources sont utilisées en fonction des possibilités qu'elles offrent, est plus importante pour l'activité de la firme que la détention effective des ressources elles-mêmes.

Pour Penrose [112], la gestion des ressources et leur allocation ont pour but essentiel l'accroissement des profits à long terme. *Penrose explique la croissance de la firme par la présence de ressources indivisibles en excès à l'intérieur de celle-ci. Ces ressources doivent être bien exploitées pour couvrir leur coût et dégager un profit. Pour ceci, les firmes doivent développer, acquérir ou se procurer d'autres ressources, de divers origines, sur le marché* (Durand [50]). Rugman [130] a synthétisé un ensemble de caractéristiques de la firme quand elle est modélisée par la théorie des ressources :

- la firme a pour objectif final la réalisation de résultats performants et viables par rapport à ceux de ses concurrents. Ces résultats sont mesurés en terme de croissance ou de recherche de profits à long terme,
- la rareté des ressources de la firme, leur difficulté d'imitation<sup>7</sup>, leur non substitution par d'autres ressources ainsi que leur durabilité, accentuent l'hétérogénéité, en terme de ressources et de compétences des firmes. L'accroissement de ces facteurs stimule l'avantage concurrentiel et le rend plus durable. En effet, dans le courant des ressources, les profits ne sont pas dégagés par une réduction du coût de production mais surtout par le pouvoir dégagé par la possession de ressources rares ou exclusives,

---

<sup>3</sup>appliquées à des activités productives

<sup>4</sup>appliquées à des activités de soutien

<sup>5</sup>de diagnostic, de prise de décision, etc.

<sup>6</sup>d'innovation d'apprentissage, etc.

<sup>7</sup>difficilement captables par les concurrents, car intransmissibles (voir Nelson [108]) ou protégées par les lois sur la propriété intellectuelle (Grant [64]) ou coûteuses à copier

- l’innovation de la firme spécialement en terme de combinaisons de nouvelles ressources ou de l’utilisation des ressources peu ou mal utilisées, peut contribuer considérablement à de meilleurs profits, dans une perspective dynamique.

Nous proposons une modélisation de la firme selon cette approche par les ressources. Contrairement aux autres approches, cette approche étudie simultanément la relation entre la firme et le marché (voir Section 2.3.2).

## 4.4 MORE : un MODèle de firme basé sur les REssources

Notre modèle de firme a été élaboré en collaboration avec Rodolphe Durand (Professeur en management à HEC). Il est basé sur le modèle qu’il a proposé dans sa thèse (Durand [49]). Cette section décrit les caractéristiques ainsi que le comportement d’une firme.

### 4.4.1 Caractéristiques d’une firme

Dans MORE une firme est caractérisée par les paramètres suivants :

**Un ensemble**  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  représentant le portefeuille de l’entreprise en ressources et compétences. Ces  $x_i \in \mathbb{N}$  étant donné que les ressources sont indivisibles. Elles sont des variables ordinales qualitatives. Les valeurs de ces variables évoluent en fonction du développement de la firme et de sa stratégie d’investissement.

**Une période**  $P$  indiquant le rythme de mise à jour des ressources.

**Un ensemble**  $Y = \{\mathbf{Prof}, \mathbf{Mark}\}$  définissant les performances de la firme. Ces variables correspondent à *la profitabilité* et à *la part de marché* de la firme. Elles sont la conséquence de ses choix stratégiques. Elles sont déterminées par la combinaison des variables latentes, obtenues par la transformation des ressources, selon les formules 4.4.1 et 4.3 :

$$Prof(t) = 0.41 * \xi_1 - 0.09 * \xi_2 + 0.12 * \xi_3 + 0.14 * croissance(t). \quad (4.1)$$

où

- les constantes (0.41, 0.09, 0.12, 0.14) de ce modèle sont des valeurs fixées par Rodolphe Durand selon le modèle de Lisrel expliqué plus en détail dans la Section 4.4.2. Elles indiquent l’importance des caractéristiques des ressources dans la détermination des performances,
- les  $\xi_i$  correspondent aux valeurs latentes déterminées par la transformation des ressources selon le modèle de Lisrel,
- la variable *croissance*, par contre, décrit la croissance des ventes de la firme.

$$croissance(t) = \frac{\sum QV(t) - \sum QV(t-1)}{\sum QV(t-1)} \quad (4.2)$$

$QV(t)$  représente la quantité vendue à l'instant  $t$ . La part de marché par contre est exprimée par :

$$Mark(t) = 0.41 * \xi_2 - 0.2 * \xi_3 - 0.3 * conc(t) \quad (4.3)$$

où  $conc(t)$  définit la concentration du marché à l'instant  $t$ .

$$conc(t) = \ln(m(t)) \quad (4.4)$$

et  $m(t)$  représente le nombre de firmes sur le marché à l'instant  $t$ .

**Un capital  $K$**  accentuant la différence concurrentielle entre les firmes. Le capital de départ de la firme représente la valeur de son portefeuille initial en ressources et en compétences. Il est réactualisé à chaque période  $P$  selon l'équation suivante :

$$K(t) = \sum_{i=0}^n x_i * C_X + 0.25 * Prof(t-1) \quad (4.5)$$

où les  $x_i$  correspondent aux différentes ressources,  $C_X$  est le coût d'une unité de ressource et  $Prof$  définit la profitabilité de la firme.

**Un budget R&D :** *Budget* utilisé par la firme pour modifier son portefeuille de ressources et de compétences. L'évolution du budget dépend du profit réalisé :

$$Budget(t) = CapIntel(t) + 0.25 * profit(t-1) + resteBudget - Co * QV(t-1) \quad (4.6)$$

où

- *CapIntel* est la partie du capital qui peut être investie en recherche et développement,
- *profit* est le profit réalisé par unité vendue,
- *quantVendue* est la quantité vendue de produits ou de services,
- *resteBudget* est le montant du budget restant de la période précédente ;
- *Co* représente le coût d'obsolescence. il est fixé en fonction de l'évolution de la performance de la firme :

$$Co = \begin{cases} 0, & \text{si Prof} > \text{ProfMoyenne} ; \\ \frac{C}{2}, & \text{autrement.} \end{cases} \quad (4.7)$$

où  $C$  est le coût de production. La valeur initiale  $C_0$  de ce coût correspond à un coût de production indépendant du volume. *ProfMoyenne* correspond à la profitabilité moyenne sur le marché.

$$C_{x_i} = x_i^\alpha \quad (4.8)$$

et  $\alpha$  est un coefficient défini par l'expert. Il évalue le coût de la ressource  $x_i$  à chaque période.

Un ensemble  $S = \{S_1, \dots, S_l\}$  de stratégies tendant, implicitement ou explicitement, vers l'exploitation des ressources étant donné que l'avantage concurrentiel repose sur la mise en oeuvre de ressources et de compétences (Tywoniak [163]). De ce fait, chaque stratégie définit la politique d'investissement de la firme. Cette politique d'investissement est exprimée sous forme de priorités affectées aux ressources et compétences. Par exemple, pour une stratégie, orientée production il vaut mieux affecter les priorités les plus importantes pour les ressources exprimant les ressources productives. Plusieurs techniques d'affectation du budget aux ressources selon ces priorités peuvent être utilisées. Ces techniques différencient les firmes. Voici deux techniques à titre d'exemple : La première consiste à augmenter chaque ressource d'une unité dans l'ordre décroissant des priorités et ce dans les limites du budget disponible. La seconde par contre, consiste à affecter le maximum possible d'unités à la ressource la plus prioritaire et à affecter le reste du budget au reste des ressources en fonction de leur coût unitaire. Cette technique est plus risquée puisqu'elle mise sur une seule ressource. Elle peut par contre différencier la firme de ses concurrents. Dans le cas où son budget est nul, la firme peut renoncer à certaines ressources. Elle choisit cette fois les ressources les moins prioritaires. Ce renoncement va lui offrir l'opportunité de réinvestir le montant récupéré dans des ressources prioritaires. Le choix des stratégies est donc d'une grande importance pour la firme : il permet d'une part sa survie à condition bien sûr de choisir une bonne stratégie. D'autre part, il définit sa politique d'actions.

La firme est aussi caractérisée par un ensemble d'autres indicateurs tels que :

le **profit**  $profit$  décrit le profit dégagé par unité de capital. Il correspond à un rapport entre la profitabilité de la firme et son capital :

$$profit(t) = \frac{Prof(t)}{K(t)} \quad (4.9)$$

Le **prix de vente**  $PrixVente(t)$  défini par la combinaison du profit, et de la portion de budget utilisée pour chaque entité produite. Il est exprimé par :

$$PrixVente(t) = profit(t) + \frac{Budget(t)}{Qproduite(t)} \quad (4.10)$$

La **valeur de la quantité vendue**  $QV$  déterminée en fonction de la demande du marché. Elle est exprimée par :

$$QV(t) = A * prixVente(t) + \frac{B}{nbFirmes(t)} \quad (4.11)$$

où  $nbFirmes$  est le nombre de firmes sur le marché à l'instant  $t$  et A et B sont les variables de la fonction de demande.

#### 4.4.2 Le modèle de Lisrel

Le modèle de Lisrel transforme les variables observables  $X_i$  en variables latentes  $\xi_j$  à travers des matrices de covariance. Ce modèle attribue des valeurs aux X en ayant de l'information manquante.

Les ressources  $X$  sont transformées en variables latentes telles que la non transférabilité des ressources productives  $\xi_1$ , la non imitabilité des relations avec les clients  $\xi_2$ , la non imitabilité des relations avec les fournisseurs  $\xi_3$ . Les variables latentes sont reliées aux variables  $X$  comme suit :

- l’idiosyncrasie des ressources productives  $\xi_1$  exprimée par deux variables. L’importance de la fonction R&D dans les plans de la firme (*ImpRD*), et le taux de différenciation engendré par la technologie associée à la firme (*Diff*),
- l’idiosyncrasie des relations avec les fournisseurs  $\xi_2$  évaluée à partir des trois variables suivantes : (i) le coût subit par la firme pour le changement de ses fournisseurs principaux (*CoûtFourn*), (ii) le coût subit par les fournisseurs pour changer leurs clients à savoir la firme elle même (*CoûtFournFirme*) et (iii) le comportement de la firme relatif à la pression qu’elle fait subir à ses fournisseurs en examinant les offres compétitives (*CompFourn*),
- l’idiosyncrasie des relations avec les clients  $\xi_3$  évaluée à partir des trois variables suivantes : (i) le coût subit par la firme pour le changement de ses clients principaux (*CoûtClient*), (ii) le coût subit par les clients pour changer leurs fournisseurs à savoir la firme elle même (*CoûtClientFirme*) et (iii) le fait que la firme ait entrepris des investissements spécifiques pour ses clients montre que la relation qu’ils entretiennent est idiosyncrasique et non pas seulement une pure relation de marché (*InvSpec*).

Ces relations son définies par les équations suivantes :

$$\xi_1 = 0.73 * Funrd + Diff + 0.18 * \xi_2 + 0.13 * \xi_3 + 0.14 * growth \quad (4.12)$$

$$\xi_2 = 1.06 * CotFourn + 0.68 * CotFournFirme - CompFourn + 0.18 * \xi_1 + 0.19 * \xi_3 \quad (4.13)$$

$$\xi_3 = CotClient + 0.73 * CotClientFirme + InvSpec + 0.13 * \xi_1 + 0.19 * \xi_3 + 0.26 * concentration \quad (4.14)$$

Les variables latentes ainsi obtenues sont à leur tour transformées pour dériver la performance de la firme exprimée par les variables *Prof* et *Mark* qui représentent respectivement la profitabilité et la performance du marché.

#### 4.4.3 Comportement d’une firme

Le comportement de la firme est décrit par la Figure 4.1. A chaque période, la firme commence par déterminer sa position relative sur le marché et les conditions de ce dernier en fonction de ses propres paramètres et de sa perception des performances des firmes

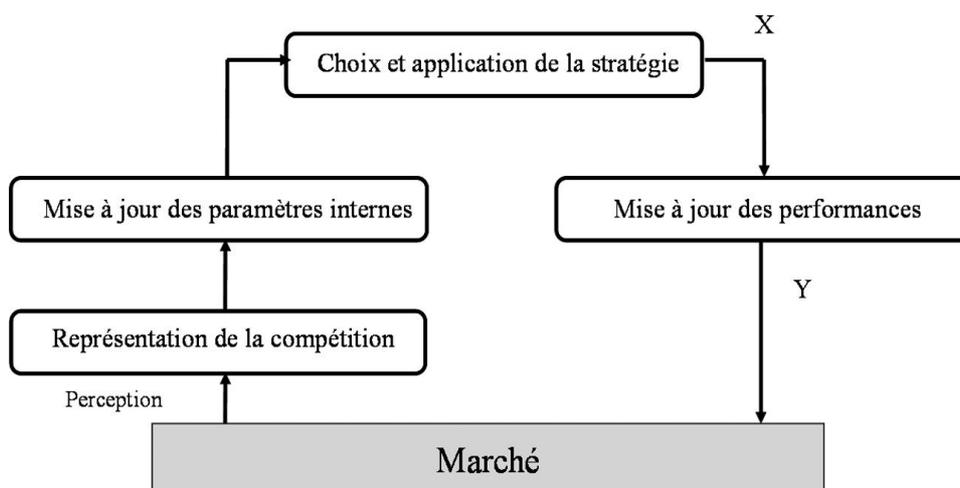


FIG. 4.1 – Cycle du comportement de la firme

concurrentes sur le marché. L'analyse de la concurrence par la firme au sein d'une industrie doit tenir compte à la fois des concurrents reconnus, qui visent les mêmes segments de marché, et les concurrents potentiels, qui disposent de ressources similaires (Chen [36]). Cette analyse est difficile à effectuer étant donné le contexte compétitif et l'incapacité de la firme à accéder à d'autres informations que celles rendues publiques par ses concurrentes telles que leurs capitaux, leurs profitabilités et leurs parts de marché. La firme ne dispose donc que d'une vue partielle du marché mais peut par les techniques d'agrégation et au fur et à mesure de son expérience construire une représentation de ce marché. La firme met à jour ses paramètres internes tels que le capital et le budget en fonction des différentes équations présentées dans la section 4.4.1.

Une fois le budget réactualisé, la firme doit choisir une stratégie bien adaptée à la situation actuelle du marché. Cette tâche est critique étant donné que le choix d'une stratégie qui va à l'encontre de l'évolution du marché peut être fatal pour la firme. La difficulté de cette décision émane de la complexité du marché dans lequel la firme évolue (Voir section 2.2.2.3 du Chapitre 2). La firme doit donc, essayer de combiner sa perception de l'environnement avec les connaissances acquises à travers son expérience passée, pour raisonner sur l'état actuel de ce dernier et prendre la décision la plus adéquate.

Une fois la stratégie sélectionnée, elle est exécutée. Elle conduit ainsi, à une nouvelle combinaison de ressources et de compétences  $X$ . Ces ressources vont être, par la suite, transformées par le modèle de Lisrel et combinées à d'autres paramètres pour déterminer les performances (Voir équations 4.1 et 4.3). Les performances ainsi obtenues sont envoyées sur le marché.

Durand [50] a décrit le choix de stratégie en terme de processus VSR (Variation, Retention, sélection) : la variation correspond aux mutations des ressources et aptitudes. Elle n'est pas tirée au hasard parmi un ensemble de possibles mais est orientée par ses résultats et ses conséquences. La sélection par contre procède à l'élimination des variations

les moins adaptées relativement aux différentes variations générées et aux conditions environnementales. La rétention permet aux variations sélectionnées d'être conservées sous diverses formes par l'entité correspondante (Durand [50]).

## 4.5 Conclusion

Nous avons modélisé, dans ce chapitre, l'entité de base de notre simulation qui est la firme. Le modèle économique utilisé est simple. Il permet de comprendre l'évolution du comportement de la firme dans un environnement dynamique et complexe.

La firme est ainsi considérée comme une entité :

- capable de prendre ses décisions sans l'intervention d'un tiers. Elle se base pour ceci sur sa perception de son environnement ainsi que sur ses connaissances,
- en interaction avec le marché composé des autres firmes ainsi que par les formes organisationnelles,
- proactive dans sa relation avec le marché qui est dynamique, complexe et incertain. Sa survie dépend de son habilité à modifier ses ressources et compétences en fonction du changement du marché,
- ayant une rationalité limitée (voir Section 2.2.2.1 du Chapitre 2) étant donné qu'il existe au moins deux séries de facteurs influençant le processus de prise de décision : d'une part les capacités cognitives et les compétences sociales de l'équipe de direction de la firme et d'autre part les techniques de modélisation de la concurrence et la capacité à gérer les processus de décision concurrents.
- dont les décisions peuvent entraîner des comportements sous-optimaux par l'application d'actions inadaptées au contexte.

Les quatre dernières caractéristiques de la firme montrent qu'il est nécessaire à cette dernière de mieux connaître le marché. Cette connaissance lui permettra de définir avec plus de précision et de clairvoyance les choix qui lui sont proposés pour déterminer sa stratégie et lui éviter ainsi de prendre des décisions non appropriées compte tenu des contraintes imposées par le marché. Bourgeois [22] indique que la perception du marché est d'une grande importance pour l'élaboration de la stratégie de la firme. Elle lui permet de mettre à jour ses prévisions afin qu'elles ne soient pas obsolètes. Le même marché peut être perçu de différentes manières par les firmes et engendrer différentes stratégies.

Il est donc important pour la firme d'identifier les mutations de son marché pour que ses prévisions ne soient pas obsolètes et erronées. Il est nécessaire à la firme de percevoir les changements en temps réel et d'en tenir compte. Elle peut ainsi s'adapter à ces changements.

Les caractéristiques de la firme selon la théorie basée sur les ressources permettent de conclure que la firme peut être représentée par un agent et que cet agent doit être en plus doté d'une capacité d'adaptation. La modélisation de la firme par un agent adaptatif fera donc l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre 5

## Les firmes adaptatives

### 5.1 Introduction

L'adaptation est un terme général décrivant une période de changements graduels, incrémentaux et continus, en réponse à des conditions environnementales (Tushman et Romanelli [162]). La firme s'adapte à l'évolution de son marché et mobilise ses ressources pour être en cohérence avec ce marché. La firme doit identifier des réponses pour assurer sa survie et sa croissance (Gueguen [66]).

L'adaptation va conduire la firme à un avantage concurrentiel. Elle est particulièrement pertinente pour les marchés où la concurrence est dynamique. Une capacité supérieure d'exploration du marché ainsi qu'une capacité à aligner sa stratégie et sa structure aux conditions de son marché permettent à une firme de réagir rapidement et efficacement aux évolutions des conditions de son marché.

Le chapitre 3, nous a permis de conclure que les systèmes de classeurs apprenants sont les plus adaptés à modéliser l'adaptation d'une firme. L'objectif de ce chapitre est de présenter notre modèle de firme adaptative. Le chapitre est organisé comme suit. En premier lieu nous détaillons le système de classeurs apprenant XCS. En deuxième lieu, nous présentons une modélisation de firme et analysons les avantages et les problèmes qu'elle pose.

## 5.2 Présentation de XCS

XCS a été défini par Wilson [173]. Ce système comme l'indique la Figure 5.1 est en interaction avec un environnement qu'il essaie d'apprendre (Miramontes [106]). Le fonctionnement du système est dépendant de son interaction avec son environnement.

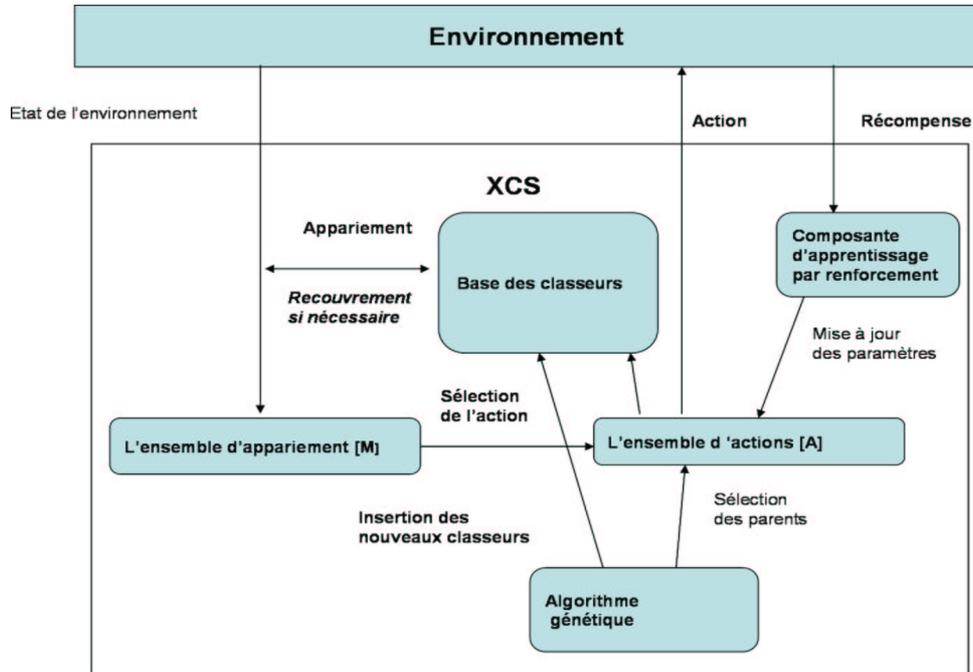


FIG. 5.1 – Fonctionnalités de XCS (Miramontes [105] )

XCS tend à développer des classeurs qui sont à la fois précis dans leur prédiction de la récompense et généraux à l'extrême. Il en résulte une plus grande performance ainsi qu'une représentation compacte des connaissances (Wilson [169]).

### 5.2.1 La représentation des classeurs

XCS est fondé, comme tous les systèmes de classeurs, sur une représentation des connaissances sous forme de règles de type « Condition-action ». La partie condition traduit la perception de l'état de l'environnement. Elle est codée généralement sous forme d'une chaîne binaire dans laquelle chaque élément représente, le plus souvent, la valeur attendue d'un attribut : 0, 1 ou # (# indique que la valeur de l'attribut n'a pas d'importance dans la décision actuelle). Les récentes recherches sur XCS ont montré que ces connaissances peuvent aussi être représentées sous forme d'intervalles pour représenter les valeurs réelles, d'intervalles flous, ou encore sous forme d'expressions Lisp (S-expression), etc. (Wilson [169]).

De plus, l'espace des états de l'environnement peut être continu, discontinu, fini ou encore infini. Le choix de la représentation et du codage dépendent de la perception de l'environnement. Cependant, il doit être fait avec le plus de précaution possible puisque l'objectif de XCS est non seulement de détecter les régularités de l'environnement mais doit aussi être capable de les représenter d'une manière précise (Wilson [169]).

L'espace des actions est limité et défini dès le début par l'expert. Les actions sont sélectionnées en fonction de l'état courant de l'environnement. L'exécution de ces actions par l'environnement engendre une récompense  $R$  utilisée par la suite par XCS pour évaluer les différents classeurs. Cette récompense permet de piloter la recherche et l'auto-amélioration du système (Miramontes [105]). La fréquence d'attribution de la récompense définit la nature du problème à apprendre dans l'environnement : problème à étape unique (one step) dans le cas où la récompense est immédiate et problème multi-étapes (multi-step) dans le cas où la récompense est donnée à la suite d'une séquence d'actions.

Les classeurs sont aussi caractérisés dans XCS par un ensemble de trois paramètres permettant leur évaluation :

- la prédiction  $p$  correspondant à la moyenne de la récompense estimée quand le classeur est utilisé,
- l'erreur de prédiction  $e$  correspondant à la valeur absolue de l'estimation de l'erreur dans la prédiction  $p$ ,
- la fitness ou aptitude  $F$  estimant la précision moyenne donnée par la prédiction  $p$ . Cette expression de la fitness en fonction de la précision de la prédiction est une particularité de XCS.

Ces paramètres différencient XCS des autres systèmes de classeurs et sont mis à jour à chaque fois où la récompense est reçue à partir de l'environnement.

### 5.2.2 Evolution des classeurs

XCS utilise deux autres composantes pour évoluer la population de classeurs :

- une composante d'apprentissage par renforcement permettant d'évaluer les classeurs en mettant à jour leurs paramètres. Les algorithmes les plus utilisés sont le « Q-Learning » et le « temporal differentiation TD( $\lambda$ ) ». Les formules de mise à jour de ces paramètres sont données dans la Section 5.2.3,
- un algorithme génétique utilisé pour faire évoluer cette population de classeurs. Cet algorithme génétique est activé, à une fréquence fixée, à la suite de l'exploration. Il est appliqué, contrairement aux autres LCS, dans l'ensemble des classeurs utilisant l'action choisie  $[A]$ . L'algorithme génétique sélectionne les classeurs en fonction de leurs erreurs de prédiction.

XCS est aussi caractérisé par la capacité de généralisation. La généralisation permet de rassembler sous la forme d'un macro-classeur, un ensemble de classeurs ayant des conditions similaires et proposant la même action. Le nombre de classeurs dans le macro-classeur est sauvegardé par le paramètre *num*. Cette capacité de généralisation permet

de représenter les connaissances d'une manière compacte. L'utilisation de la précision de la prédiction dans XCS permet d'éviter de tomber dans le piège de la sur-généralisation, qui correspond à l'obtention de classeurs qui n'ont aucun sens tellement ils sont généraux.

XCS est caractérisé par un ensemble d'autres paramètres permettant de gérer l'activation de ses différentes composantes tel que le coefficient de généralisation ou la fréquence d'activation de l'algorithme génétique.

### 5.2.3 Fonctionnement de XCS

A chaque itération, XCS (voir Figure 5.1) construit, à partir de la population  $[P]$  l'ensemble  $[M]$  des règles qui s'apparient à la perception de l'environnement. Si  $[M]$  est vide ou contient un nombre d'actions inférieur au taux  $\theta_{mna}$  fixé pour XCS, une opération de recouvrement (covering) se déclenche. Cette opération vise à créer de nouveaux classeurs dont la condition correspond à la situation actuelle du système et dont les actions respectives correspondent aux actions non représentées dans  $[M]$ . Pour chaque action  $a_i$  dans  $[M]$ , il faut, ensuite, calculer la prédiction du système  $PS_i$  qui détermine la récompense attendue par XCS si l'action  $a_i$  est sélectionnée. Cette valeur est calculée par :

$$PS_i = \frac{\sum_{cl_{j,i} \in [M]} p_j \times F_j}{\sum_{cl_{j,i} \in [M]} F_j} \quad (5.1)$$

où  $cl_{j,i} \in [M]$  correspond au classeur  $j$  de l'ensemble  $[M]$  ayant  $a_i$  comme action ;  $p_j, F_j$  correspondent respectivement à la prédiction et à la fitness ou aptitude du classeur  $j$ . La valeur  $PS_i$  correspond donc à une moyenne pondérée de l'aptitude ou fitness  $F$  des classeurs ayant  $a_i$  comme action.

XCS utilise ensuite ces valeurs  $PS_i$  pour sélectionner l'action à appliquer. Cette sélection peut se faire de manière aléatoire en utilisant l'exploration, ou en choisissant l'action ayant la valeur maximale  $PS_i$  si l'exploitation est utilisée. En effet, XCS utilise un mécanisme de sélection « epsilon-greedy » pour choisir entre l'exploitation et l'exploration [28]. Ce mécanisme consiste à générer un nombre aléatoire compris entre  $[0, 1]$  et à choisir l'exploration ou l'exploitation en fonction de la comparaison de ce nombre à la probabilité d'exploration  $\theta_{Exp}$  fixée comme paramètre de XCS.

L'ensemble des classeurs de  $[A]$  qui défendent l'action sélectionnée sera isolé de l'ensemble  $[M]$ . L'action choisie va être appliquée par l'environnement et la récompense qu'elle va engendrer, sera utilisée pour évaluer les classeurs dans  $[A]$  ou  $[A]_{-1}$ <sup>1</sup> en fonction de la nature du problème. En effet, l'évaluation des classeurs et l'activation de l'algorithme génétique s'effectuera dans  $[A]$  si le problème à étudier est à étape unique. Dans le cas contraire, c'est dans l'ensemble  $[A]_{-1}$  que ces opérations auront lieu et l'ensemble  $[A]$  sera enregistré pour être évalué à l'étape suivante.

---

<sup>1</sup> $[A]_{-1}$  correspond à  $[A]$  à l'instant  $t - 1$

Les paramètres des classeurs sont mis à jour selon l'ordre suivant :

$$p_{cl_j} = p_{cl_j} + \beta(PS - p_j) \quad (5.2)$$

où  $p_{cl_j}$  est le classeur  $j$  ayant  $a_i$  comme action ; et  $\beta$  est le taux d'apprentissage avec  $0 \leq \beta \leq 1$ .

$$e_{cl_j} = e_{cl_j} + \beta(|PS_i - p_j| - e_{cl_j}) \quad (5.3)$$

où  $e_{cl_j}$  est l'erreur de prédiction  $j$  ayant  $a_i$  comme action ;

L'erreur de prédiction est ensuite utilisée pour calculer l'aptitude, une fois que la précision  $k$  et la précision relative  $k'$  calculées.  $k$  est déterminé par :

$$k_j = \begin{cases} \alpha * (e_j/e_0)^{-v}, & e_j \geq e_0 \\ 1, & \text{autrement,} \end{cases} \quad (5.4)$$

où

- $e_0$  avec ( $e_0 > 0$ ) est un seuil exprimant le niveau d'acceptation des erreurs de prédiction,
- $\alpha$  avec ( $0 < \alpha < 1$ ) permet d'avoir une distinction entre les classeurs précis et imprécis (Butz et al. [28]),
- $v$  avec ( $v > 0$ ) et  $e_0$  déterminent la raideur de la pente utilisée pour calculer la précision de la prédiction  $k_j$ .

La précision relative est ensuite déterminée par :

$$k'_j = \frac{k_j * num_j}{\sum(k_j * num_j)} \quad (5.5)$$

où  $num_j$  correspond à la *numérosité* du macro-classeur  $j$ .

La fitness est basée sur la précision de la prédiction. Elle est déterminée par :

$$F_j = F_j + \beta(k'_j - F_j) \quad (5.6)$$

Une fois les classeurs évalués, l'algorithme génétique est appliqué aux classeurs dans [A] selon le seuil  $\theta_{AG}$ . L'algorithme génétique ne sera appliqué que lorsque le temps moyen depuis sa dernière application est supérieur à  $\theta_{AG}$ . L'application de l'algorithme génétique uniquement sur l'ensemble [A] et non sur la totalité de la population est une particularité du système XCS.

Une étape d'exécution de XCS est résumée par l'algorithme 5.1.

L'algorithme 5.1 est inspiré de l'algorithme présenté dans « An algorithmic description of XCS » (Butz et al. [29]).

---

**Algorithme 5.1** Description d'une étape de XCS

---

faire {

1. perception de l'état de l'environnement
2. détermination de l'ensemble [M] des classeurs qui s'apparient à l'état de l'environnement,
3. détermination de l'ensemble des prédictions du système [PS],
4. choix de l'action "a" en considérant [PS] soit par exploration, soit par exploitation,
5. exécution de l'action "a" par l'environnement et retour de la récompense R,
6. génération de l'ensemble d'actions [A] rassemblant tous les classeurs de [M] ayant "a" comme action,
7. réception à partir de l'environnement de la récompense R,
8. évaluation des classeurs et application de l'algorithme génétique si possible soit dans [A] si la récompense est immédiate soit dans [A]<sub>1</sub> dans le cas contraire.

} tant que le critère de fin n'est pas atteint.

---

### 5.3 Firmes basées sur XCS

Les firmes basées sur XCS sont obtenues par l'intégration de XCS dans l'agent représentant la firme (Voir Figure 5.2).

XCS reçoit la perception du contexte de la firme. Il applique les étapes 1-4 de l'algorithme 5.1 pour déterminer l'action adéquate. Cette action est appliquée par la firme. Elle engendre une récompense qui sera retournée à XCS pour mettre à jour les paramètres des classeurs. La récompense est immédiate. On utilise par conséquent XCS à étape unique.

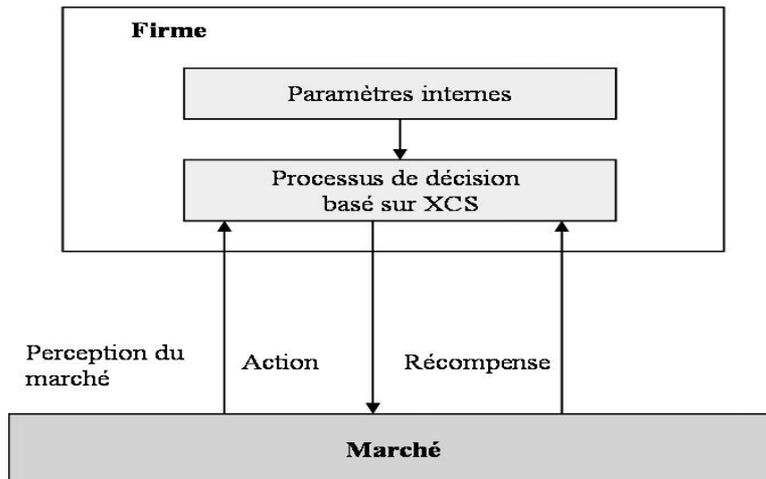


FIG. 5.2 – La firme basée sur XCS

L'utilisation de l'agent XCS par les firmes nécessite la définition du contexte et la fixation d'un nombre de paramètres qui peuvent avoir une influence sur le comportement de XCS.

La modélisation d'une firme par un agent doit présenter un compromis entre la simplicité et le réalisme. Cette condition est nécessaire pour nous permettre d'avoir, à la fois, une représentation fidèle du système économique et en même temps un modèle permettant de comprendre et d'expliquer le comportement de la firme.

### 5.3.1 Contexte

Cette section va nous permettre de définir le contexte de la firme et représenter par la suite son codage pour permettre son utilisation dans XCS.

#### 5.3.1.1 Définition du contexte

La firme dans notre modèle a besoin de deux types d'informations pour représenter son contexte :

- ses paramètres internes tels que le capital, les ressources, les performances et le budget,
- la perception de son marché qui peut être représentée par un ensemble d'indicateurs tels que la moyenne du capital des firmes persistantes, leur moyenne de performances. La perception est un élément clé dans le processus de prise de décision. D'après Kalika et al. [80], la perception du marché peut avoir une influence à la fois sur les stratégies des firmes et sur l'organisation mise en place.

Selon Smirchich et Stubbart [147] trois conceptions de l'environnement peuvent être identifiées :

- une conception objective du marché, considérée comme indépendante de la firme. Elle correspond à une réalité concrète qui s'impose à la firme,
- une conception perceptive qui considère le marché comme indépendant de la firme mais comme perçu à travers des filtres cognitifs des managers. Les managers perçoivent d'une manière biaisée leur marché compte tenu de leur rationalité limitée. La perception des managers de leur marché les pousse à prendre des décisions stratégiques et organisationnelles,
- une conception constructive qui nie la séparation entre la firme et son marché et remet en cause à la fois les frontières et les causalités marché-firmes.

Nous nous positionnons dans la deuxième catégorie de perception. Les firmes sont en compétition. Elles n'ont, donc, accès qu'aux informations publiques de leurs concurrentes et ne peuvent pas connaître avec suffisamment de précision les variables de l'environnement. Leur perception est donc biaisée.

Classeur	Classeur dans XCS
$K \in [300,400[$	0001
$B \in [100,200[$	0010
$X = \{x_1 \in [0,10[, x_2 \in [20,30[, x_3 \in [10,20[, x_4 \in [0,10[,$ $x_5 \in [0,10[, x_6 \in [0,10[, x_7 \in [0,10[, x_8 \in [0,10[ \}$	0000,0010,0001,0000, 0000,0000,0000,0000,
$Y = \{y_1 \in [10,20[, y_2 \in [10,20[ \}$	
$NbFirmes \in [0,100[$	0000,
$Y\_moyen = \{y\_moy1 \in [20,30[, y\_moy2 \in [10,20[ \}$	0010, 0001
Action = Strategie1	1,
$(p)=0.5, (e)=0.01, (F)=100$	0.5, 0.01, 100

TAB. 5.1 – Exemple de classeur

### 5.3.1.2 Codage

La diversité des paramètres du contexte de la firme ainsi que le caractère continu et non stationnaire du système rendent difficile la délimitation des domaines de définition des paramètres. Par conséquent, les codages récents proposés pour XCS tels que les intervalles réels ou les S-expressions ne sont pas appropriés pour modéliser le contexte de la firme.

Nous proposons une méthode d'unification permettant d'homogénéiser la représentation des paramètres de la firme. Cette méthode est basée sur la décomposition du domaine de définition de chaque paramètre en  $m$  intervalles. Chaque intervalle est caractérisé par un ordre de grandeur de l'attribut correspondant. Les étendues de ces intervalles sont ensuite traduites en un codage binaire afin d'obtenir une représentation homogène des attributs et de faciliter leur intégration dans XCS. La taille de la chaîne binaire pour chaque attribut dépend de la décomposition de son domaine de définition. Pour une décomposition en  $m$  intervalles, la chaîne binaire aura une longueur  $n$  tel que  $m=2^n$ .

Pour une décomposition du budget en quatre intervalles par exemple,  $[100,200[$ ,  $[200,300[$ ,  $[300,400[$  et  $[400,500[$ , la chaîne binaire « 01 » correspond à une valeur du budget appartenant à l'intervalle  $[100,200[$ .

Le codage du contexte sera par la suite associé à une stratégie de la firme pour former un classeur. L'encadré Table 5.1 donne un exemple de classeur représentant le contexte de la firme et son codage en un classeur compréhensible par XCS. Ce classeur associe la stratégie 1 au contexte défini. L'utilisation de la stratégie 1 dans ce contexte a donné une prédiction (p) de 0.5, une erreur de prédiction de 0.1 et une qualité de prédiction de 100.

Cette traduction est basée sur une décomposition du domaine de définition en 16 intervalles. L'exemple ci-dessus est traduit sans considérer la généralisation dans XCS. Autrement, des valeurs # doivent être utilisées dans la représentation.

### 5.3.2 Le processus de décision de la firme

Le processus de décision de la firme est représenté par XCS. Vu le contexte réel de l'application, cette étape est caractérisée par une seule activation des étapes 1-8 de l'algorithme 5.1. Ceci s'explique par le fait que l'exécution de l'action au niveau de la firme engendre une modification réelle de son état interne. L'application de la stratégie par la firme retourne une récompense. Cette stratégie est considérée comme une récompense immédiate. Par conséquent, le problème dans XCS est un problème à étape unique (la mise à jour se fait dans l'ensemble courant d'actions  $[A]$ ).

Les fonctions de récompense généralement utilisées dans les travaux basés sur XCS sont discrètes. Elles correspondent à l'allocation d'une valeur positive quand l'action donne de bons résultats et 0 autrement (Wilson [170]). Cette fonction est donc discontinue par rapport à l'état de l'environnement. Cependant, dans les applications réelles et dans le cas des firmes, une action qui a engendré une très grande amélioration des performances dans un contexte donné ne doit pas être récompensée de la même manière qu'une action qui a engendré une légère amélioration des performances.

Nous proposons donc d'utiliser une fonction qui fait varier les valeurs des récompenses en fonction du contexte. Ceci permettra de donner une idée plus précise sur l'efficacité des classeurs. Cependant, ces fonctions sont généralement fondées sur l'effet de la récompense de l'agent lui-même sans considérer le niveau global (des autres firmes). Or, la firme est dans un contexte où son action peut avoir une influence sur les autres firmes. Il faut vérifier s'il est nécessaire de tenir compte des autres firmes lors du calcul de la variation des performances de la firme (Péres-Uribe [118]). Nous décrivons dans ce qui suit les deux types de fonctions définies que nous nommerons respectivement : fonction de récompense individuelle et fonction de récompense collective.

**La fonction de récompense individuelle**, est définie en fonction du capital ou des performances. Nous définissons la récompense en fonction des performances puisqu'elles reflètent clairement le résultat des décisions de la firme et leur calcul est fonction du capital. La récompense est une agrégation des variations des performances de la firme :

$$\text{récompense} = \text{agrég} \left( \frac{\text{Prof}(t) - \text{Prof}(t-1)}{\text{Prof}(t-1)}, \frac{\text{Mark}(t) - \text{Mark}(t-1)}{\text{Mark}(t-1)} \right) \quad (5.7)$$

où  $\text{Prof}(t)$  correspond à la profitabilité,  $\text{Mark}(t)$  correspond à la part du marché et  $\text{agrég}$  est un opérateur d'agrégation (moyenne, médiane, etc.).

**La fonction de récompense collective** (Durand [49, 51]) est une mesure de performance relative de la firme. Elle reflète la performance passée de la firme et l'état de la concurrence. Elle exprime la position de la firme par rapport à ses rivales sur le marché. Elle est définie par :

$$\text{PerfRel}_t = \sum(A, B, C, D). \quad (5.8)$$

où

–  $A$  correspond à la variation de la profitabilité

$$A = \frac{Prof(t) - Prof(t - 1)}{Prof(t - 1)} \quad (5.9)$$

–  $B$  correspond à la comparaison de la profitabilité de la firme à celle du marché

$$B = \frac{Prof(t) - moyenneProf(t)}{moyenneProf(t)} \quad (5.10)$$

et  $moyenneProf(t)$  est la moyenne de la profitabilité dans le marché.

–  $C$  correspond à l'évolution de la performance de la part du marché :

$$C = \frac{Mark(t) - Mark(t - 1)}{Mark(t - 1)} \quad (5.11)$$

–  $D$  est un index qui donne un bonus à la meilleure firme sur le marché à l'instant  $t$ ,

$$D = \frac{Mark(t) - Min(Marf(t)_i)}{Min(Mark(t)_i)} \quad (5.12)$$

où  $i \in [1, k]$  et  $k$  le nombre total des firmes.

La fonction de récompense correspond à la variation de la performance relative :

$$récompense = PerfRel_t - PerfRel_{t-1} \quad (5.13)$$

### 5.3.3 Les paramètres de XCS pour les firmes

L'utilisation de XCS nécessite aussi la fixation de certains paramètres tels que le taux d'application de l'algorithme génétique, le coefficient d'apprentissage, l'utilisation ou pas de la généralisation. Une attention particulière doit être apportée à ces paramètres pour garantir la cohérence des classeurs. Nous décrivons dans ce qui suit l'activation des algorithmes génétiques. Les autres paramètres seront présentés dans le cadre des expérimentations du chapitre 8.

L'algorithme génétique est appliqué dans XCS à la suite d'une étape d'exploration selon une fréquence fixée par le concepteur. La fréquence la plus utilisée est une activation à la suite de 25 étapes d'exploration. Dans notre cas, une seule étape d'exploration est activée à chaque expérimentation de XCS ; l'activation de l'algorithme génétique doit être synchronisée avec l'horloge des agents. Nous allons maintenant en premier lieu cette valeur à 25 périodes.

Le croisement utilisé dans XCS est un croisement à deux points ou délimiteurs. Une attention doit être portée à la fixation de ces délimiteurs pour que les règles conservent leurs sens. Ces derniers sont déterminés d'une manière aléatoire dans XCS. La fixation de

ces points pour le modèle des firmes doit tenir compte de la longueur de la chaîne représentant les attributs. Ainsi, les deux points de croisement *Croisement1* et *Croisement2* correspondants respectivement au premier et au deuxième point de croisement, sont déterminés par :

$$Croisement = (nbAlatoire * nbAttributs) * longueurAttribut \quad (5.14)$$

où *nbAttributs* correspond au nombre d'attributs représentant la perception de l'environnement et *longueurAttribut* représente la longueur de la chaîne binaire représentant les attributs. Dans le cas où les points de croisement obtenus posent problème dans leur ordre ou sont égaux, le traitement décrit par l'algorithme 5.2 est à appliquer.

---

**Algorithme 5.2** Mise à jour des points de croisement
 

---

```

faire {
1. Si (Croisement1 > Croisement2)
2. alors permuter Croisement1 et Croisement2,
3. Sinon si (Croisement1 = Croisement2),
4. alors Croisement2 = Croisement1 + nbAttributs.
}

```

---

La mutation dans l'algorithme génétique peut être faite soit sur la condition soit sur l'action. Sur l'action, la mutation correspond à la génération d'un nouveau classeur en conservant la condition et en remplaçant l'action. Sur la condition par contre, il faut effectuer les mutations de blocs de la longueur des attributs.

## 5.4 Conclusion

L'avantage de l'utilisation de XCS pour les firmes est la simplicité des règles engendrées et la facilité de leur compréhension. L'utilisation de règles simples accompagnées d'ajustements ponctuels et progressifs peut être analysée comme une méthode de gestion de l'incertitude qui s'avère plus efficace que l'utilisation de règles complexes (Cyert et March [40]).

Cependant l'intégration de XCS dans les firmes pose un certain nombre de problèmes tels que la convergence et la rapidité d'apprentissage ainsi que le problème d'exploration / exploitation. Ce problème est important dans les domaines de prise de décision et aussi dans le domaine de l'apprentissage par renforcement. L'exploration est intéressante quand l'agent est à ses débuts et a des connaissances limitées. L'exploitation par contre devient plus intéressante une fois que l'agent a appris. Trouver le bon équilibre entre ces deux

techniques est une des conditions de survie de la firme dans un marché turbulent. Il est à noter qu'un apprentissage rapide peut être dangereux puisque la firme peut se limiter aux premières caractéristiques satisfaisantes déjà acquises sans se donner le temps d'explorer ou de découvrir de meilleures caractéristiques. Le problème d'exploration exploitation fait donc l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 6

# Le dilemme exploration/exploitation

### 6.1 Introduction

Roux-Dufort [128] note que l'apprentissage organisationnel est auto-limitant puisque le processus de socialisation fait converger les savoirs des individus et de l'organisation jusqu'à un point d'équilibre qui n'assure plus le renouvellement des savoirs. L'apprentissage organisationnel s'exerce donc d'après March [100] en une tension entre l'exploration de nouvelles possibilités et l'exploitation des alternatives existantes. L'exploitation des actions existantes réduit l'incertitude de l'action alors que l'exploration est porteuse d'incertitude et met beaucoup de temps pour assurer un retour à l'organisation (Roux-Dufort [128]).

Le dilemme d'exploration/exploitation est très important. Un agent qui s'engage uniquement dans l'exploration paye le prix de l'expérimentation sans profiter des connaissances qu'il a accumulées. Il disperse ses efforts sans bénéficier de son expérience. Cependant, un agent qui s'engage uniquement dans l'exploitation peut se trouver coincé dans un comportement sous-optimal (Carmel [35]). Il en est de même pour les firmes : une forte concentration sur l'exploitation condamne la firme à l'obsolescence [128]. Levinthal et March [93] notent que trouver un équilibre entre l'exploration et l'exploitation est difficile. Il faut en effet, trouver un équilibre entre une dose d'exploitation qui assure la viabilité de l'organisation et une dose d'exploration qui lui garantit sa pérennité.

Le dilemme d'exploration/exploitation, est également rencontré dans l'apprentissage par renforcement (Thrun [159]). Wilson [171] souligne que quand l'agent se trouve dans une situation donnée, il a à choisir entre deux options : (i) exploration ou (ii) exploitation. L'agent peut :

- choisir l'action en fonction de ce qui lui apparaît comme le mieux à cet instant. Il s'agit plutôt d'un choix aléatoire. Le but de ce choix étant d'acquérir de l'informa-

- choisir l'action en fonction des meilleures informations possédées à cet instant.

Quand il opte pour l'exploration de nouvelles actions, l'agent considère ses performances à long terme. Par contre, quand il opte pour l'exploitation des actions déjà essayées, l'agent garantit ses performances à court terme (Wiering [168]). Holland [71] a été le premier à considérer ce problème dans le contexte des systèmes adaptatifs. March [100] a noté que les processus adaptatifs qui optent pour l'exploitation plus rapidement que l'exploration sont plus effectifs à court terme mais autodestructifs à long terme. Cependant, ce choix est dans plusieurs cas motivé par la durée de vie de l'agent. Plus sa durée de vie est courte, plus l'agent est enclin à améliorer ses performances à court terme et par conséquent plus il est enclin à réduire l'exploration (Schmidhuber et al. [132], Wiering [168]). Ce dilemme provient, d'après Bourguine [23], d'une contrainte informationnelle : il est nécessaire d'essayer des stratégies même médiocres pour acquérir d'avantage d'information à leur sujet .

L'agent doit résoudre deux sous-problèmes. Le premier sous-problème consiste à choisir une méthode d'exploration. L'exploration peut être dirigée (directed) ou sans but (undirected). Elle est dirigée quand le choix est basé sur les connaissances acquises. Elle est par contre sans but quand ce choix est aléatoire. Le second sous-problème consiste à choisir une méthode qui permet de balancer entre l'exploration et l'exploitation selon l'état de l'agent et celui de son environnement.

Ces deux sous-problèmes sont importants puisqu'ils influencent la performance ainsi que la vitesse d'apprentissage d'un agent. Le choix entre exploration et exploitation est particulièrement critique pour l'agent. Il peut le coincer dans un comportement sous-optimal en cas de sur-exploitation par exemple. De plus, les décisions efficaces qu'il a déjà prises peuvent s'avérer inadéquates pour le contexte courant ou encore quand l'environnement évolue. Par conséquent le choix entre exploration et exploitation peut avoir un impact direct sur la capacité de l'agent à survivre (Baum et al. [14]). L'impact est encore plus critique quand l'environnement de l'agent est dynamique, tel le cas des systèmes économiques. Barnett et alii [11] ont noté que l'extrême adaptation à l'environnement peut être préjudiciable en cas de changement brutal du contexte comme dans le cas de la dérégulation des banques de l'Illinois. Par conséquent, afin d'améliorer ses chances de survie dans un environnement économique turbulent, l'agent doit trouver un équilibre entre l'exploration et l'exploitation. Gittings [63] et Kaelblings [79] ont remarqué qu'une stratégie optimale de choix entre exploration/exploitation est généralement difficile à déterminer, exception faite pour les petits problèmes.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier les deux sous-problèmes décrits ci-dessus dans le contexte des firmes. Ce dilemme se présente pour les firmes adaptatives, lors du choix de la stratégie par XCS. Ce choix est aléatoire dans la version courante de XCS. Un nombre est généré aléatoirement selon une distribution uniforme (0,1) continue. Ce nombre est ensuite comparé à la probabilité d'exploration fixée au début de la simulation. XCS offre la possibilité d'utiliser d'autres techniques sans but telles que la roue de la

fortune ou la e-greedy (Butz [29]). De plus, l'exploration des stratégies est sans but. L'objectif de ce chapitre est de trouver une méthode qui adapte ce choix à l'évolution de la firme et de vérifier si l'exploration dirigée peut améliorer le choix des stratégies.

## 6.2 L'exploration

Nous présentons, dans cette section, les techniques d'exploration et repérons leurs limitations. Nous décrivons par la suite comment intégrer les techniques d'exploration directe dans XCS.

### 6.2.1 Les techniques d'exploration

Thrun [159] a classé les méthodes d'exploration en deux catégories :

- l'exploration sans but<sup>1</sup> fondée sur un choix aléatoire entre les actions,
- l'exploration dirigée<sup>2</sup> qui utilise des connaissances spécifiques à l'exploration pour la guider. Nous choisissons par exemple, les actions les moins récemment utilisées ou encore celles qui ont été le moins fréquemment utilisées. Nous effectuons donc des statistiques sur l'historique d'utilisation des actions afin de forcer l'utilisation de nouvelles actions.

Thrun [159] a noté que l'exploration dirigée est plus bénéfique que l'exploration sans but. Cependant, Koeing et al. [84] ont montré que les stratégies sans but pouvaient être améliorées par l'utilisation de la règle de pénalisation des actions<sup>3</sup>.

Dans ce qui suit, nous allons lier la présentation de chaque technique au contexte des systèmes de classeurs afin de mieux la comprendre.

### 6.2.2 L'exploration sans but

Les méthodes d'exploration sans but utilisent des fonctions de génération de nombres pseudo-aléatoires. Selon Carmel [35], ces fonctions sont déterminées à l'avance par l'agent qui les utilise. Elles ne dépendent donc pas des interactions dont cet agent est acteur. Nous allons dans ce qui suit présenter et analyser les techniques qui ont été le plus utilisées et qui ont fait leurs preuves dans certaines catégories de problèmes.

**L'exploration aléatoire** attribue des probabilités aux actions en utilisant une distribution uniforme. Elle ne considère pas leurs prédictions ou performances. Par exemple,

---

<sup>1</sup>Undirected exploration

<sup>2</sup>Directed exploration

<sup>3</sup>action-penalty rule

un agent peut expérimenter une action  $a_1$  dans une situation  $s_1$  et obtenir de bons résultats. Quand il est confronté à une situation identique à  $s_1$ , l'agent ne choisira pas directement l'action  $a_1$ . Il choisira son action aléatoirement. Ce choix ne garantit pas la performance mais peut permettre de découvrir une autre action qui donnera de meilleurs résultats dans le futur.

**La méthode pseudo-stochastique, (Max-Random), ou encore (e-greedy-Max-Random)**

utilise une mesure de probabilité  $P_{max}$ . Elle génère un nombre aléatoire à partir d'une distribution uniforme. Elle sélectionne la meilleure action si ce nombre aléatoire est supérieur ou égal à  $P_{max}$  et une action au hasard dans le cas contraire. Carmel [35] propose une description plus synthétique de cette méthode. Elle est décrite comme suit : s'il existe  $n$  actions alternatives, une action  $a_i$  sera sélectionnée aléatoirement selon la distribution de probabilité suivante :

$$Pr(a_i) = \begin{cases} 1 - \frac{n-1}{n} \times \alpha, & \text{si } a_1 \text{ est optimale;} \\ \frac{\alpha}{n}, & \text{autrement,} \end{cases} \quad (6.1)$$

où le paramètre d'exploration,  $0 \leq \alpha < 1$ , détermine le poids de l'exploration.

Cette méthode est celle utilisée actuellement par XCS pour le choix entre exploration et exploitation. La probabilité  $P_{max}$  correspond à la probabilité d'exploration  $P_{exploration}$  faisant partie des paramètres de XCS.

Une bonne technique d'application de cette méthode consiste à augmenter  $P_{max}$  à chaque activation. Ce qui permettra de faire plus d'exploration au début et d'opter pour une pure exploitation à la fin. Cette méthode peut jouer aussi le rôle d'une méthode de choix entre exploration et exploitation. Cependant, elle peut conduire à de mauvais résultats quand certaines actions engendrent d'importantes récompenses négatives.

**Exploration distribuée de Boltzmann ou encore (softMax)** est fondée sur les utilités. La probabilité de chaque action va dépendre de sa propre utilité et de celles des autres actions. L'utilité peut correspondre aux prédictions déterminées dans les systèmes de classeurs. La probabilité, selon Boltzmann, est déterminée par :

$$Pr(a_i) = \frac{e^{\frac{P(a_i)}{T}}}{\sum_{j=1}^n e^{\frac{P(a_j)}{T}}} \quad (6.2)$$

où  $T$  est une mesure de température qui décroît avec le temps. Nous pouvons en déduire que les plus fortes probabilités sont associées aux plus fortes prédictions. Cette méthode n'est utilisée que dans l'apprentissage par renforcement où le nombre d'actions est fini (Thrun [159]).

Perez [118] note qu'un des problèmes de cette méthode est la définition de la température  $T$ . La fonction de température, la plus couramment utilisée selon Carmel [35] est  $T = c \cdot \alpha^t$  où  $\alpha$  correspond au paramètre d'exploration décrit dans l'équation 6.1. De plus, Wiering [168] affirme que cette méthode a du mal à mettre l'accent sur les meilleures actions tout en restant capable de dévier de temps en temps de ces dernières. La méthode de la roue de la fortune<sup>4</sup> est une variante de cette méthode où le facteur  $T$  est constant.

<sup>4</sup>roulette wheel selection

Selon Thrun [159], les techniques d'exploration sans but sont difficiles à utiliser dans des domaines à valeurs réelles<sup>5</sup> et dans des espaces d'états larges. Le temps d'apprentissage qu'elles nécessitent peut augmenter exponentiellement avec la largeur de l'espace d'états. Elles sont, par conséquent, difficiles à utiliser dans notre modèle pour les deux raisons suivantes. D'une part le nombre d'états du marché est innombrable. Il est impossible de prévoir au début de la simulation toutes les configurations possibles du marché puisqu'il est ouvert. D'autre part, la majorité des informations considérées par la firme pour prendre ses décisions sont des valeurs réelles. Nous pouvons citer par exemple, le capital, le budget, les valeurs des ressources et les performances, etc.

Ces techniques ne tiennent pas compte de l'interaction de l'agent avec l'environnement. Elles sont fixées au début de la simulation. Ce qui va à l'encontre de l'objectif de rendre la firme adaptative. Ces techniques dépendent généralement de la méthode de génération de nombres aléatoires qu'elles utilisent.

### 6.2.3 L'exploration dirigée

L'exploration dirigée utilise l'historique de l'interaction pour évaluer la contribution de chaque action à l'exploration (Carmel [35]). Elle essaie d'enrichir la connaissance de l'environnement en sélectionnant des actions plus constructives.

Les méthodes les plus connues de cette catégorie sont :

**La méthode basée sur la fréquence**<sup>6</sup> : sélectionne les actions les moins fréquemment utilisées.

**La méthode basée sur la « récence »**<sup>7</sup> : favorise les actions dont la dernière utilisation (activation) remonte à longtemps.

**La méthode basée sur les erreurs**<sup>8</sup> : choisit les actions ayant les erreurs de prédiction les plus importantes. Chaque action est caractérisée par la moyenne ou la somme des erreurs des classeurs l'utilisant et qui sont appariés à l'état  $s$ . La méthode choisit l'action maximisant :

$$Error(s, a_j) = \sum_{i=1}^n Error(cl(s, a_j)_i) \quad (6.3)$$

où  $Error(cl(s, a_j)_i)$  correspond à l'erreur de prédiction du classeur  $i$ .

Thrun [159] et Wilson [171] affirment que l'exploration dirigée est prometteuse dans les environnements dynamiques. Nous allons donc intégrer les techniques d'exploration dirigée dans XCS. XCS utilise par défaut *l'exploration sans but*, en l'absence d'une méthodologie de décision.

<sup>5</sup>real-valued domains

<sup>6</sup>Frequency based exploration

<sup>7</sup>Recency-based Exploration

<sup>8</sup>Error based

### 6.2.4 l'exploration dirigée dans XCS

L'intégration de techniques d'exploration dirigée va nous permettre d'étudier leur influence sur les performances de la firme, et de comparer les techniques d'exploration *dirigées* et *sans but* dans le cadre d'un environnement dynamique. Nous avons choisi l'exploration basée sur la fréquence et l'exploration basée sur la « récence », pour leur simplicité. Nous avons choisi deux techniques différentes pour vérifier la validité des résultats.

Afin d'appliquer *l'exploration basée sur la « récence »*, nous considérons pour chaque action  $a_i$ , les classeurs appariés<sup>9</sup>  $cl(a_i)_j$  qui l'utilisent et déterminons la date de leur dernière activation  $Rec(a_i)$  :

$$Rec(a_i) = \min_{j=1}^n (t\_TActivation(cl(a_i)_j)) \quad (6.4)$$

où  $n$  correspond au nombre de ces classeurs,  $T\_Activation(cl(a_i)_j)$  correspond à la date de la dernière activation du classeur  $j$  et  $t$  correspond à la date courante. Nous choisissons par la suite l'action  $a_i$  ayant la plus grande valeur  $Rec(a_i)$

Pour appliquer *l'exploration basée sur la fréquence*, nous considérons pour chaque action  $a_i$ , les classeurs appariés<sup>10</sup>  $cl(a_i)_j$  qui l'utilisent et déterminons  $Freq(a_i)$  le nombre de classeurs ayant été récompensés antérieurement. Nous choisissons par la suite l'action qui minimise  $Freq(a_i)$  :

$$Freq(a_i) = \sum_{j=1, n} (cl_j) : experience(cl_j) \geq 1 \quad (6.5)$$

où  $n$  correspond au nombre de ces classeurs et  $experience$  correspond au nombre d'activation du classeur dans une situation similaire de l'environnement.

Selon Wiering [168], les techniques d'exploration continues sont utiles quand l'objectif de l'agent est une politique finale ne nécessitant pas de tenir compte des récompenses immédiates. Quand l'agent doit tenir compte des récompenses immédiates, il a besoin de basculer vers l'exploitation et d'accroître sa fréquence de basculement vers l'exploitation graduellement. Un compromis entre exploration et exploitation s'avère nécessaire.

## 6.3 Le compromis entre exploration et exploitation

Nous présentons dans cette section une vue d'ensemble des techniques de basculement entre l'exploration et l'exploitation. Nous adaptons ensuite deux d'entre elles à notre

---

<sup>9</sup>Classeurs appartenant à [M]

<sup>10</sup>Classeur appartenant à [M]

modèle de firme. Nous proposons finalement une nouvelle approche basée sur les méta-règles.

Trouver un équilibre entre exploration et exploitation est une tâche très difficile (Gittings [63], Kaelbling [79]). La plupart des techniques existantes abordent de petits problèmes non-complexes (Thrun [159]). Ces techniques sont réparties en deux catégories : celles qui ont été utilisées dans un contexte multi-agents et celles qui ne l'ont pas été.

### 6.3.1 Les méthodes utilisées dans un contexte multi-agents

Les méthodes applicables à des contextes plus complexes tel que le contexte multi-agents sont peu nombreuses (Peres-Uribe et al. [118], Carmel [35]). Les techniques d'exploration de Peres-Uribe et al. [118] sont applicables au contexte du « problème de bar », qui est un cas simple de système multi-agents. Il s'agit en effet, d'un ensemble de 100 agents qui doivent décider d'aller passer la soirée dans un bar. Ils se basent pour leur décision sur les récompenses reçues durant les 5 dernières semaines. La valeur de la récompense qu'ils reçoivent dépend du nombre de personnes se trouvant dans le bar. Peres-Uribe et al. [118] soulignent la nécessité de lier le taux changeant d'exploration aux indicateurs de performance et aux variations de prédiction. Cependant, ils ne proposent pas de méthodes qui établissent ce lien. Carmel [35] intègre la technique d'exploration dans son modèle basé sur l'apprentissage et l'applique dans le contexte de la théorie des jeux avec un nombre réduit d'agents.

### 6.3.2 Les autres techniques

Plusieurs techniques ont été utilisées pour résoudre le dilemme d'exploration/exploitation. La technique d'estimation d'intervalle<sup>11</sup> (Kaelbling [78], Meuleau, [103]), par exemple, choisit l'action qui maximise la borne supérieure d'un intervalle de confiance de niveau  $100(1-\theta)\%$  de la récompense  $R$  où  $R$  suit une loi normale  $N(m_k, \sigma_k)$  de moyenne  $m_k$  et de variance  $\sigma_k^2$ . Elle ne garantit pas l'optimalité des choix. Elle est plus appropriée à des environnements stationnaires ; et se comporte pauvrement dans des contextes économiques dynamiques (Meuleau, [103]).

La technique des indices de Gittings [63] est une solution bayésienne au problème du bandit à plusieurs bras. Elle associe un indice de Gittings à chaque action et choisit l'action qui maximise cet indice. L'indice de Gittings tient compte des gains attendus de l'application de l'action et des gains futurs relatifs à l'obtention d'autres informations. Cette méthode donne de bons résultats pour des problèmes de petite taille caractérisés par des environnements stationnaires. Par exemple, elle a été appliquée avec succès dans le cadre du commerce électronique (Azoulay [8]) pour permettre à un acheteur de choisir

---

<sup>11</sup>Interval estimation technique

un fournisseur parmi les fournisseurs d'un produit en fonction de la qualité de ce produit. Cependant, cette méthode nécessite l'ajustement et l'approximation de plusieurs paramètres pour être appliquée dans des environnements réels.

Les techniques telles que *la probabilité distribuée* et *la méthode d'attention sélective* (Thrun [159]) ont été conçues pour des environnements déterministes ; elles sont difficiles à appliquer dans des domaines à valeurs réelles<sup>12</sup> étant donné qu'elles ne tiennent pas compte des espaces d'états-actions larges ainsi que des informations externes telles que les connaissances du domaine et de la généralisation. Ces méthodes ont été généralisées pour tenir compte des domaines réels en utilisant les réseaux de neurones. Cependant, elles présentent des limites quand le domaine d'étude est complexe.

Wilson [171] a proposé dix techniques de choix entre l'exploration et l'exploitation. Ces techniques sont basées sur les taux de variation des performances et des erreurs de prédiction. Ces techniques mettent l'accent sur un choix « en ligne » concernant la décision d'apprendre ou de ne pas apprendre dans un environnement stochastique et changeant. Certaines de ces techniques dépendent de la valeur de la récompense ou de sa variation, d'autres dépendent de la valeur de l'erreur de prédiction ou de sa variation. Le choix entre l'une ou l'autre des techniques et de leur paramétrisation dépend :

- de la fonction de récompense à maximiser,
- de la durée de vie de l'agent qui peut être fixe ou dépendant de l'évolution du système,

Quatre de ces méthodes ont été appliquées à de simples problèmes de test. Les résultats montrent que les techniques dépendantes de la valeur de l'erreur ou de sa variation sont les plus prometteuses. Cependant, leur performance est dépendante d'un facteur de gain constant fixé par le concepteur. Des valeurs importantes de ce facteur de gain empêchent l'obtention de bonnes performances. Certaines de ces techniques ne garantissent pas le retour du système à l'exploration après l'exploitation. Le comportement de ces techniques dans des systèmes complexes reste un problème ouvert. Dans la section suivante nous proposons de tester le comportement de deux de ces techniques dans un contexte plus complexe.

La plupart des techniques de basculement entre l'exploration et l'exploitation souffrent d'un manque d'appropriation à un environnement dynamique.

## 6.4 Les techniques proposées

Le but de cette section est de proposer des solutions adaptatives au problème de choix entre exploration et exploitation afin de doter la firme une plus grande autonomie dans sa décision. Notre objectif est double. Nous allons en premier lieu utiliser les techniques adaptatives de Wilson. Ceci va nous permettre d'une part d'étudier le comportement

---

<sup>12</sup>Real valued domains

de ces techniques dans un marché dynamique et, d'autre part, de voir s'ils permettent d'améliorer les performances de la firme. En deuxième lieu nous allons proposer une approche adaptative inspirée des techniques de Wilson mais qui essaie de combiner leur points forts et éviter leurs faiblesses.

### 6.4.1 Adaptation des techniques de Wilson

Les techniques de Wilson peuvent être *locales* ou *globales*. Une technique est locale quand le degré d'exploration dépend de quantités obtenues à partir des réponses immédiates de l'environnement. Une technique est globale quand le degré d'exploration est une statistique dépendante du comportement du système global (Wilson [171]).

De plus, une technique peut être *adaptative* ou *non adaptative*. Une technique est adaptative quand le degré d'exploration change en fonction de l'accumulation de l'expérience du système. Une technique est par contre non adaptative quand le degré d'exploration est indépendant du système. Dans cette section, nous expliquons comment modifier les techniques adaptatives de Wilson afin de les rendre appropriées à notre modèle de firme. Nous considérons plus spécifiquement, une technique adaptative locale et une autre globale. De plus, nous choisissons les erreurs de prédiction comme base pour ces techniques tel qu'il est recommandé par Wilson. Notre objectif est de déterminer s'il faut considérer l'interaction de tout le système ou s'il faut se limiter à une partie de celui-ci.

#### 6.4.1.1 Technique locale

Le degré d'exploration dans cette technique est basé sur une fonction des quantités associées à la réponse du système au contexte actuel. Plusieurs techniques sont proposées. Nous optons pour celle basée sur le taux de variation de l'erreur de prédiction. Cette technique permet de tenir compte des environnements stochastiques. Cette technique est activée à chaque étape de XCS. Elle détermine la probabilité  $p_1$  en se basant sur la variation de l'erreur de prédiction de chaque action. Quand tous les classeurs appariés au contexte courant sont identifiés, la moyenne mobile<sup>13</sup>  $\hat{E}_i$  de la différence entre l'erreur réelle et estimée sont calculées pour chaque action  $a_i$ . La probabilité d'exploration  $p_1$  est donc déterminée par :

<sup>13</sup>Les moyennes mobiles permettent généralement de détecter une tendance. La moyenne mobile simple se base sur un seul paramètre qui est le nombre de périodes sur lequel le calcul est fait. Elle correspond à la moyenne arithmétique des valeurs de ces  $n$  dernières période. Si l'on considère  $P_t$  la valeur à la date  $t$  et  $P_{t-1}$  la valeur à la date  $t - 1$ , la moyenne mobile à  $n$  périodes  $MB_{t-n}$  est définie comme suit :

$$MB_{t-n} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} P_{t-i}}{n} \quad (6.6)$$

[1]

$$p_1 = \min \left( 1, f \left( \widehat{E}_i \right) \times Gf \right), \quad (6.7)$$

où  $Gf$  est un facteur de gain donné par l'expert, et  $f \left( \widehat{E}_i \right)$  est la moyenne des  $\widehat{E}_i$  avec  $i$  variant entre 1 et  $na$  le nombre d'actions identifiées dans l'ensemble des classeurs appariés [M].

$$f \left( \widehat{E}_i \right) = \frac{\sum_{i=1,na} \left( \widehat{E}_i \right)}{na} \quad (6.8)$$

De grandes valeurs de  $\widehat{E}_i$ , signifient que le choix de l'action  $a_i$  dans ce contexte a engendré un grand changement de l'erreur de prédiction et par conséquent l'exploration est conseillée. Par contre, une petite valeur indique que la prédiction est précise (Wilson [171]). Cette technique est introduite dans l'étape de XCS comme suit. Quand les classeurs s'appariant au contexte courant sont identifiés, les valeurs de  $\widehat{E}_i$  sont calculées pour toutes les actions  $a_i$ .

Pour un gain de facteur de 0.5 par exemple, si  $\widehat{E}_i$  est grand (égal à 5 par exemple), la probabilité d'exploration est fixée à 1 : l'action  $a_j$  génère un changement dans l'erreur de prédiction et ainsi l'exploration doit être maintenue. Dans le cas contraire, si  $\widehat{E}_j$  est petit (égal à 1 par exemple), la probabilité d'exploration est égale à 0 et la firme doit passer à l'exploitation.

#### 6.4.1.2 Technique globale

Une technique globale adaptative est une stratégie où l'argument de la fonction recherchée est basé sur des statistiques concernant le comportement global du système tel que les moyennes mobiles des récompenses moyennes (Wilson [171]). Plusieurs techniques existent, nous avons opté pour celle utilisant l'erreur de prédiction puisqu'elle est recommandée dans les environnements stochastiques. Elle considère les changements dans l'environnement et adapte ses actions en se basant sur ces changements. Cette technique estime l'erreur de prédiction moyenne  $\widehat{E}$  et détermine le taux de variation de l'erreur  $g \left( \widehat{E} \right)$  qui correspond à la différence entre la moyenne mobile de la valeur absolue de la variation de  $\widehat{E}$  avant et après  $n$  périodes d'exploration ( $n$  est généralement fixé à 100). La probabilité d'exploration  $p_1$  est déterminée ensuite, en fonction de cette quantité :

$$p_1 = \min \left( 1, g \left( \widehat{E} \right) \times Gf \right), \quad (6.9)$$

où  $Gf$  est un facteur de gain donné par l'expert.

L'exploration est maintenue jusqu'à ce que l'erreur de prédiction se stabilise. Si la moyenne des erreurs de prédiction change,  $n$  autres étapes d'exploration sont exécutées avant de passer à l'exploitation.

La technique adaptative globale proposée est intégrée au comportement de l'agent comme l'indique l'algorithme 6.1.

---

**Algorithme 6.1** Intégration de la technique globale de Wilson dans le comportement de l'agent

---

1. Déterminer et sauvegarder la moyenne mobile au temps  $t$ .
  2. Exécuter  $n$  pas de XCS en utilisant l'exploration.
  3. Exécuter la méthode globale adaptative.
    - Déterminer la moyenne mobile au temps  $t+n$  et estimer  $\hat{E}$ .
    - Déterminer la probabilité d'exploration en utilisant l'équation 6.4.1.2.
    - Si  $p1 = 1$ , mettre à jour le temps et retourner à l'étape 1.
  4. Exécuter l'exploitation jusqu'à la fin de la vie de l'agent.
- 

### 6.4.1.3 Discussion

Le principe de la stratégie globale est intéressant surtout au début de la simulation puisqu'on a besoin de plus d'exploration au début pour construire la base de connaissance de la firme. Cependant, elle présente l'inconvénient de ne pas pouvoir réapprendre ou explorer une fois qu'elle a basculé dans l'exploitation. Ceci ne permet pas de tenir compte des nouvelles variations du marché qui surviennent une fois que la firme a appris. Les connaissances de la firme peuvent devenir ainsi obsolète et son choix d'action peut devenir inadéquat au contexte courant. Ce qui peut causer sa perte.

La stratégie locale reconsidère le choix à chaque période. Elle base ce choix sur les informations courantes. Elle paraît intéressante.

Cependant, la performance de ces deux stratégies -locale et globale- dépend du facteur de gain, du nombre de périodes et du seuil de probabilité d'exploration fixé dans XCS (voir les expérimentations au Chapitre 8, Section 8.3.2). Pour éviter la sensibilité des techniques de Wilson, nous proposons une approche basée sur les méta-règles.

## 6.4.2 Les méta-règles

Le but de cette section est de présenter notre proposition de méta-règles et leurs évolutions successives.

### 6.4.2.1 Stratégie basée sur la variation de la période d'exploitation

Nous proposons des méta-règles pour contrôler l'activation de l'exploration et l'exploitation. Ces méta-règles adaptent le choix entre l'exploration et l'exploitation à l'évolution des performances de la firme. Elles peuvent être considérées comme étant une combinaison de la technique locale et de la technique globale.

Ces méta-règles permettent l'ajustement des périodes d'exploration et d'exploitation selon la variation des performances de la firme. Elles sont basées sur les paramètres suivants :

- $m$  le nombre de périodes durant lesquelles l'exploration est utilisée,
- $n$  le nombre de périodes durant lesquelles l'exploitation est utilisée.

Ces méta-règles sont appliquées par la firme après  $m$  périodes d'exploration et  $n$  périodes d'exploitation. L'idée correspondante est d'évaluer l'apprentissage de la firme pendant l'exploitation et de varier ensuite la valeur de  $n$  en fonction de l'évolution des performances de la firme. Ces méta-règles sont exprimées comme suit :

- Si la  $Perf[t + m] > Perf[t + m + n]$ , le système doit continuer à apprendre ; par conséquent le nombre de périodes d'exploitation  $n$  doit être réduit :  

$$n = n^*(1 - \text{tauxExploitation}),$$
- Si la  $Perf[t + m] \leq Perf[t + m + n]$ , le système a suffisamment appris et le nombre de périodes d'exploitation  $n$  doit être augmenté :  

$$n = n^*(1 + \text{tauxExploitation}).$$

où *tauxExploitation* correspond au pourcentage de réduction ou d'augmentation du nombre de périodes d'exploitation  $n$ . Ce taux peut être fixe ou variable.

$n$  est toujours positif pour ne pas bloquer le système dans l'exploration. L'objectif de ces méta-règles est d'augmenter l'exploitation une fois que la firme a appris tout en maintenant l'exploration de temps en temps afin de tenir compte des petites variations du marché. Ceci est possible en maintenant la valeur de  $m$  positive aussi.

Les méta-règles considèrent les nouvelles variations de l'environnement, quand la firme a déjà appris. Elles sont simples et rapprochent le comportement du système à celui du décideur réel. Contrairement à certaines techniques de Wilson, elles permettent à la firme de retourner à l'exploration et n'utilisent pas le facteur de gain.

Ces méta-règles améliorent les performances de la firme comme le montreront les résultats de la section 8.3.2.2. Mais, ces résultats sont sensibles aux valeurs de  $m$  et de

$n$  (voir la Section 8.3.2 du Chapitre 8). Nous avons donc proposé une deuxième version de ces méta-règles.

#### 6.4.2.2 Stratégie basée sur la variation de la période d'exploitation et de la période d'exploration

De grandes valeurs  $m$  au début de la simulation, peuvent être bénéfiques à la firme pour enrichir sa base de classeurs mais peuvent s'avérer néfastes quand la firme a suffisamment appris. Ces valeurs peuvent entraîner la négligence des actions les plus appropriées à un contexte donné.

Nous proposons donc une deuxième version des méta-règles. Cette version permet de varier à la fois  $m$  et  $n$ . Les meta-règles évaluent les périodes d'exploration et les périodes d'exploitation indépendamment et agissent en conséquent.

1. Si la firme est à la fin d'une période d'exploration,
  - Si  $Perf[t] > Perf[t + m]$  alors le système doit continuer à apprendre, le nombre de périodes d'exploration  $m$  va être augmenté :  
 $m = m * (1 + \text{tauxExploration})$  et l'exploration va être reprise,
  - Si la  $Perf[t] \leq Perf[t + m]$  alors le système a suffisamment appris et le nombre de périodes d'exploration doit être réduit :  
 $m = m * (1 - \text{tauxExploration})$ , et c'est l'exploitation qui va être lancée,
2. Si la firme est en fin de période d'exploitation
  - Si la  $Perf[t] > Perf[t + n]$  alors le système doit reprendre l'apprentissage et par conséquent le nombre de périodes d'exploitation va être réduit :  
 $n = n * (1 - \text{tauxExploitation})$  et l'exploration va être reprise,
  - Si la  $Perf[t] \leq Perf[t + n]$  alors le système a suffisamment appris et le nombre de périodes d'exploitation doit être augmenté :  
 $n = n * (1 + \text{tauxExploitation})$  et l'exploitation va être reprise.

Ces meta-règles sont simples et tiennent compte des valeurs de  $m$  et  $n$ .

## 6.5 Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre le dilemme d'exploration/exploitation dans le contexte des systèmes économiques. Nous avons donné des détails sur l'intégration des techniques d'exploration dirigée dans XCS. Nous avons ensuite adapté deux des techniques de Wilson afin de les appliquer dans un contexte dynamique. Nous avons aussi proposé une approche adaptative pour la résolution du problème d'exploration/exploitation dans un contexte complexe. Cette approche est simple et se rapproche du comportement humain. Les expérimentations correspondantes présentées dans la Section 8.3.2 du Chapitre 8 montrent que ces techniques de choix améliorent les performances de la firme.

Cependant, ces performances peuvent encore être améliorées si les firmes élargissent leur perception et tiennent compte de la structure organisationnelle des marchés. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation des formes organisationnelles et leurs interactions avec les firmes.

## Chapitre 7

# Les formes organisationnelles

### 7.1 Introduction

A part l'adaptation à l'environnement et la recherche d'un équilibre entre l'exploration et l'exploitation, Baum et Rao [14] ont identifié un autre critère permettant la survie de la firme. Il s'agit de l'adaptation à de nouvelles formes organisationnelles capables d'être concurrentielles dans un marché turbulent. La forme organisationnelle est considérée par la majorité des travaux comme étant *une entité regroupant un ensemble de firmes ayant des stratégies et structures similaires*.

Les formes organisationnelles sont importantes et leur diversité permet aux sociétés de répondre aux problèmes sociaux. A long terme et dans un contexte de marché dynamique, la diversité peut être maintenue ou augmentée par l'émergence de nouvelles formes organisationnelles. Ces formes organisationnelles constituent le moteur de l'évolution organisationnelle. Une importante composante du changement organisationnel au niveau macro correspond au remplacement des formes organisationnelles existantes par de nouvelles formes organisationnelles.

Cependant, malgré son importance peu de travaux ont modélisé le concept de formes organisationnelles. La majorité des travaux est d'ordre théorique et analyse les facteurs conduisant à l'émergence de nouvelles formes organisationnelles. Ce chapitre définit et modélise le concept de forme organisationnelle. Il clarifie l'effet mutuel des firmes et des formes organisationnelles, en précisant :

- comment les firmes influencent-elles les formes organisationnelles ?
- comment les formes organisationnelles influencent-elles les firmes ?
- comment les formes organisationnelles émergent-elles ?

## 7.2 Définition des formes organisationnelles

Romanelli [127] offre la définition suivante : « Une forme organisationnelle correspond aux caractéristiques d'une organisation qui l'identifient comme étant une entité distincte tout en la classant en même temps, comme membre d'un groupe d'organisations similaires ».

Selon Bruederer et Singh [27], la forme organisationnelle représente la structure et la stratégie de la firme. Elle est considérée comme un ensemble de routines stratégiques. La forme organisationnelle détermine donc le macro-comportement d'une organisation et un tel comportement peut être représenté par un ensemble de routines. Une routine a été définie par Nelson et Winter comme étant tout modèle comportemental prédictible de firmes. Ce terme inclut des caractéristiques telles que les routines bien spécifiées de production, politiques d'investissement et procédures d'engagement et de révocation du personnel. L'ensemble des routines de haut niveau peut décrire la structure et la stratégie de la firme. Les formes organisationnelles peuvent être identifiées par des ensembles de routines stratégiques. Une forme est par conséquent une représentation de la structure et de la stratégie d'une firme.

Levinthal [94] a défini les formes organisationnelles par une configuration particulière des attributs d'une organisation.

Carley [33] considère la forme organisationnelle comme une représentation de l'architecture d'une organisation. Le type de forme organisationnelle ou d'architecture dépend de l'historique des changements effectués et de l'architecture organisationnelle initiale. Une forme organisationnelle est une combinaison particulière d'agents, de tâches, ressources et formes architecturales.

L'année 1999 a été l'année où un grand intérêt a été porté aux formes organisationnelles. Plusieurs travaux parmi lesquels nous pouvons citer ceux de Lewin et Wolderba [96], Baum et Rao [14], Carroll et al. [31] se sont intéressés aux formes organisationnelles.

Lewin et Wolderba [96] ont identifié les formes organisationnelles aux types d'organisations. Nous pouvons citer par exemple la M-forme et la U-forme. Ils ont permis dans leur travail d'identifier les caractéristiques historiques et contextuelles relatives à l'émergence de nouvelles formes organisationnelles.

Baum et Rao [14] notent que les nouvelles formes organisationnelles sont le résultat de processus qui isolent un ensemble d'organisations d'un autre. Ils définissent la forme organisationnelle par un ensemble de caractéristiques fondamentales des organisations à savoir, les buts, relation d'autorité, technologie et stratégie du marché. Les formes organisationnelles correspondent donc à une mémoire institutionnelle permettant de préserver et propager l'information d'organisation et de production. Ces caractéristiques sont difficiles à changer. Elles fournissent une liste compacte d'attributs relativement stables et signifi-

catifs du côté de l'adaptation sur lesquels se basent des distinctions relativement stables et vitales entre les différentes formes organisationnelles. Les organisations dans une même forme ont les mêmes caractéristiques de base et se différencient par les caractéristiques périphériques tels que la taille et le nombre de sous-routines.

Polos, Carol et Hannan [115], [116] considèrent les formes organisationnelles comme un type d'identités codées culturellement. Les identités sont définies en terme de codes sociaux qui spécifient les aptitudes qu'un acteur peut posséder d'une manière légitime. Les formes organisationnelles sont des entités plus abstraites que les firmes qui sont appliquées à travers le temps et qui peuvent être identifiées par les acteurs sociaux. Selon Polos et al. [116], les formes organisationnelles sont des entités plus abstraites qui s'appliquent à travers l'espace et le temps.

Dosi et Nelson [46] définissent la forme organisationnelle par les traits organisationnels et comportementaux des firmes. Ces traits ont été identifiés par des routines qui traduisent les actions et décisions à prendre pour avoir une bonne performance.

Une définition commune peut être synthétisée à partir de toutes ces définitions : *une forme organisationnelle est une entité abstraite décrivant un ensemble d'organisations ayant des comportements et des structures similaires. Les comportements peuvent correspondre à des routines, des attributs ou des stratégies. Ils dépendent du modèle de firme utilisé.*

Une forme organisationnelle permet de fournir des informations relatives à l'évolution du système à travers le temps tels que les groupes dominants. Elle est nécessaire pour le processus d'évolution organisationnelle. Elle permet aux organisations d'avoir un retour (feedback) de leurs actions.

## 7.3 Exemples de formes organisationnelles

Ce paragraphe décrit deux exemples de formes organisationnelles spécifiques au domaine des librairies et au domaine hospitalier.

### 7.3.1 Les librairies

Voici un exemple de trois formes organisationnelles différentes dans le domaine du marché du livre : Les librairies de quartier, la FNAC et AMAZON. Ces formes diffèrent par leurs stratégies traduites par l'utilisation de différentes ressources physiques et humaines telles que :

**l'espace occupé** les librairies de quartier ne requièrent qu'un espace réduit leur permettant d'avoir un stock réduit de livre et c'est ce qui engendre leur spécialisation dans

un certain type de livres. La FNAC, quand à elle nécessite plus d'espace du fait de la variété des produits qu'elle vend. AMAZON par contre nécessite un espace intermédiaire.

**le personnel** le nombre d'employés diffère d'une forme à une autre. Pour AMAZON et la FNAC, le nombre est très important. Il se compte par milliers d'employés. Ce qui n'est pas le cas des librairies de quartier qui nécessitent une dizaine d'employés au maximum plus spécialisés que les premiers (connaissent en général les livres qu'ils vendent et permettent ainsi d'orienter les clients lors de leurs acquisitions).

**Marketing** la FNAC et surtout AMAZON investissent des sommes colossales en Marketing. Elles achètent leurs parts de marché à des millions d'euros (achats d'annuaires, publicité sur le net et à travers d'autres moyens). Les librairies de quartier par contre n'investissent pas en Marketing et ont une clientèle composée d'habitues trouvant de quoi satisfaire leurs préférences.

**Les nouvelles technologies** les librairies virtuelles telles que AMAZON et la FNAC investissent lourdement en matériel informatique (surtout lors de la création des sites pour la gestion des ouvrages et de la clientèle), ce qui n'est pas le cas des librairies de quartier où un seul ordinateur pourrait couvrir les besoins.

**La diversification des produits** AMAZON essaie de se spécialiser dans les produits non généralistes, qui peuvent être difficilement trouvés dans les librairies traditionnelles (spécialisation des références).

### 7.3.2 Les unités hospitalières

Ruef [129] donne un exemple de formes organisationnelles dans le domaine médical. Il distingue les formes organisationnelles selon les quatre fonctions différentes dans le domaine médical :

**Le ravitaillement des services de santé** différents hôpitaux, cliniques et pratiques médicales, etc.

**Le financement et la coordination des services de santé** groupe d'assurances, les fournisseurs préférés, etc.

**Les éducateurs dans les services de santé** les écoles de médecine, les écoles d'infirmiers, etc.

**Les unités d'analyse biologiques** les laboratoires d'analyse, les banques du sang, etc.

## 7.4 Modèles de formes organisationnelles

Comme il a été déjà mentionné dans la première partie de ce travail, il n'existe pas beaucoup de travaux modélisant les formes organisationnelles. Voici une présentation des rares modèles décelés dans la littérature. Ces deux modèles se divisent en deux sous-groupes.

**Les modèles qui offrent une modélisation effective et simple de la forme** : Levinthal [94] suivi par Jacoby [76] ont modélisé la forme organisationnelle par un chromosome. Ce chromosome représente selon Levinthal, les  $N$  attributs d'une organisation qui peuvent prendre respectivement uniquement les valeurs 1 et 0. L'espace des performances se constitue donc de  $2^N$  types possibles de formes organisationnelles. Le degré d'interaction des attributs influence la performance de la forme. En particulier, la contribution d'un attribut de l'organisation à sa performance globale est influencée par  $k$  autres attributs.

Bruederer Et Singh [27] supposent dans leur modèle que la forme organisationnelle détermine le macro-comportement d'une firme et qu'un tel comportement peut être représenté par un ensemble de routines. Ils supposent aussi que le coût de changement de ces routines est peu élevé. Chaque forme organisationnelle est représentée dans ce modèle par une séquence de 20 routines. Chaque routine est représentée par l'une des valeurs 1, 0 ou #. La valeur 1 correspond à une spécification correcte par la forme organisationnelle. La valeur 0, par contre, correspond à une spécification incorrecte et # spécifie que la routine est inconnue et qu'elle doit être découverte par l'apprentissage organisationnel.

Nous pouvons remarquer que ces modèles sont dépendants du modèle de firmes considéré. De plus, l'utilisation d'une représentation binaire peut limiter le nombre et le choix entre les formes organisationnelles.

**Les modèles plus généraux** : Assens et Baroncelli [6] ont donné une modélisation spécifique aux formes organisationnelles basée sur les réseaux. Une forme organisationnelle est donc considérée comme un réseau où les noeuds représentent les différents acteurs économiques.

Carley [33] considère une forme organisationnelle comme une représentation de l'architecture des organisations. Elle est exprimée par un réseau d'interactions à travers lequel les agents, les ressources et les tâches sont connectés et incrustés. Le type de forme organisationnelle ou d'architecture dépend de l'historique des changements effectués et de l'architecture organisationnelle initiale.

Ces deux modèles mettent l'accent sur l'interaction entre les formes organisationnelles et les firmes sans pour autant nous donner une modélisation particulière des formes organisationnelles.

Nous proposons dans la section suivante un modèle de forme organisationnelle basé sur le modèle des ressources.

## 7.5 Notre modélisation des formes organisationnelles

Notre modèle de firme est basé sur les ressources et les stratégies. Chaque stratégie définit les variations des différentes ressources. Les stratégies comportent les différences et similarités structurelles des firmes qui les adoptent. Ce point de vue est partagé par Janczak et al. [77] qui ont noté que l'organisation et la stratégie sont des activités com-

plémentaires, au point que la forme d'organisation et la stratégie de la firme peuvent se confondre. Les firmes peuvent être donc organisées selon ces variations qui sont le résultat des stratégies sélectionnées.

Puisqu'une forme organisationnelle est une agrégation de firmes similaires, elle peut être définie par :

- des variations de ressources,
- des performances dépendant des performances des firmes qui l'adoptent.

Les variations des ressources sont décrites par une granulation de l'intervalle des variations possibles  $[0, 1]$ .

- 0 correspond à aucune variation de la ressource,
- 1 par contre correspond à une variation maximale.

Plusieurs méthodes et techniques peuvent être utilisées pour déterminer cette granulation. Ces méthodes se divisent en deux catégories : précise et floue (voir Figure 7.1). La granulation floue est utilisée puisqu'elle permet de mimer le raisonnement humain et la manipulation de l'information résultant de la perception (Zadeh [181]). Elle permet une meilleure représentation des classes de variation des ressources et une meilleure prise de décision. En effet, la représentation des connaissances par des mots ou valeurs symboliques est basée sur des fondations mathématiques. La représentation des connaissances par les perceptions, permet de mieux représenter le comportement humain (Zadeh [182]). La manipulation des perceptions a un rôle important pour le processus décisionnel (Zadeh [182]). La différence qui existe entre une mesure et une perception est que la première correspond à des valeurs précises alors que la deuxième correspond à une granule floue (valeurs floues, valeurs symboliques). Une granule floue, telle que la montre la Figure 7.1, est un groupe d'objets dont la transition de l'appartenance à la non appartenance est graduelle.

L'imprécision des granules, leurs attributs et leurs valeurs sont des caractéristiques de la manière dont les concepts humains sont formés, organisés et manipulés. La granulation floue peut être vue comme un moyen humain pour la compression d'information, pour le raisonnement, et pour dégager des décisions rationnelles dans un environnement d'imprécision, d'incertitude et de vérité partielle. C'est ce qui nous motive à l'utiliser.

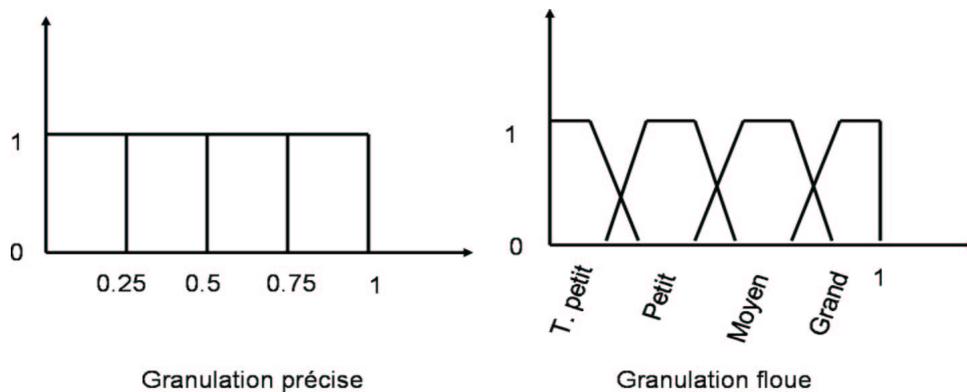


FIG. 7.1 – Granulation précise et floue

Une variation de ressources est par conséquent représentée par des valeurs symboliques telles que : *très petit*, *petit*, *moyen* et *grand*. Nous utilisons le même ensemble de valeurs pour les différentes ressources. Afin de déterminer ces valeurs symboliques, chaque variation est normalisée pour aboutir à une valeur incluse dans l'intervalle  $[0, 1]$  :

$$varNormal_i = \frac{variations_i - min}{max - min}; \quad (7.1)$$

où  $variations_i$  correspond à la variation de la ressource  $i$  et  $max$  et  $min$  correspondent respectivement au maximum et au minimum de ces  $variations$ . Cette normalisation permet d'homogénéiser les variations des différentes ressources de la firme surtout qu'elles n'ont pas le même ordre de grandeur.

Une forme organisationnelle est représentée par un vecteur de valeurs floues. Par exemple, le vecteur [*petit*, *grand*, *moyen*] représentant trois ressources d'une firme peut décrire une forme organisationnelle qui attribue une plus grande priorité à la deuxième ressource. Voici dans ce qui suit le modèle formel des formes.

Etant donné  $n$  ressources et un ensemble de  $k$  valeurs floues  $VF$

$$VF = (vf_1, vf_2, \dots, vf_k) \quad (7.2)$$

une forme organisationnelle  $fo_j$  peut être représentée par un ensemble de  $n$  valeurs floues  $(vf_{j,1}, vf_{j,2}, \dots, vf_{j,n})$  :

$$vf_{j,i=1..n} \in VF \quad (7.3)$$

Cet ensemble de valeurs floues permet de déterminer l'ensemble des firmes qui appartiennent à cette forme organisationnelle.

La performance  $Pfo_j$  d'une forme organisationnelle  $fo_j$  est définie comme suit :

$$Pfo_j = nbf_j * aggreg(Y_1, Y_2, \dots, Y_{m_j}) / nbf \quad (7.4)$$

avec

- $nbf_j$  est le nombre de firmes dans la forme organisationnelle,
- $nbf$  est le nombre moyen de firmes dans les formes organisationnelles,
- $Y_{i/i=1..m_j}$  sont les performances des  $m_j$  firmes de la forme organisationnelle,
- $agreg$  est un opérateur d'agrégation.

## 7.6 Influences mutuelles des firmes et formes organisationnelles

Les différentes recherches qui ont porté sur les formes organisationnelles telles que celles de Baum et Rao [14], et Lee [92] ont noté qu'il existe une relation circulaire entre

les firmes et les formes organisationnelles. La légitimité et la survie des formes organisationnelles dépend des firmes qui les adoptent. En outre, la survie des firmes dépend aussi des formes organisationnelles qu'elles adoptent. Lee [92] a déclaré que la densité des firmes dans une forme organisationnelle spécifique attribue plus de légitimité par rapport aux autres formes organisationnelles. En contre partie, cette légitimité augmente le taux de création des firmes avec cette forme organisationnelle et diminue leurs taux de mortalité.

En démontrant que les phénomènes de sélection et d'adaptation sont dépendants, Levinthal [94] a prouvé aussi que les firmes qui survivent sont celles qui réussissent à intégrer une forme organisationnelle ayant acquis une légitimité. Dans ce travail, Levinthal n'a pas étudié simultanément l'émergence de nouvelles formes organisationnelles et l'évolution des firmes adaptatives.

Afin d'étudier cette influence mutuelle des firmes et des formes organisationnelles, et de considérer la relation entre sélection et adaptation, nous représentons ce système économique par un système multi-agents adaptatifs modélisant les firmes, les formes organisationnelles et les interactions entre elles. Ces deux types d'entités représentent les deux niveaux de la figure 7.2.

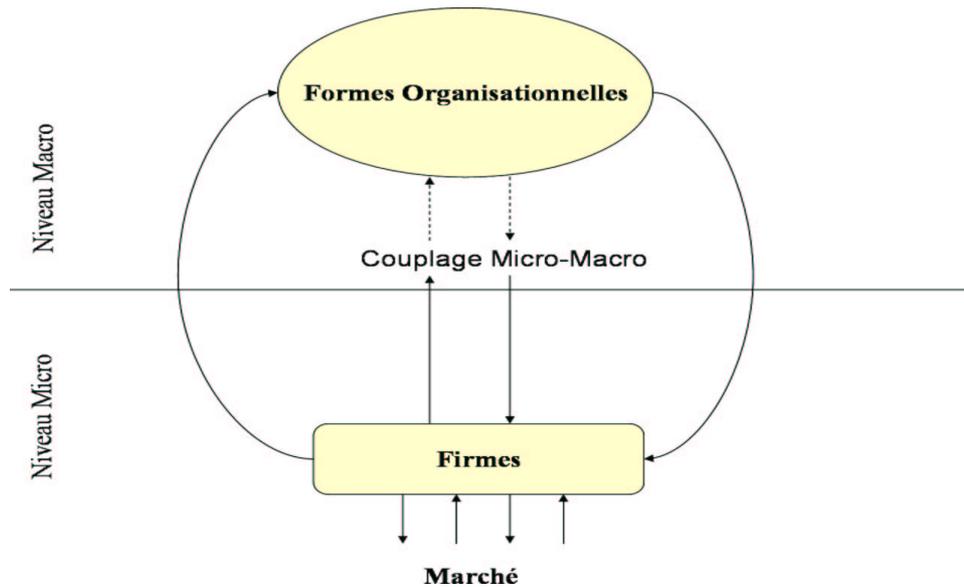


FIG. 7.2 – Les composantes du système multi-agents adaptatifs représentant les firmes et les formes organisationnelles

- le niveau micro (firmes) : représente une organisation de firmes qui ont la capacité de percevoir leur environnement (les autres firmes, la population des formes organisationnelles) et agir continuellement selon l'évolution de leur état interne et de l'évolution de leur environnement,
- le niveau macro (formes organisationnelles) : représente une population de formes organisationnelles. Ce niveau représente le comportement du système (en particulier

le comportement de la population de firmes). Il permet aux firmes d'améliorer la perception de leur contexte et d'améliorer leur adaptation.

Dans ces modèles multi-agents adaptatifs, nous considérons des modèles économiques qui sont très proches des organisations réelles, où les firmes et les formes organisationnelles peuvent apparaître et disparaître dynamiquement. Le but de ces modèles est de clarifier comment les firmes influencent les formes organisationnelles, comment les firmes et les formes organisationnelles sont sélectionnées et comment les formes organisationnelles influencent les firmes. Ces systèmes n'atteignent jamais un état d'équilibre et sont en perpétuel mouvement.

Tel que nous l'avons montré dans le chapitre 2, les systèmes économiques sont des systèmes complexes. Leur évolution au niveau micro influence donc le niveau macro et vice-versa. La disparition d'une forme organisationnelle par exemple, peut engendrer la disparition de toutes les firmes qui l'adoptent. Les relations entre ces deux niveaux sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

### 7.6.1 Relations entre firmes et formes organisationnelles

Les relations entre firmes et formes organisationnelles sont réalisées par une organisation d'agents *Moniteurs* (voir Figure 7.3).

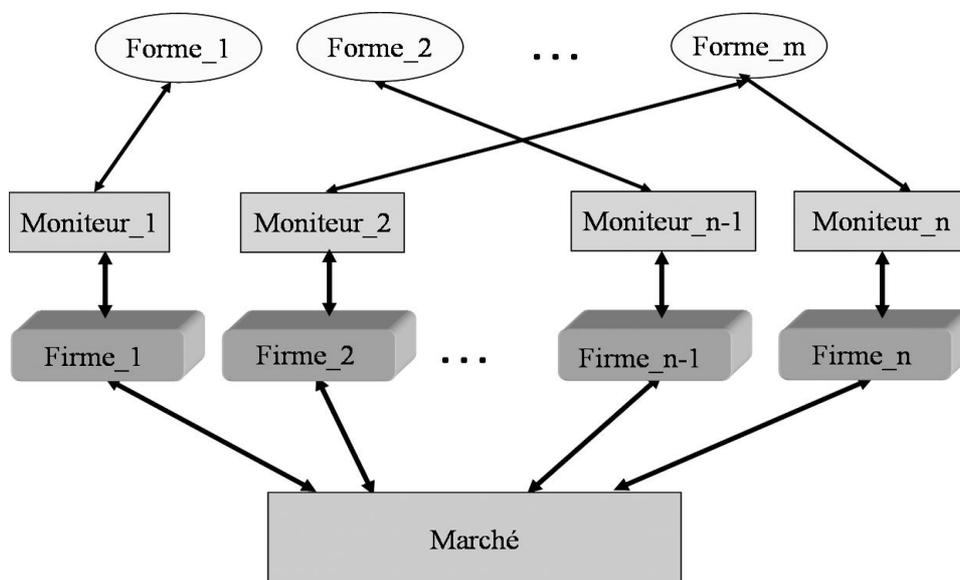


FIG. 7.3 – Firmes et formes organisationnelles

Les agents *Moniteurs* sont des agents réactifs. Ils maintiennent deux types d'informations : la tendance de variation des ressources au niveau des firmes et la tendance des variations des populations de formes organisationnelles. N'importe quelle modification dans les firmes est perçue par ces *Moniteurs* et propagée vers les formes organisationnelles qui

s'adaptent en conséquence. De plus, toute modification d'une forme organisationnelle est perçue et transmise aux firmes. Un agent *Moniteur* est associé à chaque firme. Il gère les interactions entre cette firme et les formes organisationnelles. L'utilisation d'un *Moniteur* pour chaque firme, au lieu d'un seul gérant toutes les interactions, nous permet d'une part d'analyser en temps réel les informations observées et nécessaire pour l'adaptation du système telle que la disparition d'une firme ou d'une forme organisationnelle, et d'autre part de conserver l'un des avantages relatifs à l'utilisation des systèmes multi-agents qui est la décentralisation. Ce *Moniteur* observe les variations des ressources de la firme et détermine la forme organisationnelle correspondante en utilisant les valeurs floues. Il calcule le degré d'appartenance  $\pi(f_i, fo_j)$  de la firme  $f_i$  aux différentes formes organisationnelles  $fo_j$  :

$$\pi(f_i, fo_j) = \sum_{k=1}^n \pi(vf_{jk}/\Delta_{i,k})/n \quad (7.5)$$

avec

- $vf_{jk}$  est la valeur floue de la ressource  $k$  pour la forme organisationnelle  $fo_j$ ,
- $\Delta_{i,k}$  est la variation de la ressource  $k$  de la firme  $f_i$ ,
- $n$  est le nombre de ressources.

$$\pi(vf_{j,k}/\Delta_{i,k}) = \begin{cases} 0, & \text{si } \Delta_{i,k} < a_j \text{ ou } \Delta_{i,k} \geq d_j; \\ \frac{d_j - \Delta_{i,k}}{b_j - a_j}, & \text{si } a_j \leq \Delta_{i,k} < b_j \\ 1, & \text{si } b_j \leq \Delta_{i,k} < c_j; \\ \frac{\Delta_{i,k} - c_j}{d_j - c_j}, & \text{si } c_j \leq \Delta_{i,k} < d_j. \end{cases} \quad (7.6)$$

avec  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  et  $d_j$  sont les caractéristiques de la valeur floue  $vf_j$  présentées dans la Figure 7.4.

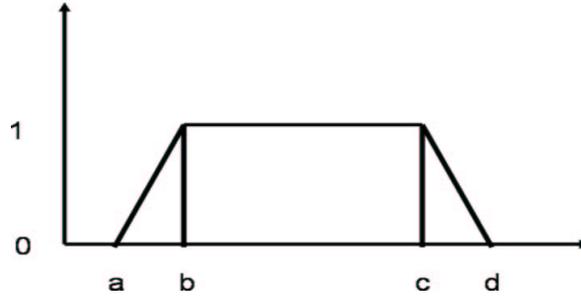


FIG. 7.4 – Caractéristiques de la valeur floue

Par conséquent, une firme  $f_i$  appartient à la forme organisationnelle  $fo_l$  si :

$$\pi(f_i, fo_l) = \max_{j=1,m} \pi(f_i, fo_j) \quad (7.7)$$

et

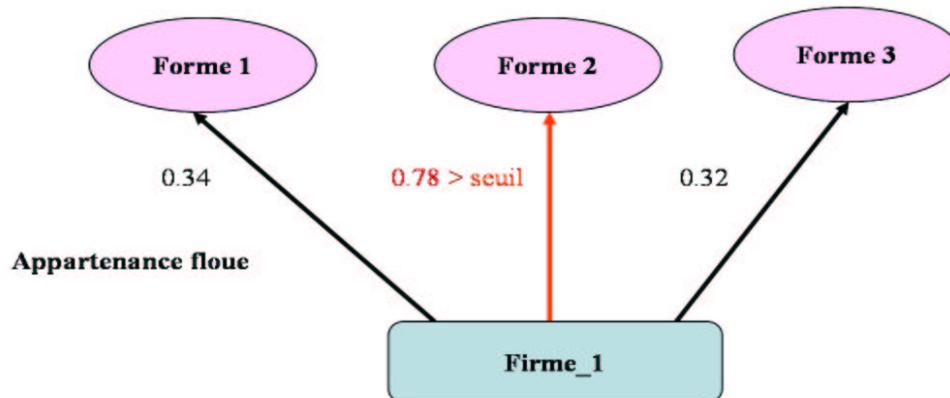


FIG. 7.5 – Appartenance des firmes aux formes organisationnelles

$$\pi(f_i, f_{oi}) > \text{SeuilApp} \quad (7.8)$$

où

- *SeuilApp* est un seuil défini par le concepteur,
- et  $m$  le nombre de formes organisationnelles.

Certaines firmes ne sont attachées à aucune forme organisationnelle. Elles sont appelées orphelines.

### 7.6.2 Influence de la dynamique des formes organisationnelles sur les firmes

Les firmes individuelles en tant qu'agents à rationalité limitée sont supposées avoir une capacité d'apprentissage leur permettant de reconnaître les meilleures formes organisationnelles (Kloss [82]). La diversité des formes organisationnelles peut être expliquée par la diversité de l'environnement dans lequel les firmes interagissent (Jacoby [76]).

Les firmes doivent intégrer les formes organisationnelles dans leur perception. Le contexte des firmes défini dans le chapitre 5 par les paramètres internes de la firme et la perception des autres firmes sur le marché doit être enrichi. Nous allons donc le compléter par la perception de la population des formes organisationnelles. Chaque firme prend en considération le modèle de la population de formes organisationnelles sur le marché. Cette population peut être représentée par des indicateurs tel que : la meilleure forme organisationnelle, la plus mauvaise forme organisationnelle et la forme organisationnelle courante. Les meilleures et plus mauvaises formes organisationnelles sont déterminées en fonction de leurs performances.

Le classeur de la firme va correspondre dans ces conditions à :

Classeur intégrant les formes dans la perception
$K \in [300,400[$
$B \in [100,200[$
$X = \{x_1 \in [0,10[, x_2 \in [20,30[, x_3 \in [10,20[, x_4 \in [0,10[,$ $x_5 \in [0,10[, x_6 \in [0,10[, x_7 \in [0,10[, x_8 \in [0,10[ \}$
$Y = \{y_1 \in [10,20[, y_2 \in [10,20[ \}$ ,
$K\_moyen \ x_3 \in [600,700[$
$B\_moyen \in [200,250[$
$NbFirmes \in [0,100[$ ,
$Y\_moyen = \{y\_moy1 \in [20,30[, y\_moy2 \in [10,20[ \}$
$Ma\_forme = forme\_2$
$Meilleure\_forme = forme\_4$
$Plus\_mauvaise\_forme = forme\_6$
$Action = Strategie1$ ,
$(p)=0.7, (e)=0.01, (F)=100$

$Ma\_forme$  correspond à la forme courante de la firme.

Nous pouvons remarquer que les formes organisationnelles sont elles mêmes en compétition et essaient de manière indirecte d'acquérir une légitimité en rassemblant le plus grand nombre de firmes sous leur égide. Ainsi, un modèle de la population des formes peut se limiter à la position de la forme organisationnelle à laquelle elle appartient par rapport aux autres formes organisationnelles sur le marché. Pour ce faire, nous pouvons utiliser la valeur de performance relative (voir Section 5.3.2 du Chapitre 5).

Nous pouvons considérer comme autre modèle la distance respectivement entre la forme organisationnelle courante, la meilleure forme organisationnelle et la plus mauvaise. D'après Friedman [60], les formes organisationnelles sous-optimales sont supposées être sélectionnées par les forces sélectives du marché et les firmes qui s'y adhèrent prétendument ne vont pas survivre.

### 7.6.3 L'apparition de nouvelles formes organisationnelles

La majorité des travaux en écologie organisationnelle s'est intéressée au niveau de la population et a étudié la croissance et le déclin de populations correspondantes à des formes organisationnelles établies. Rares sont les travaux qui se sont intéressés au niveau de la communauté pour étudier l'apparition, la persistance et la disparition de formes organisationnelles. Nous pouvons citer les travaux de Aldrich [2], Romanelli [127] et ceux de Baum et al. [14]. Nous allons dans ce qui suit nous intéresser à ce phénomène.

L'évolution de nouvelles formes organisationnelles comporte une interaction complexe entre les processus écologiques et historiques (généalogiques). L'émergence et le caractère d'une nouvelle forme organisationnelle sont modelés d'une part, par l'opportunité de créer de nouveaux espaces de ressources et, d'autre part, par les caractéristiques et la créativité des firmes existantes et de la compétition qui existe entre elles. Les nouvelles formes organisationnelles sont le résultat de processus qui isolent un ensemble de firmes d'un autre [14].

En effet, les formes organisationnelles sont contraintes par leurs performances et leur légitimité. Elles peuvent disparaître quand il n'existe plus de firmes qui les adoptent ou encore quand leurs performances décroissent successivement. L'émergence d'une nouvelle forme organisationnelle est, par contre, conditionnée par l'existence d'une firme orpheline performante. Cette firme peut être une firme innovatrice qui peut engendrer l'apparition d'une nouvelle forme organisationnelle. Matthews [101] note qu'une forme organisationnelle peut être le résultat d'une sélection environnementale d'une firme particulière.

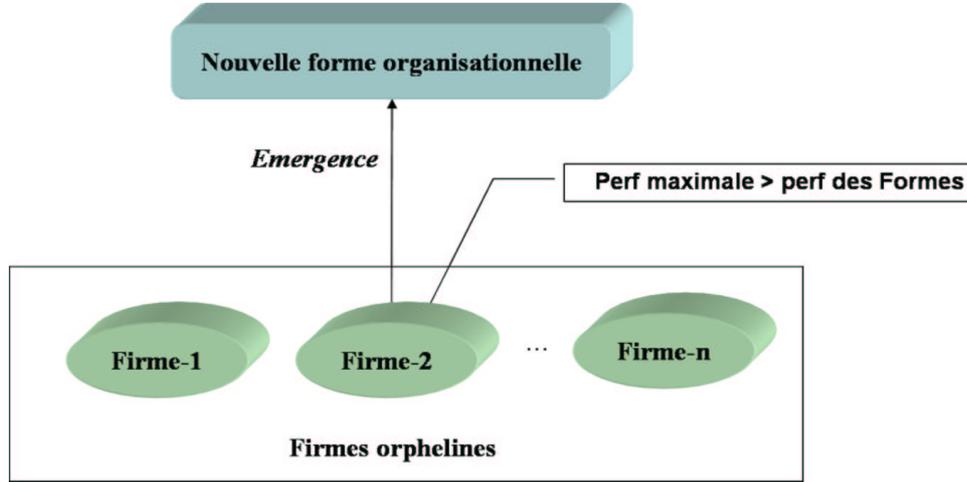


FIG. 7.6 – Emergence d'une forme organisationnelle

Pour contrôler ces formes, nous avons introduit un agent nommé agent *Controlleur*. Celui-ci utilise la meilleure firme orpheline  $f_i$  pour créer une nouvelle forme organisationnelle. La définition de cette forme organisationnelle est basée sur les variations des ressources de la firme  $f_i$ .

Pour chaque ressource  $k$  de  $f_i$  et sa variation  $\Delta_{i,k}$ , et pour chaque valeur floue  $vf_j \in VF$ , le *Controlleur* calcule de degré d'appartenance  $\pi(vf_j/\Delta_{i,k})$  en utilisant :

$$\pi(vf_{j,k}/\Delta_{i,k}) = \begin{cases} 0, & \text{si } \Delta_{i,k} < a_j \text{ ou } \Delta_{i,k} \geq d_j; \\ \frac{d_j - \Delta_{i,k}}{b_j - a_j}, & \text{si } a_j \leq \Delta_{i,k} < b_j \\ 1, & \text{si } b_j \leq \Delta_{i,k} < c_j; \\ \frac{\Delta_{i,k} - c_j}{d_j - c_j}, & \text{si } c_j \leq \Delta_{i,k} < d_j. \end{cases} \quad (7.9)$$

avec  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  et  $d_j$  comme caractéristiques de la valeur floue  $vf_j$  (voir Figure 7.4).

La valeur floue correspondant à la ressource  $k$  est  $vlf$  telle que

$$\pi(vlf/\Delta_{i,k}) = \max_{j=1,m}(\pi(vf_j/\Delta_{i,k})) \quad (7.10)$$

L'ensemble des valeurs floues  $vlf$  est par la suite utilisé par le *Controlleur* pour définir une nouvelle forme organisationnelle. Ce dernier calcule par la suite les degrés d'appartenance des autres firmes orphelines à la nouvelle forme et met à jour l'ensemble de ces firmes.

## 7.7 Conclusion

La firme représentée par le courant évolutionniste des ressources représente deux concepts différents mais complémentaires du point de vue de la stratégie. Mettre l'accent sur les ressources nous a permis de comprendre les processus micro de la firme et sa capacité à construire un avantage concurrentiel. Les formes organisationnelles nous fournissent, par contre, un moyen d'agrégation des firmes en groupes ayant un sens en économie en se basant sur la similarité de leurs stratégies. Les deux concepts sont en effet complémentaires puisque l'un informe l'autre et améliorent ainsi notre compréhension de la compétition et de la dynamique du marché.

Nous avons ainsi modélisé un système économique complet intégrant à la fois le niveau micro représenté par les firmes, le niveau macro représenté par les formes et les interactions entre ces deux niveaux. Nous avons besoin maintenant de valider ce modèle et de faire une analyse de sensibilité sur toutes les composantes. Ce sera l'objet de la prochaine partie.

Troisième partie

MOVECO



## Chapitre 8

# Implémentation et expérimentations

### 8.1 introduction

Afin de montrer l'intérêt de l'architecture multi-agents décrite dans les chapitres précédents, nous avons conçu MOVECO un outil de simulation. MOVECO permet d'une part de valider l'architecture proposée et de montrer l'intérêt des différentes techniques utilisées. D'autre part, il permet aux économistes de tester multiples scénarios et de valider leurs modèles et les hypothèses qu'ils émettent.

La réalisation de cet outil a nécessité l'enrichissement de la plate-forme DIMA d'un framework d'agents adaptatifs qui s'appuie sur XCS. Ce framework a été ensuite utilisé pour modéliser les firmes de notre système.

Ce chapitre est organisé comme suit. La première partie décrit le contexte technique et les composantes du simulateur MOVECO. La deuxième partie permet d'illustrer, à travers des expérimentations, les différentes utilisations de l'outil conçu. Cette partie présente tout d'abord le protocole d'expérimentation et les résultats les plus importants de ce travail. Ces expérimentations sont groupées en trois grandes catégories (1) l'étude du comportement et de l'adaptation et leur effet sur les firmes, (2) l'étude des problèmes d'exploration/exploitation et (3) enfin l'étude des formes organisationnelles et de leur impact sur les firmes.

### 8.2 Contexte technique

Nous présentons en premier lieu dans cette section la plate-forme DIMA (Guessoum et Briot [68]) utilisée pour concevoir le simulateur. Nous décrivons ensuite le framework

d'agents adaptatifs basé sur XCS. Nous présentons à la fin les composantes du simulateur MOVECO et l'utilisation de l'agent XCS pour modéliser les firmes.

### 8.2.1 La plate-forme DIMA

DIMA (Développement et Implémentation de Systèmes Multi-Agents) est un environnement de développement de systèmes multi-agents développé par Guessoum [68] et [67]. Cette section nous donne une idée de l'architecture de DIMA. Une description plus détaillée est fournie par Guessoum [67].

DIMA offre une architecture d'agents modulaire et la possibilité de concevoir et de réaliser différents types d'agents :

- des agents réactifs,
- des agents cognitifs,
- des agents hybrides, conçus pour allier des capacités réactives à des capacités cognitives, ce qui leur permet d'adapter leur comportement en temps réel à l'évolution de leur univers.

Un système multi-agents utilisant DIMA peut comporter un nombre quelconque d'agents hétérogènes (ayant différents comportements et différents paramètres, etc.). DIMA permet de représenter la dynamique d'un environnement en autorisant la création de nouveaux agents et la disparition de ceux qui ont atteint leur but ou ceux qui n'ont plus de ressources.

DIMA est composé de bibliothèques offrant les briques de base pour construire des modèles d'agents divers. Ces bibliothèques implémentent un grand nombre de paradigmes tel que les bases de règles ou les automates. La modularité de DIMA rend son extension et l'intégration de nouvelles architectures d'agents facile.

La composante de base des agents de DIMA est l'entité proactive. Cette entité permet de représenter les comportements. DIMA est essentiellement composée de la classe « ProactifComponent ».

Une instance de cette classe décrit :

- le but de la composante proactive défini par la méthode *isAlive()*,
- les comportements de base de la composante proactive. Un comportement de base est une suite d'actions permettant de changer l'état interne. Chaque comportement est implémenté par une méthode java de cette classe,
- le méta-comportement permet à l'agent de planifier dynamiquement ses comportements en fonction de son état interne et de sa représentation de l'environnement (Voir Guessoum [67]). Ce méta-comportement est représenté par la méthode *step()* (voir 8.1). Nous allons le représenter dans le cadre de notre agent par les systèmes de classeurs.

Méthodes	Description
isAlive	teste si la composante proactive a atteint son but
step	représente le cycle du méta-comportement
proactivityLoop	représente le méta-comportement  <pre>public void proactivityLoop()     while (this.isAlive())         this.preActivity();         this.step();         this.postActivity();</pre>
startUp()	initialise et active le méta-comportement  <pre>public void startUp()     this.proactivityInitialize();     this.proactivityLoop();     this.proactivityTerminate();</pre>

TAB. 8.1 – Méthodes de la composante proactive

Les principales méthodes de la composante proactive *ProactiveComponent* sont décrites dans la table 8.1 <sup>1</sup>

### 8.2.2 Agents adaptatifs à base de XCS

Notre framework d'agents adaptatifs est le résultat de l'intégration de l'agent de base de DIMA [68] et du framework de système de classeurs XCS proposé par Butz [29]<sup>2</sup>.

La structure d'un agent basée sur XCS, est décrite par le diagramme de classes de la Figure 8.1. La classe *XCSBasedAgent* définit le comportement de l'agent ainsi que certains paramètres nécessaires à l'utilisation de XCS tels que le nombre d'attributs à considérer, la condition de fin d'activation de XCS ou encore, la nature du problème à traiter (étape unique ou multi-étapes). XCS offre ainsi à l'agent la possibilité d'utiliser deux stratégies différentes : récompenser directement son action (étape unique) ou la récompenser à des périodes espacées qu'il fixe lui même (multi-étapes).

<sup>1</sup>cette table est extraite de la description de DIMA [67]

<sup>2</sup>une description détaillée du framework XCS est décrite par [29]

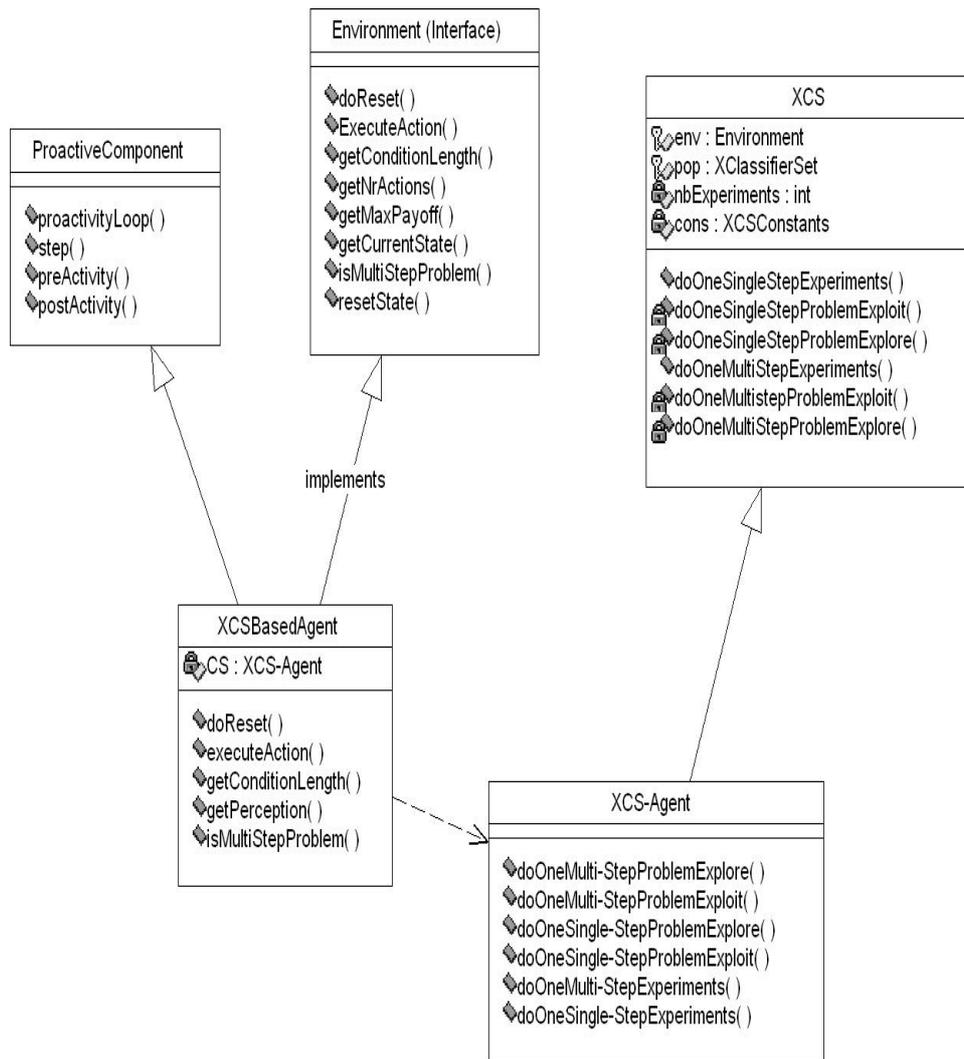


FIG. 8.1 – Diagramme de classes de l'agent XCS

La méthode *step()* de l'agent *XCSBasedAgent* active à chaque période *XCSAgent* pour choisir une action en fonction du contexte. Voici un exemple de la méthode *step()*. Celle-ci traite un problème multi-étapes *doOneMultiStepExperiment*.

```

public void step() {
cs.doOneMultiStepExperiment(explore);
}

```

La classe *XCSAgent* est une adaptation de XCS au contexte multi-agents. Une étape de *XCSAgent* est définie par l'algorithme 8.1. Cette adaptation permet de synchroniser l'apprentissage de XCS avec celui de l'agent et de rapprocher plus la décision de l'agent d'une décision dans un cadre réel.

---

**Algorithme 8.1** Algorithme décrivant une étape de XCSAgent

---

1. perception de l'état de l'environnement
  2. détermination de l'ensemble [M] des classeurs qui s'apparient à l'état de l'environnement
  3. détermination de l'ensemble des prédictions du système [PS]
  4. choix de l'action "a" en considérant [PS] soit par exploration, soit par exploitation,
  5. exécution de l'action "a" par l'agent et retour de la récompense R
  6. génération de l'ensemble d'actions [A] rassemblant tous les classeurs de [M] ayant "a" comme action,
  7. réception de la récompense R,
  8. évaluation des classeurs et application de l'algorithme génétique si possible soit dans [A] si la récompense est immédiate soit dans [A]<sub>-1</sub> dans le cas contraire.
- 

Le framework d'agents adaptatifs basé sur XCS, présenté dans cette section, enrichi la plate-forme multi-agents DIMA. Des extensions lui ont été apportées. Elles correspondent essentiellement à l'intégration de la méthode de choix entre l'exploration et l'exploitation.

### 8.2.3 MOVECO

La Figure 8.2 décrit la structure du système multi-agents conçu. Elle n'intègre pas la composante de simulation. Certaines de ces classes représentent les principales catégories de firmes définies. Les autres représentent le marché, les formes organisationnelles ainsi que les agents *Moniteurs* et l'agent *Contrôleur*, modélisant les relations entre les firmes et les formes organisationnelles.

### 8.2.4 La simulation

Pour concevoir le moteur du simulateur MOVECO, nous nous sommes basés sur celui de DIMA. Ce dernier est décrit par l'algorithme 8.2.

---

**Algorithme 8.2** Description de la simulation dans DIMA

---

1. Initialisation de la simulation : *initSimulation()*
  2. Lancement de la simulation : *simulation()*
  3. Traitement à faire à la fin de la simulation : *end Simulation()*
- 

L'initialisation de la simulation concerne l'initialisation de la population de firmes, de la population de formes organisationnelles et enfin l'initialisation de paramètres propres à la simulation tels que la durée de la simulation, le processus d'entrée des firmes, etc. Ce simulateur nous offre, en fait, plusieurs scénarios d'intégration des firmes au cours de

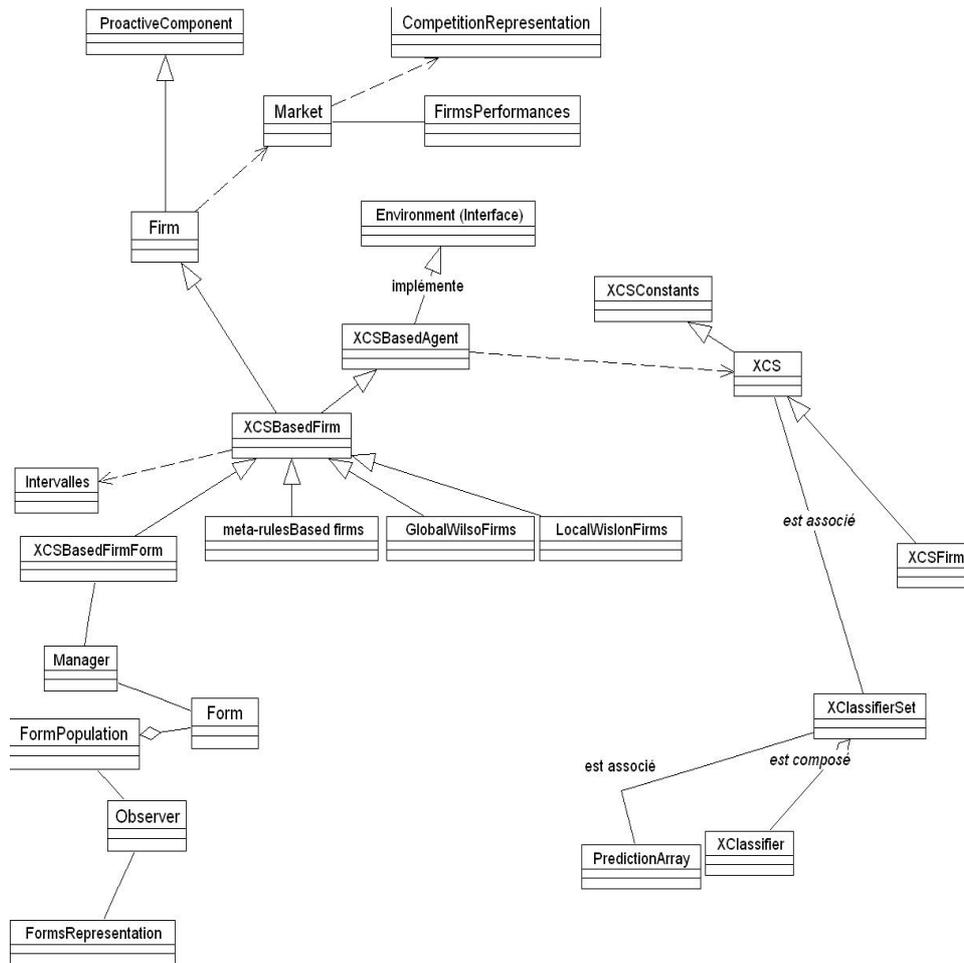


FIG. 8.2 – Diagramme de classes de MOVECO

la simulation. Il nous permet aussi de varier les conditions permettant la disparition des firmes.

Une fois l’initialisation des paramètres de la simulation faite, la simulation proprement dite est lancée. Elle est décrite par l’algorithme 8.3.

La simulation s’arrête dès que le nombre de pas de simulation fixé a priori est atteint ou que toutes les firmes quittent le marché. Lorsque nous parlons de simulation, il convient de définir la représentation temporelle. Au niveau de l’analyse du comportement d’une firme, nous nous intéressons plutôt aux changements d’états qui modifient les paramètres pertinents du modèle. Nous raisonnons en terme de périodes. La représentation temporelle choisie est donc discrète.

L’intérêt de l’outil conçu est qu’il nous offre la liberté de choisir les firmes et les caractéristiques à tester en fonction de notre objectif final. Il nous permet aussi de représenter des résultats de firmes individuelles, de populations de firmes ainsi que ceux de l’évolu-

---

**Algorithme 8.3** Description de la Simulation des firmes
 

---

Tant que la simulation est active

  Faire

    Si (la période d'activation des formes organisationnelles est atteinte)

    Alors

*activer les moniteurs (voir Section 8.24 du Chapitre 7) :*

        mettre à jour les relations firmes - formes organisationnelles

        mettre à jour la population de formes organisationnelles

*activer les firmes :*

        exécuter une étape du cycle de vie de chaque firme survivante<sup>3</sup>.

*intégrer de nouvelles firmes si les conditions du marché le permettent.*

  fin

---

tion des formes organisationnelles. L'outil réalisé permet ainsi à l'économiste de tester plusieurs scénarios et d'analyser les résultats à différents niveaux d'agrégation.

## 8.3 Expérimentation

Les principaux résultats sont issus de la combinaison de populations de 300 firmes différentes pour chaque expérimentation en fonction de l'objectif de la simulation. Ces populations peuvent se différencier par leur processus de décision, par leurs techniques de choix entre exploration/exploitation ou encore par leurs paramètres internes.

Ces populations maintiennent les mêmes paramètres de XCS quand ce dernier est utilisé, sauf si l'objectif de la simulation est l'étude de l'effet de l'un de ces paramètres :

- la taille de la population  $N$  est de 6000 pour permettre au système de représenter tous les classeurs possibles quand la généralisation n'est pas utilisée.
- la probabilité de la généralisation  $\#\_probability = 0.5$ ,
- le taux d'apprentissage  $\beta = 0.001$ ,
- le taux de croisement de l'algorithme générique = 0.8,
- le taux de mutation = 0.02,
- le minimum d'erreur = 0.01,
- la fréquence de l'algorithme génétique  $\theta_{gen} = 10$ ,
- La probabilité d'exploration = 0.5.

Afin de ne pas baser les conclusions sur une seule simulation, ce qui n'est pas représentatif, les résultats obtenus correspondent à la moyenne des valeurs obtenues par vingt simulations.

### 8.3.1 Les firmes adaptatives

La première série d'expérimentations correspond à la simulation des firmes adaptatives sans tenir compte des formes organisationnelles. L'objectif de ces simulations est de mettre en évidence l'apport des systèmes de classeurs et les problèmes qu'ils engendrent.

#### 8.3.1.1 Les firmes basées sur les règles et les firmes basées sur XCS

L'ensemble des expérimentations rapporté dans cette section concerne la validation de l'architecture de firme basée sur XCS. Pour ceci, nous avons choisi de comparer une population de firmes utilisant une base de règles (de type condition-action) statique à une population de firmes utilisant XCS pour leur prise de décision. Pour les firmes basées sur les règles, un nombre de règles figées est fourni a priori par l'économiste. Ces règles décident de la stratégie en fonction de l'évolution de la profitabilité et de la part de marché. En voici un extrait :

Si  $Prof(t) > Prof(t - 1)$  et  $Mark(t) < Mark(t - 1)$  alors utiliser *strategie\_1* qui donne plus de priorité aux investissements orientés vers les consommateurs.

Si  $Prof(t) > Prof(t - 1)$  et  $Mark(t) > Mark(t - 1)$  alors utiliser *strategie\_2* qui donne plus de priorité aux investissements orientés vers la production.

Le nombre de firmes dans chaque population est de 300 firmes. Les firmes composant ces deux populations, ont le même capital initial et les mêmes paramètres. Il se différencient par la répartition du capital ainsi que par leurs processus de prise de décision. Notre objectif étant de mettre en valeur l'influence de l'adaptation. Nous allons donc :

- examiner le comportement des populations de firmes en considérant par exemple : l'évolution du nombre de firmes, l'évolution du capital,
- étudier les comportements individuels des firmes dans des environnements où les firmes sont hétérogènes,
- étudier l'influence des paramètres internes tels que le capital initial ou encore le taux d'apprentissage de XCS,
- étudier l'influence des connaissances initiales sur la performance des firmes.

Nous utilisons le capital moyen comme indicateur de performances de ces firmes quand l'objectif est la comparaison des différentes populations de firmes.

La figure 8.3 montre l'évolution du capital moyen pour une population de firmes basées sur les règles et une population de firmes basées sur XCS. Les résultats montrent que les firmes basées sur XCS sont plus performantes que les firmes basées sur les règles. Leur capital est souvent stabilisé au dessus de celui des firmes basées sur les règles. Ceci est dû d'une part, à leur capacité de choisir leur stratégies en fonction d'un plus grand nombre de paramètres et d'autre part, à l'adaptation dynamique de leurs base de règles à l'évolution du marché. Cependant, ces firmes passent par une première phase difficile.

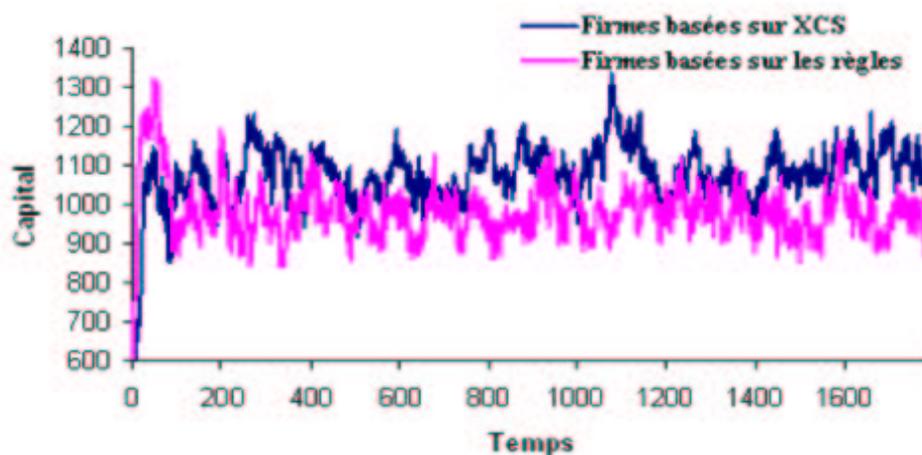


FIG. 8.3 – Comparaison du capital des firmes utilisant les règles à celles des firmes basées sur XCS

Age	Firmes basées sur XCS	Firmes basées sur les règles
Maximum	142	123
Average	23	19
Median	22	17

TAB. 8.2 – Comparaison de l'âge des firmes

Cette difficulté peut être expliquée par un choix aléatoire des stratégies au début de la simulation étant donné que la base de classeurs est initialement vide.

Ce résultat est confirmé par la comparaison de l'âge moyen, maximal et minimal des firmes. La Table 8.2 montre que l'âge moyen et maximal des firmes basées sur XCS est plus important que celui des firmes basées sur les règles. L'adaptation est donc bénéfique pour les firmes.

**8.3.1.1.1 Evolution de la population de firmes** La figure 8.4 décrit l'évolution du nombre de firmes durant la simulation. Elle montre que le nombre de firmes va croître initialement rapidement jusqu'à ce qu'il atteigne un pic. A la suite de cette densité maximale, le nombre de firme va décroître avant de se stabiliser à un niveau inférieur. Ce niveau va rester par la suite plus ou moins stable pendant une longue période.

Selon la théorie écologique qui essaie de comprendre les régularités dans l'évolution des populations de firmes, ce modèle de croissance, stabilisation et déclin est la conséquence des forces opposées générées par deux processus généraux : la légitimité<sup>4</sup> et la compétition

<sup>4</sup>La légitimité correspond à la conformité aux règles institutionnelles et aux attentes (Aldrich et al. [3])

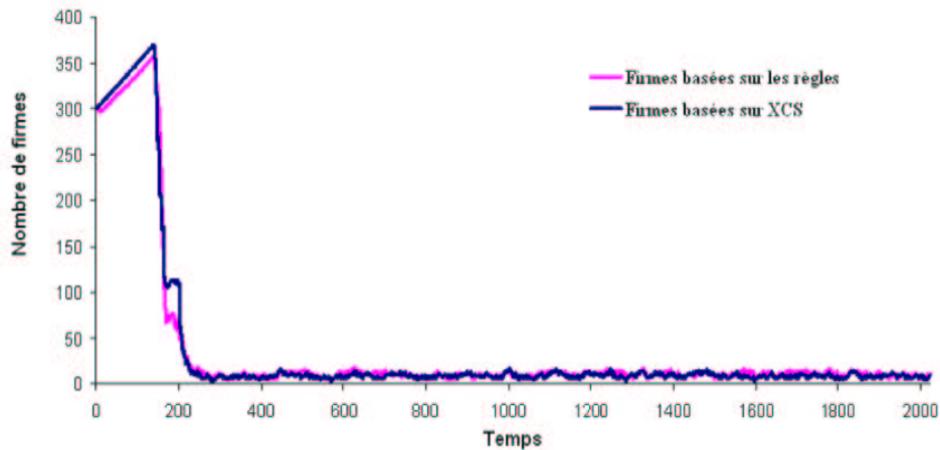


FIG. 8.4 – Evolution de la population de firmes

(Lomi et Larsen [97]). Dans la théorie écologique, la densité augmente la légitimité quand elle est en train de décroître et augmente la compétition dans le cas contraire. En effet, quand elle est en train de décroître, la densité indique qu'il existe des firmes dominantes qui ont su s'adapter comme il faut.

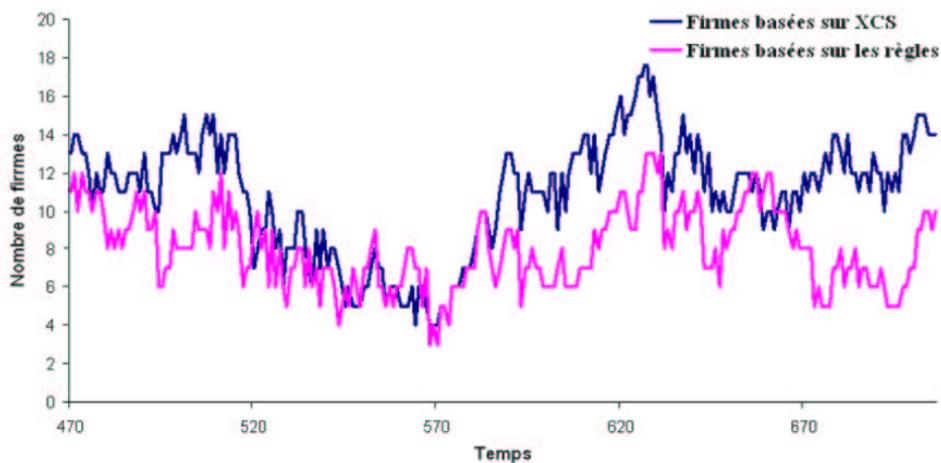


FIG. 8.5 – Extrait de la courbe d'évolution de la population de firmes

La figure 8.5 montre un extrait de la courbe précédente. Elle montre qu'à la suite de cette déclinaison du nombre de firmes, ce sont les firmes adaptatives qui restent plus nombreuses sur le marché. Ces résultats confirment également les résultats précédents quant à l'utilité de l'adaptation.

Age	8 intervals representation	16 intervals representation
Maximum	209	230
Average	25	27

TAB. 8.3 – Comparaison de l'âge des firmes ayant différentes représentations

### 8.3.1.2 Analyse de sensibilité des firmes basées sur XCS

Nous étudions dans cette section l'effet de certains choix de modélisation tels que la précision de représentation des attributs ou encore la fonction de récompense. Nous nous proposons aussi d'étudier l'impact de certains paramètres de XCS sur la performance des firmes. Nous pouvons citer par exemple, le coefficient d'apprentissage. Nous nous intéressons particulièrement à l'analyse de ces effets du point de vue de l'amélioration des performances ainsi que du point de vue de la vitesse de convergence à une population de classeurs stable.

**8.3.1.2.1 La précision des domaines de définition des attributs** Nous mettons l'accent dans ces expérimentations sur l'influence de la précision du codage. Nous comparons pour ceci deux populations de 300 firmes basées sur XCS ayant les mêmes paramètres initiaux et se différenciant par la précision des domaines de définition des attributs. La première population utilise une décomposition du domaine de définition en huit intervalles alors que la deuxième population utilise une décomposition en seize intervalles.

La Table 8.3 montre que l'utilisation d'une représentation plus précise améliore la résistance des firmes étant donné que l'âge moyen et maximal des firmes utilisant XCS est plus élevé. Cette précision est nécessaire d'une part pour mieux représenter la réalité, d'autre part, elle est nécessaire aux économistes pour expliquer les classeurs. En effet, une représentation moins précise peut conduire à une sur-généralisation des classeurs (Rejeb et Guessoum [122]).

La Figure 8.6 compare le nombre et l'évolution des classeurs de deux types différents de firmes utilisant respectivement une représentation sur huit et seize intervalles. Ces résultats ont été obtenus par l'observation d'une firme de chaque type dans un marché composé des deux types de firmes. Ces expérimentations sont conduites sur une période de 10000 périodes. La population de classeurs des firmes utilisant une représentation sur seize intervalles se stabilise plus tard que la population de classeurs des firmes utilisant une représentation sur huit intervalles étant donné que cette précision implique un élargissement des espaces d'états. Cette précision coûte donc en terme de temps d'apprentissage. Cependant, la population des classeurs est plus riche pour la représentation sur seize intervalles. Ainsi, plus d'états de l'environnement sont considérés.

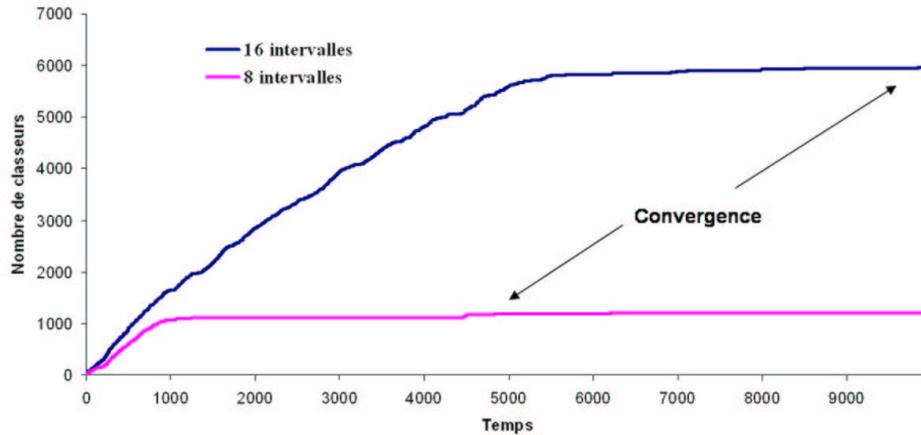


FIG. 8.6 – Influence de la précision du codage sur l'évolution de la population de classeurs

En conclusion, nous pouvons dire qu'une représentation plus précise du domaine de définition offre une meilleure représentation de l'environnement comme l'indique le nombre de classeurs dans chaque population. Le nombre de classeurs de la population utilisant une représentation sur seize intervalles atteint le nombre maximal de classeurs, cela se traduit par une performance ainsi qu'une résistance plus importante. Cependant, cette solution est plus coûteuse en terme de temps d'apprentissage.

Néanmoins, l'utilisation d'une représentation encore plus précise reste un problème ouvert quand le nombre d'attributs considéré dans la perception est important. Ceci est dû à la longueur limitée des classeurs dans XCS.

**8.3.1.2.2 La fonction de récompense** Ces expérimentations considèrent deux types de populations de 300 firmes. Dans la première population, les firmes renforcent les classeurs selon l'évolution de leurs performances sans considérer les autres firmes. Dans la seconde population, les classeurs sont renforcés selon la position relative de la firme dans le marché. Ces deux populations ont les mêmes paramètres initiaux et la même représentation. Elles se différencient par leur fonction de récompense (voir Section 5.3.2 du Chapitre 5). Comme nous sommes dans un contexte multi-agents, l'objectif de ces expérimentations est de vérifier s'il est suffisant pour les firmes de considérer les autres firmes dans leur perception ou s'il est nécessaire de les considérer dans la définition de la récompense.

La Figure 8.7 montre que la différence entre les performances des firmes utilisant les deux fonctions de récompense n'est pas importante. Elle montre qu'en moyenne la fonction de récompense collective n'améliore pas beaucoup la performance. Le pourcentage d'amélioration moyen est de 1%.

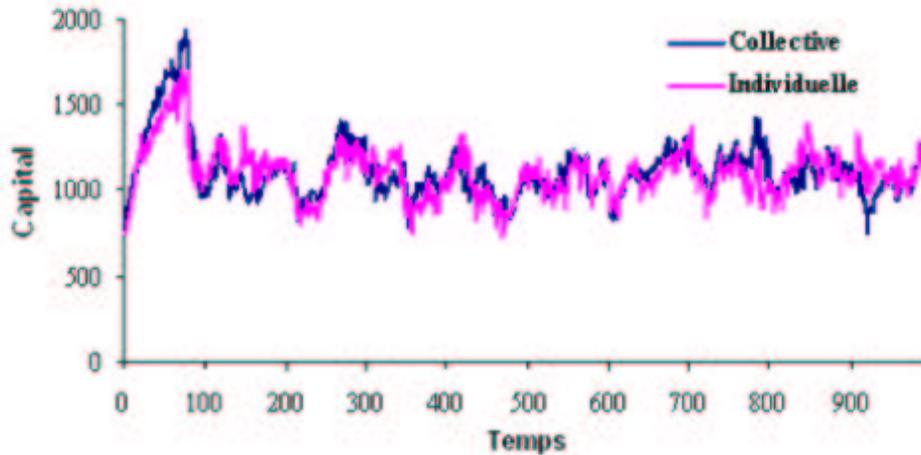


FIG. 8.7 – Comparaison du capital de firmes utilisant la fonction de récompense individuelle et collective

La comparaison de la résistance confirme ces résultats. Nous pouvons conclure que la considération des autres firmes, uniquement dans sa perception, est suffisant pour permettre à une firme de prendre de bonnes décisions. Ces expérimentations répondent à la question posée par Peres-Uribe [118] concernant l'utilité de la considération des autres firmes lors de la définition de la fonction de récompense. Une perception complète de l'environnement est plus importante qu'une récompense collective dans les systèmes multi-agents apprenants.

**8.3.1.2.3 Influence des paramètres de XCS** Nous nous limitons dans cette section à l'étude de deux paramètres qui sont la fréquence d'activation de l'algorithme génétique et l'effet du coefficient d'apprentissage.

**Fréquence d'utilisation de l'AG** L'algorithme génétique est le composant permettant de mettre à jour la base de classeurs. Il permet d'éliminer les classeurs les moins performants. La fréquence de son activation est responsable de l'hétérogénéité de la population de classeurs de la firme. Plus la fréquence est grande, plus les classeurs changent dans la firme. Ces expérimentations étudient l'influence de ce facteur sur les firmes. Pour ce faire, nous avons comparé le capital de populations de firmes utilisant des fréquences différentes (voir Figure 8.8). Les deux valeurs 10 et 40 correspondent au nombre de périodes séparant des activations successives de l'algorithme génétique. La Figure 8.8 montre que le capital relatif à la valeur (10) est plus important au début de la simulation. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'utilisation fréquente de l'algorithme génétique élimine les classeurs les moins performants. A long terme par contre ces deux valeurs deviennent équivalentes.

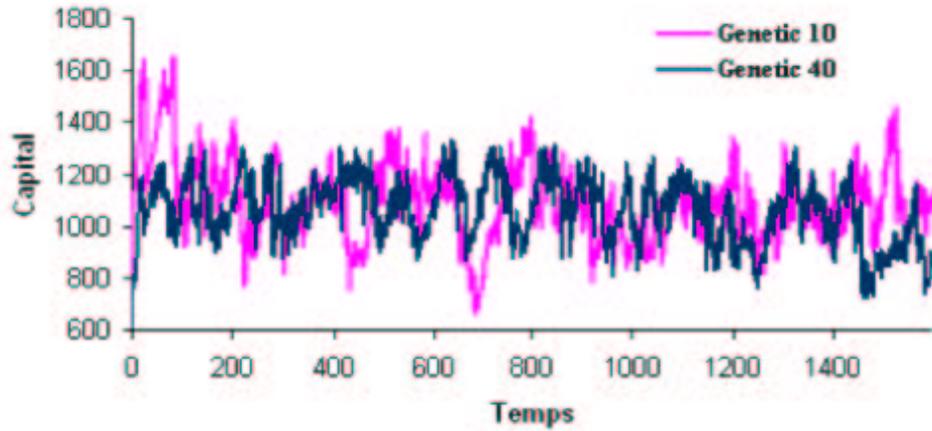


FIG. 8.8 – Comparaison du capital de firmes utilisant différentes fréquences de l’algorithme génétique

De même, nous comparons la convergence de la population de classeurs pour ces différentes fréquences d’activation de l’algorithme génétique. Ces résultats sont présentés dans la Figure 8.9 qui montre que plus nous réduisons la fréquence d’activation de l’algorithme génétique, plus la convergence est rapide. Nous optons donc pour un espacement de l’activation de l’algorithme génétique de 40 périodes.

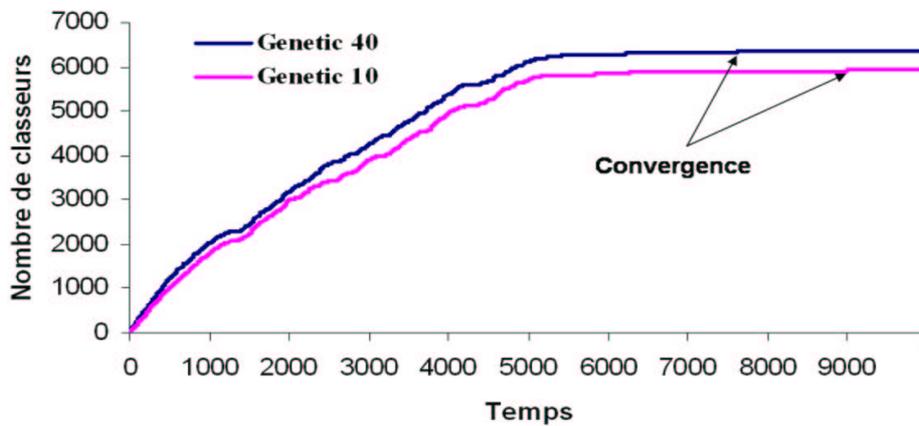


FIG. 8.9 – Comparaison de la convergence de la population de classeurs pour différentes fréquences de l’algorithme génétique

**Le coefficient d’apprentissage** Le coefficient d’apprentissage est un paramètre important dans XCS. Nous essayons à travers ces expérimentations de montrer son influence sur les firmes. Pour ceci, nous avons choisi de comparer la vitesse de stabilisation

de la population de classeurs des firmes basées sur XCS avec différents taux d'apprentissage.

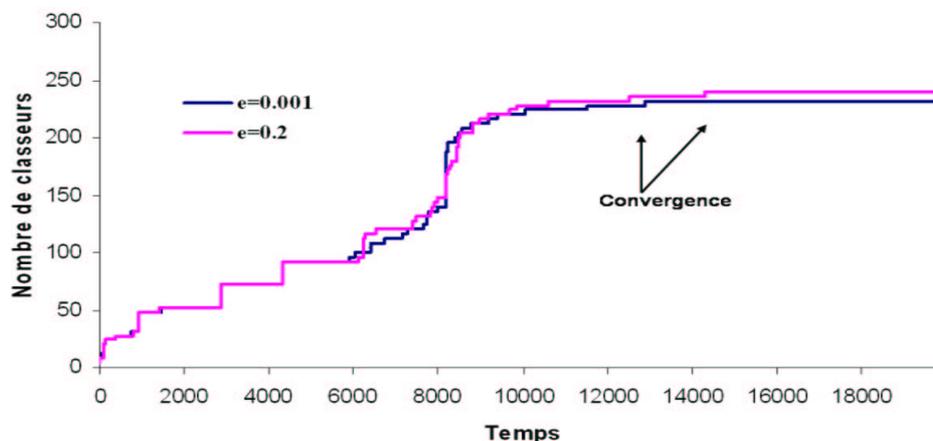


FIG. 8.10 – Influence du taux d'apprentissage

La Figure 8.10 montre que plus ce taux est petit, plus la convergence du nombre de classeurs est rapide. Néanmoins, il ne faut pas prendre des valeurs très petites sinon, il n'y aura presque plus d'apprentissage. Nous sauvegardons la valeur de 0.001 pour le reste des expérimentations.

**8.3.1.2.4 La population initiale de classeurs** Dans un système complexe où l'environnement est dynamique, l'adaptation est souvent coûteuse. Une solution est l'utilisation de ces systèmes d'adaptation comme outils d'aide à la conception. Les agents sont activés en simulation. Les variations de l'environnement sont ainsi simulées (Guessoum [67]). Cette simulation permet d'initialiser la base de règles (système de classeurs) initiale. Les firmes peuvent être ensuite activées dans leur environnement réel avec cette population de règles et le système d'adaptation est utilisé pour faire face aux modifications imprévues.

Le but de ces expérimentations est de vérifier si le fait de munir les firmes de connaissances initiales peut améliorer leur prise de décision et éviter leur déclin rapidement. Pour ce faire, nous simulons tout d'abord le comportement d'une firme dans un marché hétérogène sur une longue période (de l'ordre de 10000) afin qu'elle puisse construire une base de classeurs hétérogènes intégrant le plus grand nombre de situations de l'environnement. Nous récupérons par la suite cette base de règle pour en doter les firmes basées sur XCS que nous nommons firmes adaptatives avec population initiale. Cette population est comparée à une autre composée de firmes basées sur XCS ayant une population initiale vide.

La Figure 8.11 présente une comparaison du capital moyen de ces deux catégories de firmes. Elle montre que les firmes ayant des populations initiales sont plus performantes.

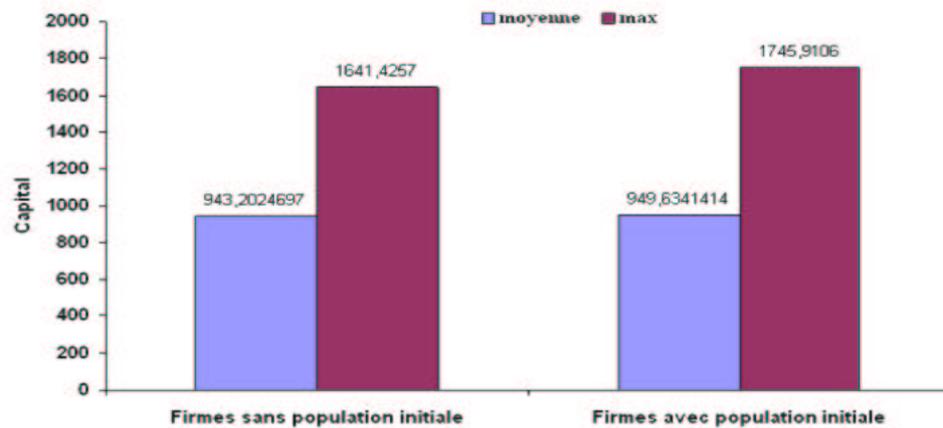


FIG. 8.11 – Firmes avec et sans population de classeurs initiale

Les connaissances acquises au début peuvent leur permettre de mieux faire face à leur environnement changeant et variable.

**8.3.1.2.5 Effet de la population initiale des firmes sur la convergence de la population de classeurs** Ces expérimentations permettent de comparer la convergence de la population de classeurs pour une firme basée sur XCS évoluant dans un marché composé uniquement de firmes basées sur les règles et dans une population intégrant aussi des firmes basées sur XCS.

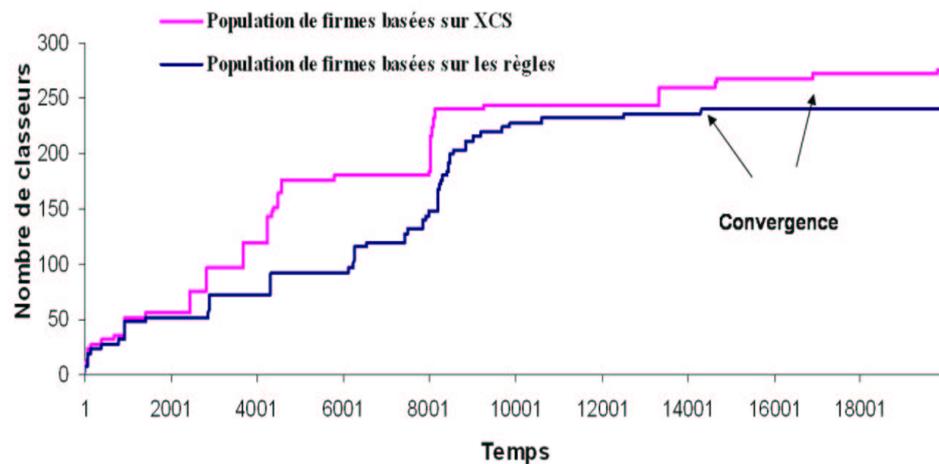


FIG. 8.12 – Convergence de la population de classeurs d'une firme basée sur XCS dans un environnement composé uniquement de firmes basées sur les règles et dans un environnement hétérogène.

Les résultats de la Figure 8.12 montrent que la convergence est plus rapide dans un environnement constitué de firmes basées sur les règles. Ceci s'explique par le fait que les firmes basées sur XCS essaient d'apprendre toutes en même temps et par conséquent, l'environnement évolue plus rapidement et continuellement. L'adaptation de la firme est donc plus difficile.

### 8.3.2 L'exploration/exploitation

Cette section rapporte les résultats obtenus par l'utilisation de l'exploration dirigée et par l'utilisation des techniques de choix entre exploration et exploitation. Elle est organisée comme suit. Nous présenterons en premier lieu l'impact de l'exploration dirigée sur les firmes. Nous mettrons, en second lieu, l'accent sur les avantages de notre technique de choix entre exploration et exploitation et présenterons enfin sa comparaison aux techniques de Wilson.

#### 8.3.2.1 Utilisation de l'exploration dirigée dans XCS

Ces expérimentations étudient l'effet de l'exploration dirigée sur la performance des firmes en comparant ces techniques aux techniques d'exploration sans but. La comparaison est basée sur les résultats de la simulation de trois populations utilisant respectivement l'exploration basée sur la fréquence, l'exploration basée sur la récence et enfin l'exploration aléatoire utilisée initialement par XCS. Les caractéristiques de XCS seront les mêmes pour les différentes populations afin de nous permettre de focaliser sur les méthodes d'exploration. La technique de choix entre exploration et exploitation sera aussi la même.

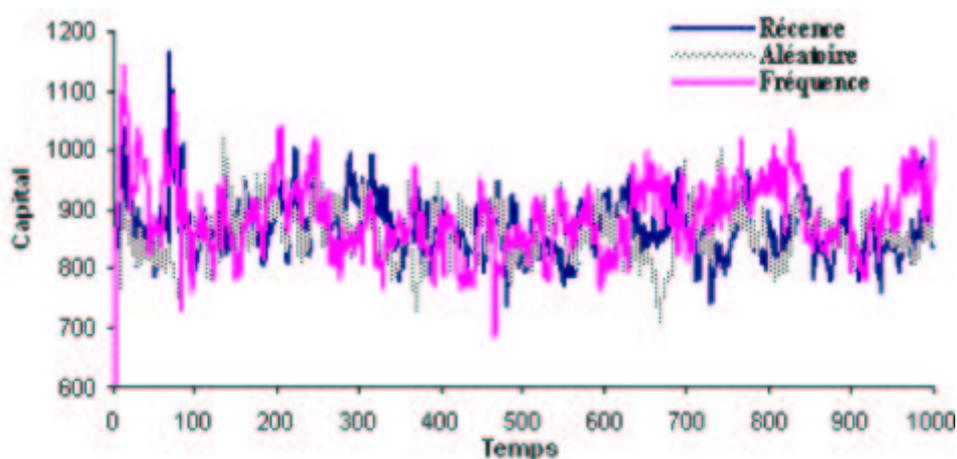


FIG. 8.13 – Comparaison du capital des firmes utilisant l'exploration aléatoire, l'exploration basée sur la récence et l'exploration basée sur la fréquence

		Exécution				
		1	2	3	4	5
Aléatoire	Ecart type	99.78	104.22	111.21	128.57	50.11
	Moyenne	869.63	854.64	880.57	875.57	862.43
Fréquence	Ecart type	58.72	123.48	123.53	113.77	125.35
	Moyenne	882.66	874.73	861.91	870.71	883.02
Récence	Ecart type	123.87	118.44	131.30	122.32	55.35
	Moyenne	872.38	869.61	880.31	886.91	877.57

TAB. 8.4 – Statistiques sur l'évolution du capital des firmes

La Figure 8.13 décrit le capital moyen de ces trois populations de firmes. Elle montre que l'intérêt des techniques d'exploration dirigée est visible au début de la simulation. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces techniques permettent de diriger l'exploration vers l'utilisation de nouvelles actions, ce qui n'est pas toujours le cas de l'exploration sans but. Cependant, à long terme, ces techniques deviennent équivalentes à l'exploration sans but. L'exploration dirigée permet d'enrichir la base de classeurs par l'utilisation de nouvelles actions. Elle ne permet pas d'améliorer significativement la performance des agents. Les calculs effectués sur ces résultats montrent que l'amélioration de la performance des firmes n'est pas significative. Le pourcentage d'amélioration est en moyenne de 3.4 % et atteint un maximum de 9.1% et un minimum de -7%). La Table 8.4 présente la moyenne et l'écart type du capital des firmes à partir de différentes exécutions de la simulation. La moyenne des deux techniques d'exploration dirigée est plus importante que celui de l'exploration aléatoire mais cette différence n'est pas statistiquement significative au niveau 99.95 % (voir Rejeb et al. [121] et Rejeb et al. [123]).

L'intérêt des techniques de l'exploration dirigée apparaît par contre, au niveau de la réduction de la durée d'apprentissage de la firme. Les firmes utilisant les techniques d'exploration dirigées apprennent plus rapidement. Elles convergent plus rapidement vers un ensemble de règles stables (voir Figure 8.14).

Nous pouvons donc en conclure que l'utilisation d'une technique d'exploration dirigée est insuffisante, si nous visons l'amélioration des performances des firmes. Elle nous permet simplement de pousser la firme à explorer certaines actions et d'étendre ainsi le champ de connaissances de la firme. Il faudra trouver aussi un compromis entre l'exploration et l'exploitation.

### 8.3.2.2 Influence de nos stratégies sur l'apprentissage des firmes

Nous organisons cette section comme suit. Nous comparons en premier lieu l'approche adaptative proposée à l'approche aléatoire. Nous la comparons, en second lieu, aux techniques de Wilson.

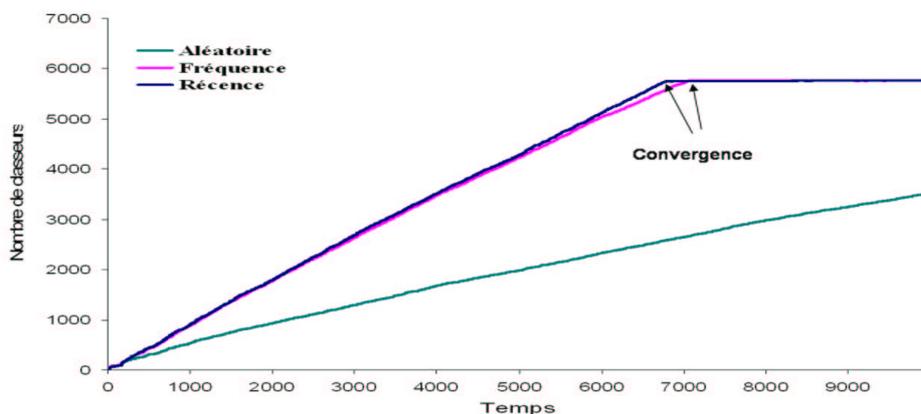


FIG. 8.14 – Influence de l’exploration dirigée sur l’évolution de la population de classeurs

**8.3.2.2.1 Comparaison des firmes basées sur les méta-règles aux firmes basées sur un choix aléatoire** Afin de comparer l’approche adaptative basée sur les méta-règles à l’approche aléatoire, nous conduisons une simulation incluant deux types de firmes. La première, utilise un choix aléatoire entre l’exploration et l’exploitation alors que la deuxième utilise les méta-règles avec un  $\text{taux\_exploitation} = 20\%$ . Pour mettre l’accent uniquement sur les techniques d’exploration- exploitation, nous dotons ces populations des mêmes paramètres et de la même technique d’exploration. Nous fixons le nombre de périodes d’exploration  $n$  à 20 et le nombre de périodes d’exploitation  $m$  à 10.

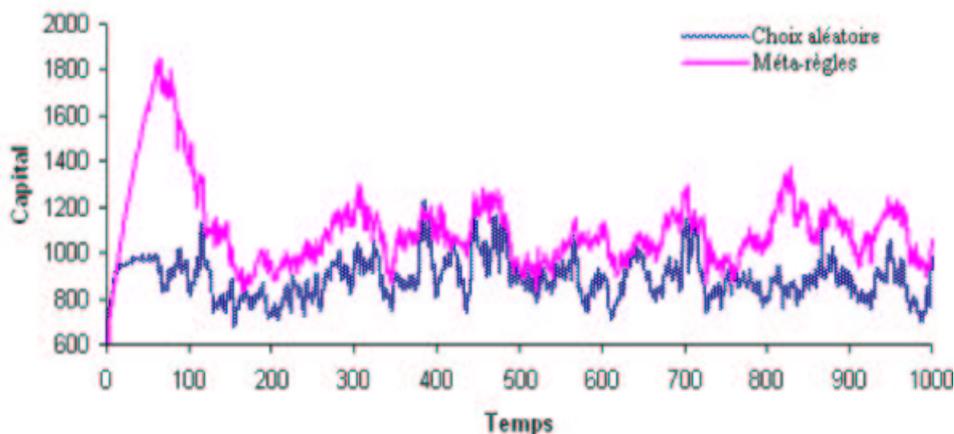


FIG. 8.15 – Comparaison du capital des firmes utilisant les méta-règles à celui des firmes utilisant un choix aléatoire

La Figure 8.15 montre que l’utilisation des méta-règles améliore la performance des firmes survivantes. L’importance de la dégradation des performances des firmes quand les méta-règles sont appliquées coïncident avec le début de la période d’exploitation.

Ceci montre que les firmes auraient dû continuer leur apprentissage et qu'il était très tôt de passer à l'exploitation. La comparaison de l'âge moyen des firmes utilisant les méta-règles (112 périodes) à l'âge moyen des firmes utilisant la technique aléatoire (107 périodes) montre que les méta-règles améliorent la résistance des firmes.

Cependant, malgré leur impact positif sur les performances des firmes, les méta-règles sont sensibles aux valeurs de  $n$  et  $m$  comme le montre la Figure 8.16. Les périodes larges d'exploration sont avantageuses au début quand les firmes n'ont pas encore assez appris. Elles leur permettent ainsi d'enrichir leurs connaissances. Cependant, ces grandes valeurs de  $n$  peuvent devenir dangereuses quand la firme a assez appris. Elles peuvent ainsi disperser les connaissances de la firme en les poussant à explorer de nouvelles stratégies ne garantissant pas de bonnes performances. A la fin de la simulation, de courtes périodes d'exploration sont préférées.

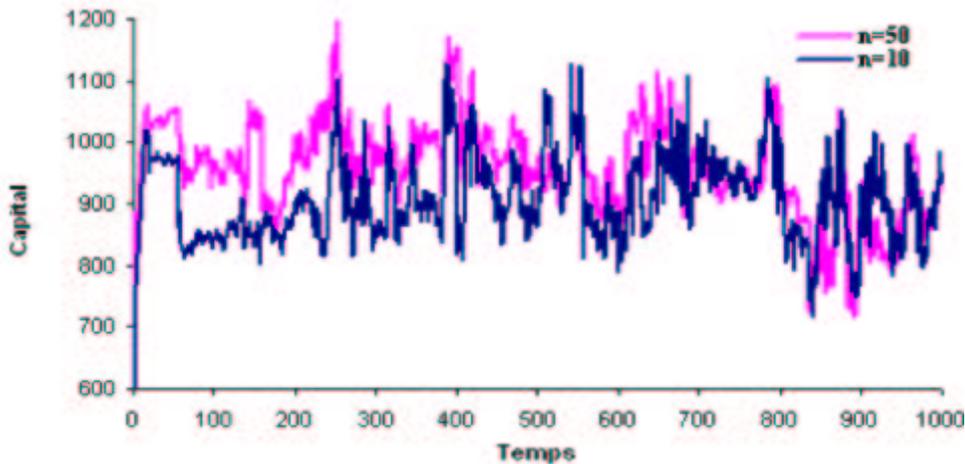


FIG. 8.16 – Comparaison de firmes utilisant des méta-règles avec différentes périodes d'explorations

**8.3.2.2 Méta-règles basées sur la variation des périodes d'exploration et d'exploitation** Pour tester les nouvelles méta-règles proposées dans la Section 6.4.2.2, nous les avons simulées avec des firmes utilisant la première version des méta-règles.

Les résultats de ces simulations sont décrites par les Figures 8.17. La Figure 8.17 compare le capital de ces deux types de firmes. Elle montre que l'amélioration du capital moyen issue de l'utilisation des deuxièmes méta-règles n'est pas très importante.

L'avantage de ces méta-règles réside plus particulièrement dans l'amélioration de la vitesse d'apprentissage tel qu'il est montré dans la Figure 8.18. Cette dernière montre que l'utilisation du deuxième type de méta-règles facilite la convergence vers une population stable de classeurs. Elle est donc plus bénéfique pour la firme.

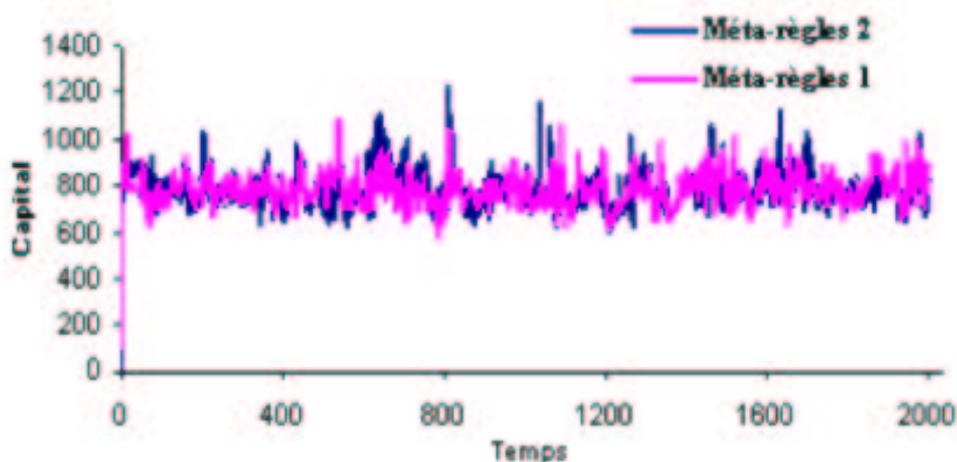


FIG. 8.17 – Comparaison du capital des firmes utilisant les deux types de méta-règles

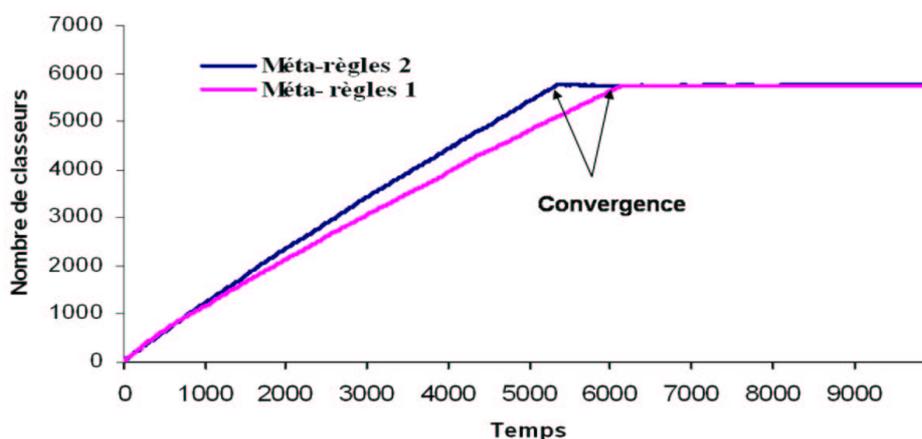


FIG. 8.18 – Comparaison de la convergence des firmes utilisant les deux types de méta-règles

### 8.3.2.3 Comparaison des méta-règles aux stratégies de Wilson

Ces résultats sont obtenus par deux simulations différentes comparant une population de firmes utilisant des méta-règles respectivement à une population utilisant l'approche adaptative locale de Wilson et à une population utilisant l'approche adaptative globale de Wilson. Le facteur de gain utilisé pour les techniques de Wilson est de l'ordre de 0.5. Ce taux correspond à un taux moyen.

Nous présentons la comparaison des méta-règles à la stratégie locale de Wilson sur la Figure 8.19 et la comparaison des méta-règles à la stratégie globale de Wilson sur la Figure 8.20.

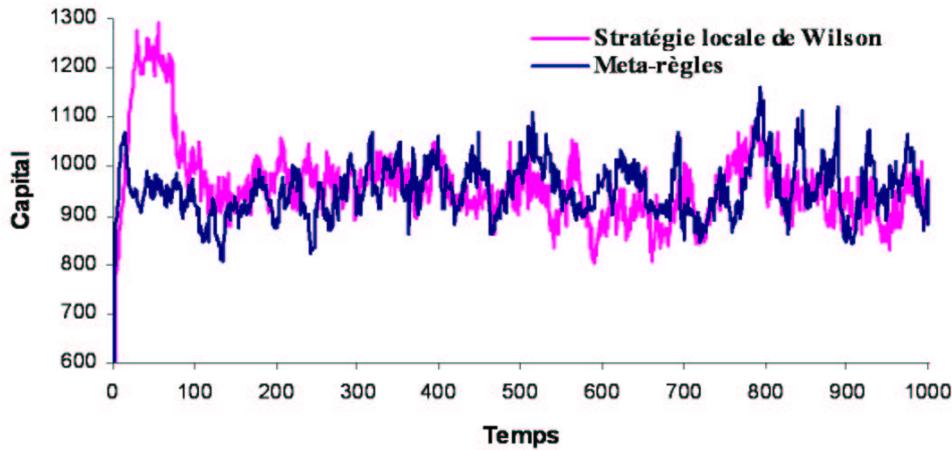


FIG. 8.19 – Comparaison de l’approche basée sur les méta-règles et la technique locale de Wilson

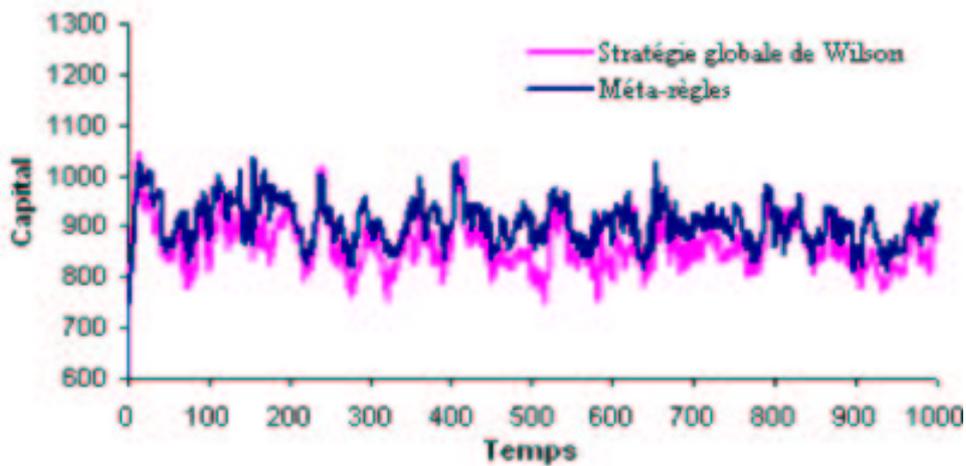


FIG. 8.20 – Comparaison de l’approche basée sur les méta-règles et la technique globale de Wilson

Les Figures 8.19 et 8.20 montrent que l’utilisation des méta-règles améliore la performance des firmes. Cette amélioration est plus prononcée quant à la technique globale de Wilson. En effet, cette stratégie ne permet pas à la firme de retourner à l’exploration une fois qu’elle a appris et que l’environnement a changé. L’amélioration est moins prononcée quand nous comparons les méta-règles à la technique locale de Wilson étant donné que cette dernière reconsidère le choix à chaque période. La technique de Wilson est meilleure au début de la simulation puisque l’approche basée sur les méta-règles utilise uniquement l’exploration sur de longues périodes au début de la simulation. Cependant, à long terme, les méta-règles surpassent la stratégie locale de Wilson. Se baser uniquement sur les informations courantes n’est donc pas prudent à long terme.

	Meta-règles	GlobalWilson	LocalWilson
Ecart type	44.65	47.97	85.07
Moyenne	912.50	862.19	962.75

TAB. 8.5 – Statistiques sur le capital des firmes utilisant différentes techniques d’exploration/exploitation

Ces conclusions sont confirmées par la comparaison des écarts types et du capital moyen de ces trois populations, présentés dans la Table 8.5. Une valeur plus petite de l’écart type du capital, reflète un comportement plus stable d’une approche. Il en résulte que les méta-règles sont plus stables que les techniques de Wilson (la locale et la globale). Malgré la valeur supérieure de son capital moyen, la stratégie locale n’est pas nécessairement la meilleure technique. Ceci est dû à sa variation importante. Elle peut ainsi causer la perte de la firme en engendrant une grande chute du capital due à des choix successifs erronés entre l’exploration et l’exploitation. Cependant, il est à remarquer qu’à long terme le capital moyen n’augmente pas significativement puisque toutes les firmes sont en train d’apprendre en même temps.

### 8.3.3 Les formes organisationnelles

Maintenant que nous avons montré l’intérêt de l’adaptation, nous passons à l’étude de l’influence mutuelle des firmes et des formes organisationnelles. Nous comparons en premier lieu les firmes s’adaptant aux formes organisationnelles aux autres types de firmes. Nous mettons par la suite l’accent sur l’évolution des formes organisationnelles en fonction des firmes présentes sur le marché. Nous étudions enfin l’influence de certains paramètres sur notre modèle tels les opérateurs d’agrégations.

#### 8.3.3.1 Comparaison des firmes s’adaptant aux formes organisationnelles aux autres types de firmes

Ces expérimentations permettent d’observer le comportement des firmes s’adaptant aux formes organisationnelles. Pour ceci, nous comparons deux populations de firmes utilisant les mêmes caractéristiques mais se différenciant par leurs processus de décision. La première utilise XCS en se basant uniquement sur une perception des autres firmes et la deuxième population utilise XCS en se basant sur une perception des firmes et des formes organisationnelles (Rejeb et Guessoum [120] et Guessoum et al. [69]).

La Figure 8.21 montre que les firmes qui perçoivent en même temps les autres firmes et les formes organisationnelles ont un meilleur capital. D’un point de vue technique, ces résultats confirment l’hypothèse selon laquelle les résultats des systèmes de classeurs sont améliorés par une meilleure perception de l’environnement (voir Wilson [169]). D’un

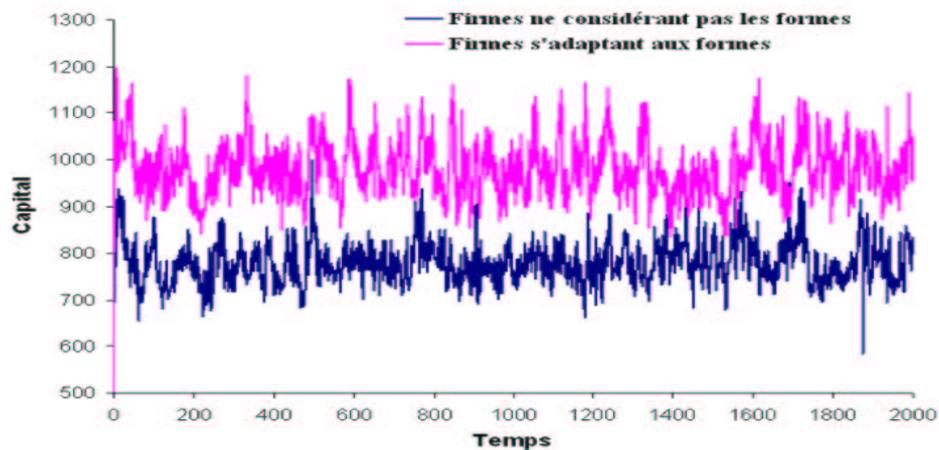


FIG. 8.21 – Comparaison du capital des firmes basées sur XCS sans perception des formes organisationnelles à celui des firmes basées sur XCS considérant la perception des formes organisationnelles

point de vue économique, ces résultats confirment l'importance de la considération des formes organisationnelles pour les firmes telle que l'ont décrit Baum et Rao [14] et Lewin et Volberda [96]. En effet, le fait de s'identifier à une forme organisationnelle permet aux firmes d'imiter d'une manière inconsciente le comportement des autres firmes qui ont fait leur preuves.

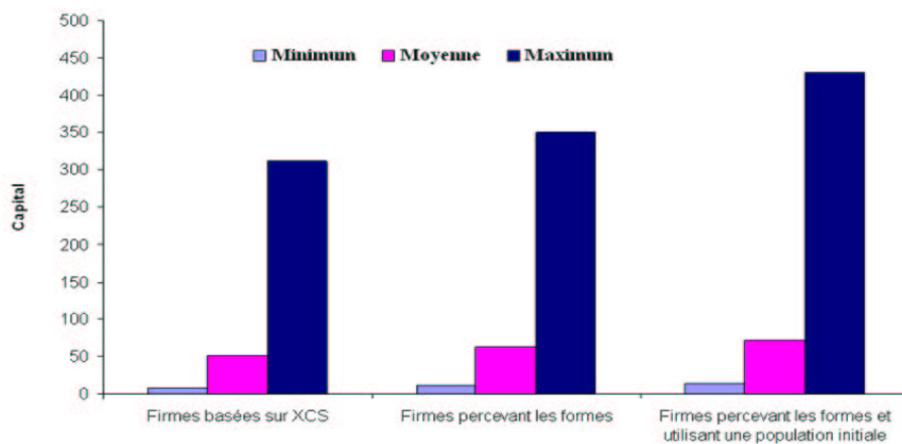


FIG. 8.22 – Comparaison des firmes basées sur les règles, celles basées sur XCS sans perception des formes organisationnelles et les firmes basées sur XCS considérant la perception des formes organisationnelles

Les formes organisationnelles permettent également aux firmes d'améliorer leur résistance tel que le montre la Figure 8.22. En effet, l'âge moyen et maximal des firmes

augmente quand celles-ci perçoivent les formes organisationnelles. La résistance augmente encore quand les firmes utilisent simultanément une population initiale de classeurs et la perception des formes organisationnelles. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il existe une corrélation positive entre les performances de la firme et l'ampleur des connaissances dont elle dispose.

### 8.3.3.2 Evolution de la population de formes organisationnelles

Ces expérimentations étudient l'évolution d'une population de formes organisationnelles de deux points de vue : leurs performances ainsi que leur légitimité traduite par le nombre des firmes qui les composent. Pour ceci, nous simulons une population de firmes s'adaptant aux formes organisationnelles. Cette simulation nous permet de vérifier s'il existe une relation entre la performance d'une forme organisationnelle et le nombre de firmes qu'elle contient. Pour cette simulation nous avons utilisé une population initiale prédéfinie de cinq formes organisationnelles et nous avons adopté l'opérateur de Zimmermann (voir Section 8.3.3.5) comme opérateur d'agrégation.

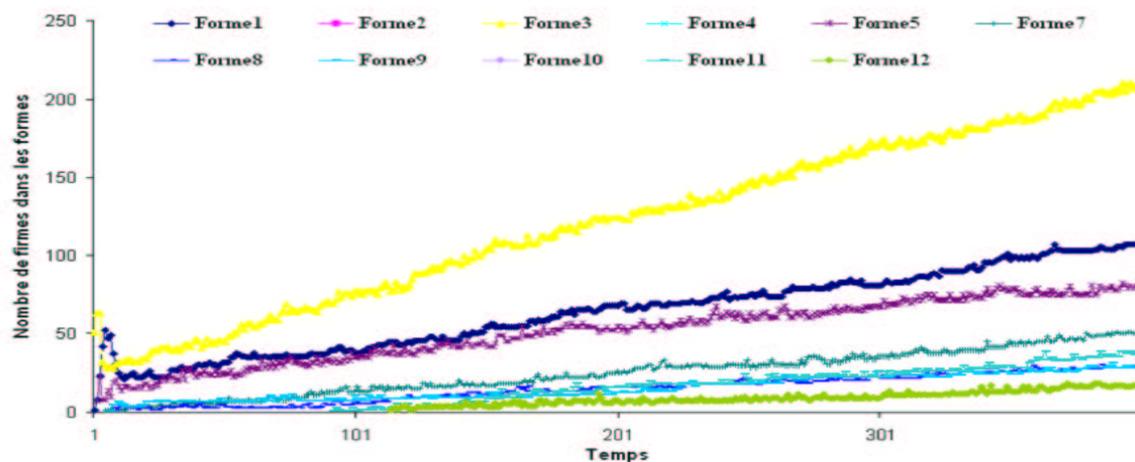


FIG. 8.23 – Evolution du nombre de firmes dans les formes organisationnelles

Les Figures 8.24 et 8.23<sup>5</sup> montrent que le nombre de firmes est dépendant de la performance de la forme organisationnelle. Plus celle-ci est performante, comme c'est le cas de la forme organisationnelle nommée « Forme3 », plus les firmes essaient de l'adopter et plus sa légitimité augmente. Il y a donc une corrélation positive entre la performance des formes organisationnelles et le nombre de firmes qui les adoptent. Une forme organisationnelle à faible performance, perd petit à petit sa légitimité jusqu'à ce qu'elle disparaisse d'elle-même. Ces résultats confirment les hypothèses proposées par Baum et Rao [14] et montrent donc que notre modèle de formes organisationnelles est valide.

<sup>5</sup>Il est à noter qu'une période représentée sur l'axe des abscisses correspond à cinq pas de simulations

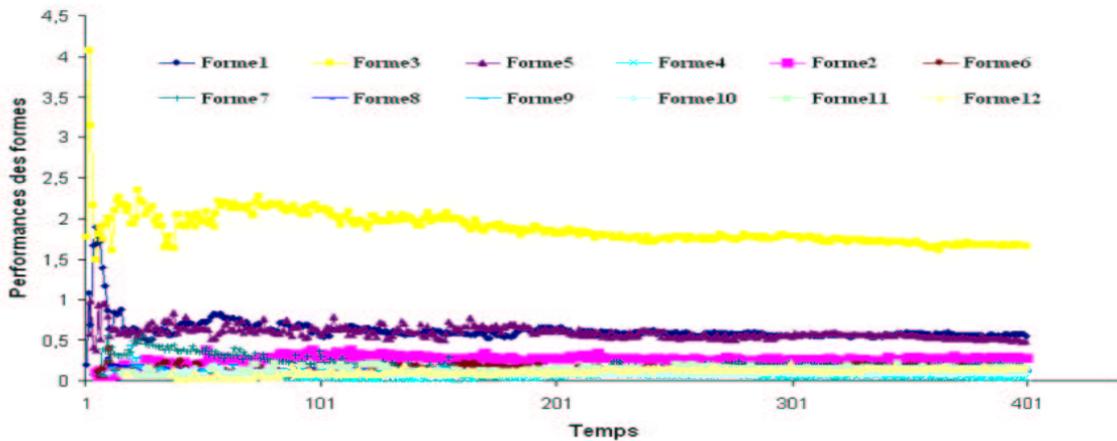


FIG. 8.24 – Performances des formes organisationnelles

### 8.3.3.3 Influence de la population initiale de formes organisationnelles sur l'évolution de la population de formes organisationnelles

Ces expérimentations mettent l'accent sur l'influence de la population initiale de formes organisationnelles. Pour ceci nous comparons les résultats de deux simulations différentes. La première inclut une population initiale prédéfinie de formes organisationnelles alors que la deuxième inclut une population aléatoire. Une population identique de firmes est utilisée pour les deux simulations.

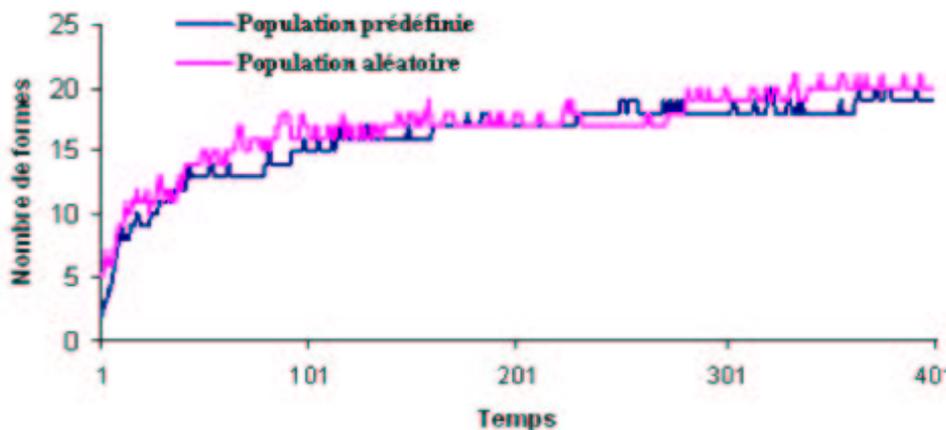


FIG. 8.25 – Influence de la population initiale sur l'évolution des formes organisationnelles

La Figure 8.25 montre que l'utilisation de la population prédéfinie permet de conserver et de maintenir une plus grande population de formes organisationnelles. Cependant la différence n'est pas importante. Nous pouvons donc en conclure que la population de

formes organisationnelles initiale a peu d'influence et que l'évolution de la population de formes organisationnelles est plutôt dépendante des firmes qui peuplent le marché.

### 8.3.3.4 Evolution de la population de formes organisationnelles en fonction des types de firmes dans le marché

Le but de ces expérimentations est d'étudier l'évolution de la population de formes organisationnelles en fonction de la population de firmes sur le marché. Pour ceci, nous avons simulé deux populations de firmes adaptatives. La première est constituée de firmes qui considèrent les formes organisationnelles dans leurs perceptions et la seconde inclut des firmes qui ne considèrent pas les formes organisationnelles.



FIG. 8.26 – Evolution de la population de formes organisationnelles en fonction des catégories de firmes sur le marché

Les résultats de la Figure 8.26 montrent que la population est plus dynamique et qu'il y a beaucoup de formes organisationnelles qui émergent et d'autres qui persistent dans le cas où les firmes s'adaptent aux formes organisationnelles. Ce résultat montre donc que la considération des structures organisationnelles par les firmes permet non seulement d'améliorer leurs performances mais a aussi une influence sur la dynamique propre de ces structures organisationnelles.

### 8.3.3.5 Influence des opérateurs d'agrégation

Les opérateurs d'agrégation sont importants dans plusieurs domaines et spécialement dans le domaine de la prise de décision. Une panoplie d'opérateurs d'agrégation est disponible (la médiane, la moyenne, Zimmermann, Max, Min, OWA, etc...) pour les formes organisationnelles. L'étude de leur impact sur la stabilité du modèle est importante. Ils

permettent d'une part de déterminer la puissance d'une forme organisationnelle et interviennent d'autre part, au niveau de la détermination des coefficients d'appartenance. Nous allons présenter dans ce qui suit les opérateurs d'agrégation numériques les plus connus. Certains de ces opérateurs permettent la compensation, d'autres non. Certains sont spécifiques à des valeurs numériques, d'autres pas. Nous allons ensuite étudier leur influence sur notre modèle afin d'en choisir un.

**Définition 3** *L'agrégateur de  $n$  objets  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , est défini par :  $A(x_1, x_2, \dots, x_n)$*

$$\begin{aligned} & K^n \rightarrow K \\ (x_1, x_2, \dots, x_n) & \mapsto y = A(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

avec  $K$  est un ensemble quelconque.

Parler des opérateurs d'agrégation nécessite auparavant la présentation de leur propriétés. Ces propriétés les caractérisent et permettent de les différencier. Les propriétés fondamentales sont :

1. la commutativité : l'ordre des valeurs à agréger n'est pas important.
2. l'associativité :  $Aggreg(x_1, x_2, x_3) = Aggreg(Aggreg(x_1, x_2), x_3)$
3. la monotonie :  $y_i \geq x_i \Rightarrow Aggreg(x_1, \dots, y_i, \dots, x_n) \geq Aggreg(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$
4. les conditions aux limites  $Aggreg(0, 0, \dots, 0) = 0$ ;  $Aggreg(1, 1, \dots, 1) = 1$
5. l'idempotence :  $Aggreg(x, x, \dots, x) = x$
6. l'existence d'éléments neutre et/ou absorbant :
  - un élément  $e$  est neutre s'il vérifie  $Aggreg(x_1, e, x_2, \dots, x_n) = Aggreg(x_1, x_2, \dots, x_n)$
  - un élément  $a$  est absorbant s'il vérifie  $Aggreg(x_1, a, x_2, \dots, x_n) = a$
7. la compensation :  $\min_{i=1}^n(x_i) \leq Aggreg(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \max_{i=1}^n(x_i)$
8. la contrebalance (nommée aussi compensation pour certains auteurs) : la contrebalance revient à décroître le résultat final dans le cas où il existe des arguments qui vont dans le sens opposé.
9. le renforcement : est une caractéristique du comportement humain. Par renforcement complet, on décrit une collection de fortes valeurs qui se renforcent les unes les autres pour donner une valeur plus affirmative que les valeurs individuelles (renforcement affirmatif).

Les opérateurs les plus connus permettant d'agréger les valeurs numériques sont la moyenne avec toutes ses variantes (arithmétique, géométrique, pondérée, etc.), médiane, minimum, maximum. Certains de ces opérateurs, tels que la moyenne, la médiane permettent la compensation<sup>6</sup> et donnent par conséquent des valeurs centrales (au milieu). D'autres opérateurs tel que le min et le max ne le permettent pas. Voici une présentation de ces opérateurs.

---

<sup>6</sup>les valeurs faibles peuvent être compensées par des valeurs fortes

**La moyenne** permet la compensation. En effet, certaines valeurs très faibles peuvent être compensées par des valeurs plus importantes. De ce fait, la valeur qu'elle exprime n'appartient pas à l'ensemble de départ. Plusieurs types de moyennes existent (arithmétique, quadratique, géométrique, etc.). Nous retenons, ici les moyennes arithmétiques et donnons une définition générale d'une moyenne pondérée ou non.

**Définition 4** Soient  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  les valeurs à fusionner et  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  leurs poids respectifs. Leur moyenne est donnée par :

$$Moy(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (8.1)$$

**Les opérateurs OWA (Ordered Weighted Averaging Operators)** Les opérateurs OWA ont été introduit par Yager [177] pour agréger des objets satisfaisant plusieurs critères. Les OWA regroupent des objets en satisfaisant tous les critères ou uniquement un ensemble de critères ou encore au moins un critère tout en ayant des pondérations sur chaque critère (Truck [161]). Ces opérateurs définissent une famille paramétrée d'opérateurs qui incluent un ensemble d'opérateurs bien connus tel que la médiane, le maximum, le minimum, ou encore la moyenne arithmétique. Un opérateur OWA est défini comme suit :

**Définition 5** Soient  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  les valeurs ordonnées à fusionner et  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$  les pondérations associées tel que  $w_j \in [0, 1]$  et  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ .

L'opérateur OWA est donné par :

$$OWA(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (8.2)$$

Où  $y_j$  est le  $j$ ème plus grand élément de  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Les cas particuliers des OWA sont définis comme suit :

- le minimum est obtenu en fixant  $w_1 = 1$  et les  $w_i = 0$  si  $i \neq 1$ .
- le maximum est obtenu en fixant  $w_n = 1$  et les  $w_i = 0$  si  $i \neq n$ .
- la statistique d'ordre  $K$  ( $k$ \_order statistic) est obtenue en fixant  $w_k = 1$  et les  $w_i = 0$  si  $i \neq k$ .

Les autres opérateurs particuliers tels que la médiane et la moyenne sont définis séparément dans cette section.

**La médiane** La médiane est un cas particulier des OWA. Elle permet de donner la valeur centrale d'un ensemble d'éléments ordonnés. Cet opérateur ne permet pas la compensation. Il est défini comme suit :

**Définition 6** Soient  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  les valeurs ordonnées à fusionner. La médiane est donnée par :

$$Med(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} x_{\frac{n+1}{2}}, & \text{si } n \text{ est impair;} \\ \frac{1}{2}(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}), & \text{si } n \text{ est pair;} \end{cases} \quad (8.3)$$

L'avantage de la médiane est que la valeur qu'elle propose, fasse partie de l'ensemble de départ.

**Opérateur de Zimmerman** Cet opérateur a été introduit par Zimmerman et Zysno [183]. Il permet de mieux modéliser le comportement humain dans le processus d'agrégation. Cet opérateur est basé sur la T-norme et la T-conorme (normes triangulaires) qui sont deux opérateurs d'agrégation. La première est une généralisation de l'opérateur « et » et la T-conorme est une généralisation de l'opérateur « ou ». L'opérateur de Zimmerman est appliqué sur un intervalle  $[0, 1]$  défini comme suit :

**Définition 7** Soient  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  les valeurs à fusionner. L'agrégation par l'opérateur de Zimmerman est donnée par :

$$\text{Zim}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left( \prod_{i=1}^n x_i \right)^{1-\gamma} \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \right)^\gamma \quad (8.4)$$

avec  $\gamma \in [0, 1]$ , un paramètre indiquant le degré de compensation souhaité.

L'opérateur dont nous avons besoin est un opérateur qui doit tenir compte à la fois de l'agrégation des valeurs et de la légitimité de la forme organisationnelle représentée par le nombre des firmes qui la présente. Nous comparons dans ce qui suit des familles de formes organisationnelles utilisant des opérateurs d'agrégations différents. Nous conduisons un ensemble de simulations pour chaque opérateur d'agrégation et nous comparons les résultats obtenus. Nous utilisons pour ceci les mêmes populations de firmes à savoir des firmes qui s'adaptent aux formes organisationnelles et qui utilisent les méta-règles pour le choix entre l'exploration et l'exploitation et nous allons utiliser les mêmes paramètres initiaux afin de mettre l'accent uniquement sur les opérateurs d'agrégation.

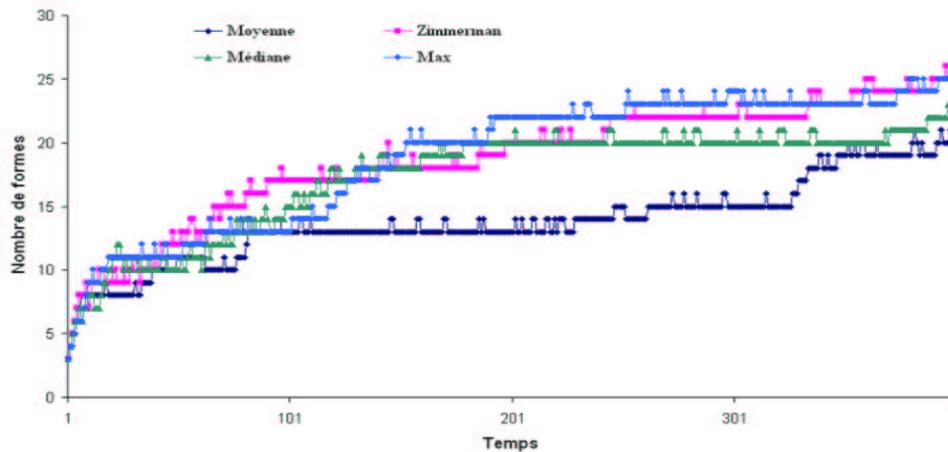


FIG. 8.27 – Influence des opérateurs d'agrégation sur le nombre de formes

La Figure 8.27 compare l'évolution de la population de formes organisationnelles pour les différents opérateurs d'agrégation. Elle montre que le meilleur opérateur d'agrégation est celui de Zimmermann. Il permet de diversifier les formes organisationnelles. La moyenne est par contre la plus mauvaise sur ce plan puisqu'elle permet la compensation. En effet, elle met sur le même pied d'égalité une forme organisationnelle qui a une firme très performante et plusieurs firmes non performantes avec une forme organisationnelle

ayant que des firmes moyennes. Cette Figure montre donc que les opérateurs d'agrégation ont une influence sur les firmes.

## 8.4 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre le simulateur MOVECO et nous avons illustré son utilisation pour des objectifs différents :

- valider notre framework d'agents adaptatifs. L'utilisation de ce framework pour modéliser les firmes qui évoluent dans un marché dynamique, ouvert et hétérogène, permet de dégager ses avantages ainsi que les problèmes qu'il engendre dans un contexte multi-agents. L'analyse de sensibilité effectuée sur les firmes basées sur XCS a montré que ce modèle est robuste. Les expérimentations nous ont permis de fixer les paramètres de XCS de telle manière à garantir le plus de performance. De plus, ce framework a été amélioré par les méta-règles proposées. Celles-ci ont permis de réduire le temps d'apprentissage,
- montrer l'intérêt de l'architecture de systèmes multi-agents adaptatifs pour modéliser les systèmes complexes. Le système multi-agents conçu est capable de s'auto-observer et de s'adapter dans les différents sens (micro-macro ou macro-micro) sans avoir recours à un observateur externe. Il représente bien la co-évolution entre les firmes et les formes organisationnelles et permet ainsi aux économistes de trouver des explications aux phénomènes émergents dus à l'interaction des firmes.

Ces expérimentations vérifient les hypothèses émises par les travaux en économie. Elles nous mènent à conclure que :

- l'adaptation par l'apprentissage permet d'améliorer la rationalité de la firme. Ceci est dû à l'évolution de la base de connaissances de la firme autorisée par le framework XCS.
- l'adaptation de leur choix entre l'exploration et l'exploitation est nécessaire. Les méta-règles proposées améliorent les performances de la firme. Elles sont simples mais peuvent être améliorées,
- l'intégration des formes organisationnelles élargit le champs de leur perception et permet ainsi d'améliorer leurs performances et résistance.

Nous avons ainsi pu apporter des réponses aux questions posées au début de cette thèse concernant la survie de la firme et son évolution dans un marché dynamique.



# Chapitre 9

## Conclusion

### 9.1 Introduction

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la modélisation et la simulation de systèmes économiques en se basant sur la théorie des ressources. Cette vision récente des systèmes économiques considère que les firmes sont dotées d'une rationalité limitée, que les marchés qu'elles peuplent sont dynamiques et que ces derniers sont caractérisés par une forte concurrence. La théorie de la firme basée sur les ressources cherche à comprendre la relation réciproque entre l'adaptation au niveau des firmes et la sélection au niveau du marché.

Le système que nous avons étudié dans cette thèse est composé d'un ensemble de firmes en compétition dans un marché concurrentiel. Ces firmes sont définies selon la théorie des ressources. Pour tenir compte de la dynamique du marché, les firmes ont besoin selon Baum et Rao [14] :

- de s'adapter aux changements du marché intégrant les firmes concurrentes,
- de trouver un équilibre entre l'exploration de nouvelles actions et l'utilisation des actions déjà utilisées,
- de s'identifier à des formes organisationnelles performantes dans un marché turbulent.

La majorité des simulations multi-agents proposées [126], Yildioğlu [180, 179, 178], Mitlohner [107] et Bagnall [9] n'aborde l'adaptation qu'au niveau micro. Ces simulations ne considèrent pas les formes organisationnelles ni leurs relations avec les firmes. Elles proposent l'utilisation des techniques d'apprentissage pour modéliser l'adaptation sans considérer les problèmes que ces techniques peuvent engendrer dans un contexte multi-agents. Nous pouvons citer comme exemple le problème important de l'exploration-exploitation. Ce problème influence considérablement la survie des agents. De plus, rares sont les simulations qui ont considéré un nombre important de firmes.

## 9.2 Contributions

Nous nous sommes appliqués au cours de cette thèse à concevoir et implémenter un système multi-agents adaptatif modélisant ces différents aspects. La construction de ce système a nécessité :

1. l'identification des caractéristiques des systèmes économiques et des problèmes qu'ils engendrent,
2. la proposition d'un modèle de firmes basé sur la théorie des ressources pour que l'interprétation des résultats soit plus facile,
3. la mise au point d'un modèle comportemental des firmes basé sur les agents adaptatifs,
4. le traitement du problème d'exploration/exploitation,
5. et enfin la modélisation des formes organisationnelles et leurs relations avec les firmes.

Ces différents points seront détaillés dans ce qui suit.

### 9.2.1 Un modèle des firmes

Le modèle économique considéré définit un ensemble de firmes en compétition via le marché. Le modèle de firmes MORE proposé en collaboration avec Rodolphe Durand (professeur en management à HEC) est fondé sur la théorie des ressources. L'avantage de la théorie des ressources est qu'elle étudie l'évolution de la firme dans le marché. Le modèle élaboré est simple. Il peut être facilement mis à jour en vue de l'intégration de nouvelles caractéristiques. Le système conçu dans ce travail, nous a permis d'ajuster les paramètres de ce modèle pour le rapprocher le plus possible de la réalité.

### 9.2.2 Un framework d'agents adaptatifs

Les firmes sont représentées dans notre modèle par des agents adaptatifs. Pour modéliser l'adaptation dynamique des agents à l'évolution de leur environnement, et améliorer ainsi leur perception, nous les avons doté d'une capacité d'apprentissage.

Pour faciliter l'implémentation de ces agents adaptatifs, nous nous sommes appuyés sur les systèmes de classeurs apprenants et en particulier sur le système de classeurs XCS. XCS permet de comprendre l'adaptation d'un système dans un environnement changeant. Il représente les connaissances d'une manière compacte.

Nous avons défini un framework d'agents adaptatifs. Ce framework est issu de l'intégration de XCS et de l'architecture d'agents de DIMA. Il permet d'améliorer la rationalité de la firme en lui permettant :

- de construire dynamiquement et automatiquement ses règles de décisions,
- d'évaluer ces règles en fonction des résultats de leur application,
- de choisir une action appropriée dans le cas où une situation déjà existante est rencontrée.

Nous avons contribué par ce framework à l'enrichissement de la librairie d'agents proposée par la plate-forme multi-agents DIMA. Ce framework a été ensuite utilisé pour modéliser les firmes. Cette modélisation a permis de tester le framework XCS dans un contexte multi-agents alors qu'il a été surtout testé dans un contexte mono-agent où les autres entités sont passives. Elle a conduit à l'identification des avantages (amélioration des performances et de la résistance des firmes) et des problèmes engendrés par l'application de XCS dans de tels contextes tel que la lenteur de l'apprentissage.

Par ailleurs, nous avons introduit des solutions originales aux problèmes que posent ces systèmes tels que le codage des données. Nous avons, ainsi, mis au point une méthode d'unification des données. Nous avons montré que plus la répartition du domaine de définition des attributs est précise, plus la perception est meilleure et plus les performances augmentent. Nous avons aussi traité le problème important de l'exploration/exploitation. La solution proposée est décrite dans la section suivante.

### 9.2.3 Une approche adaptative pour le choix entre exploration-exploitation

Pour étudier le dilemme d'exploration/exploitation, nous avons d'une part étudié l'effet de l'exploration dirigée sur le comportement des firmes, et d'autre part, nous avons proposé une approche adaptative pour la résolution du dilemme d'exploration/exploitation. Nous avons également adapté deux techniques proposées par Wilson à un contexte dynamique.

Pour permettre à la firme de choisir entre l'exploration et l'exploitation en fonction de l'évolution de ses performances, nous avons proposé des méta-règles dont le principe général est de varier les périodes d'exploration et d'exploitation en fonction des variations des performances de la firme. Ce choix est important pour la firme et constitue l'une des garanties de sa survie. L'approche proposée est plus stable et plus performante que les approches de Wilson, dont la performance est dépendante d'une valeur appelée facteur de gain. Cependant, ces méta-règles peuvent encore être améliorées par l'adaptation des taux de variation des périodes d'exploration et d'exploitation.

### 9.2.4 Un système multi-agents adaptatif

Nous avons proposé un modèle pour les formes organisationnelles. Les formes organisationnelles sont définies en terme de variation des ressources des firmes. Ces variations sont représentées par des variables linguistiques. Ce choix est basé sur le fait que l'utilisation de la granulation floue se rapproche plus du raisonnement humain.

Nous avons ensuite proposé de réifier les formes organisationnelles pour étudier leurs relations avec les firmes et, étudier ainsi, la relation entre l'adaptation et la sélection. Aucun modèle, à notre connaissance, n'a encore modélisé simultanément ces deux aspects abordés, jusque-là, indépendamment. Notre travail pallie cette lacune en suggérant un système multi-agents qui permet une analyse à deux niveaux : firmes et formes organisationnelles.

Notre système intègre les firmes (niveau micro) et les formes organisationnelles (niveau macro), et représente les différentes relations entre ces deux niveaux. Ce système nous a permis de répondre aux questions posées au début de ce travail et de comprendre les phénomènes suivants :

- l'influence de l'adaptation des firmes sur l'émergence des formes organisationnelles,
- l'influence des formes organisationnelles sur les firmes.

Notre travail nous a permis de conclure que le système multi-agents mis au point est auto-adaptatif. Un système auto-adaptatif, tel qu'il a été défini par Guessoum [67], *est un système ouvert qui modifie continuellement sa structure en fonctionnant. Il a une représentation de l'état de son environnement et une représentation de sa propre organisation. Il adapte continuellement son organisation pour réagir aux variations de son environnement.* En effet, l'adaptation n'est pas uniquement présente au niveau du comportement des agents représentant les firmes mais aussi au niveau des structures organisationnelles définies par les formes organisationnelles. Elle constitue le fondement de l'architecture du système. Il existe donc une boucle de rétroaction où l'évolution des firmes affecte la population des formes organisationnelles (émergence de nouvelles formes organisationnelles, disparition de formes organisationnelles, etc.) et inversement, l'évolution des formes organisationnelles affecte la population des firmes et leurs performances (apparition de nouvelles firmes, disparition de firmes, etc.). Ainsi, ce modèle permet aux économistes de comprendre et d'expliquer l'évolution de la firme dans son contexte dynamique.

## 9.3 Perspectives

Notre système offre des réponses à plusieurs questions qui étaient jusqu'à maintenant ouvertes. Cependant, les perspectives de ce travail sont nombreuses. Nous citons dans ce paragraphe quelques une :

### 9.3.1 Améliorer la vitesse d'apprentissage des firmes

Les systèmes d'apprentissage tel que XCS permettent de représenter et d'expliquer l'adaptation d'un système à un environnement changeant. Ils souffrent, cependant, de la rapidité de la convergence de la base de règles. Ils souffrent également de la difficulté de la convergence vers des solutions optimales. La convergence vers une solution optimale

est en fait, garantie par la vérification de l'hypothèse de Markov<sup>1</sup>. Sigaud [136] a identifié des classes de problèmes où cette hypothèse n'est pas vérifiée :

- le cas où la perception est ambiguë,
- le cas où l'agent est doté de variables internes qui évoluent au cours du temps,
- le cas où l'environnement de l'agent évolue au cours du temps,
- le cas où les sources de récompense évoluent au cours du temps.

Les paramètres des firmes, sa fonction de récompense ainsi que la dynamique du marché et l'adaptation simultanée des firmes nous situent dans trois dernières classes de problèmes. Une des solutions à ces problèmes est d'élargir la perception des firmes. Les résultats ont montré que la considération des formes organisationnelles dans la perception des firmes pouvait améliorer les performances de la firme et la vitesse d'apprentissage. Plus, le contexte de l'agent est riche, plus le système de classeurs donne de bon résultats. Cependant, le nombre d'attributs à inclure dans ce contexte est limité dans XCS par la longueur de la chaîne les représentant. Il faudra donc réfléchir à une autre méthode pour réduire le nombre d'attributs ou encore améliorer la vitesse d'apprentissage des firmes.

### 9.3.2 Adapter le taux de variation des périodes d'exploration et d'exploitation

La méthode d'exploration proposée est simple, elle permet d'améliorer les performances de la firme en trouvant un équilibre entre l'exploration et l'exploitation. Elle peut encore être améliorée en considérant des taux de variation des périodes d'exploration et d'exploitation adaptatifs. Nous proposons de les varier en fonction de l'âge de la firme. Cette solution nous permettra ainsi de réduire le nombre de paramètres à considérer.

### 9.3.3 Etudier la variation des formes organisationnelles

Nous nous sommes basés dans l'étude des formes organisationnelles sur leur émergence et leur déclin mais nous n'avons pas considéré leur variation au cours du temps. L'étude de la variation temporelle des formes organisationnelles constitue donc une voie de recherche à explorer. De même, il serait intéressant d'utiliser notre modèle de formes organisationnelles avec d'autres modélisations de firmes (autre que l'approche par les ressources). Ceci nous permettra de montrer la généralité de notre modèle.

---

<sup>1</sup>L'hypothèse de Markov stipule qu'une mémoire des perceptions passées ne permet pas de déterminer avec plus de précision la probabilité que l'agent se trouvera dans chaque état possible à l'issue de son action

### **9.3.4 Tester notre système par la communauté économique**

Notre dernière perspective revient à faire tester notre système par plusieurs chercheurs en économie. Ce système leur permettra d'une part de valider leur théories et modèles et de comprendre les phénomènes émergents à partir de plusieurs configurations de marché.

# Bibliographie

- [1] Analyse-avairs.com.
- [2] H. E. Aldrich. *Organizations Evolving*. Sage, Canada, 1999.
- [3] H.E. Aldrich and C.M. Fiol. Fools rush in? the institutional context of industry creation. *Academy of Management Review*, 19(4) :645–670, 1994.
- [4] W. B. Arthur. Complexity and the economy. *Science*, 284 :107–109, April 1999.
- [5] W. B. arthur, J. H. Holland, B. LeBaron, Palmer R., and P. Tayler. Asset pricing under endogeneous expectations in an artificial stock market. Working Paper 96-12-093, Santa Fe Institute, 1996.
- [6] C. Assens and A. Baroncelli. Firms dynamics. the ineluctable "entanglement" of the organizational forms. In *Presented in the 18<sup>th</sup> EGOS colloquium*, Spain, 2002.
- [7] R. Axelrod and L. Tesfatsion. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter A guide for newcomers to agent-based modeling in the social sciences. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [8] R. Azoulay-Schwartz, S. Kraus, and J. Wilkenfeld. Exploitation, exploration and innovation in a model of endogenous growth with locally interacting agents. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2003.
- [9] A. J. Bagnall. A multi-agent model of the uk market in electricity generation. In L. Bull, editor, *Applications of Learning Classifier Systems, Studies in Fuzziness and Soft Computing*, volume 15. 2004.
- [10] G. Ballot and E. Taymaz. Technological change, learning and macro-economic coordination : an evolutionary model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation JASSS*, 2(2), 1999.
- [11] W.P. Barnett, R. Greve, and D. Park. An evolutionary model of organizational performance. *Strategic Management Journal*, 15 :11–24, 1994.
- [12] J.B. Barney. Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 1 :99–120, 1991.
- [13] J. Barr and F. Saraceno. A computational theory of the firm. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 49 :345–361, 2002.
- [14] J. A. C. Baum and H. Rao. *Handbook of Organizational Change and Development : Evolutionary Dynamics of Organizational Populations and Communities*. Oxford University Press, November 1999.

- [15] J. A. C. Baum and J. V. Singh. *Evolutionary Dynamics of Organizations*, chapter Organizatoin-environment coevolution, pages 379–402. New York : Oxford University Press, 1994.
- [16] S. Bejean, F. Midy, and C. Peyron. La rationalité simonienne : Interprétations et enjeux épistémologiques. Document de travail 1999-14, LATEC, Laboratoire d'Analyse et des Techniques Economiques, Université de Bourgogne, November 1999. available at <http://ideas.repec.org/p/lat/lateco/1999-14.html>.
- [17] L. Ben Said. *Simulation Multi-Agents des Comportements des Consommateurs dans un Contexte Concurrentiel*. Informatique, Université de Paris VI, Laboratoire d'Informatique de Paris VI, Juin 2003.
- [18] A. Beïtone. La place de la rationalité dans les comportements économiques. 2003.
- [19] R. Boero, M. Castellani, and F. Squazzoni. Micro behavioural attitudes and macro technological adaptation in industrial districts : an agent-based prototype. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(2), 2004.
- [20] A. Bonarini. Reinforcement distribution for fuzzy classifiers : a methodology to extend crisp algorithms. In *IEEE conference 1998*, 1998.
- [21] K. E. Boulding. What is evolutionary economics ? *Journal of Evolutionary Economics*, 1 :9–17, 1991.
- [22] L.J. Bourgeois. Strategic goals, perceived uncertainty and economic performance in volatile environment. *Academy of management journal*, 28(3) :548–573, September 1985.
- [23] P. Bourguine and B. Leloup. Compromis exploration/exploitation. Ile de Berder, Mai 2000.
- [24] J. P. Bréchet and A. Desreumaux. Des théories de la firme aux dynamiques de l'action collective. Technical report, Cahier de Recherche 1999 du Centre de Recherche en Gestion de l'Université de Nantes, Claree de l'IAE de Lille, 1999.
- [25] T. Brenner. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter Agent Learning Representation - Advice in Modelling Economic Learning. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [26] P. Bromiley and C. Papenhausen. Assumptions of rationality and equilibrium in strategy research : The limits of traditional economic analysis ? *Strategic Organization*, 1(4) :413–437, 2003.
- [27] E. Bruederer and J. V. Singh. Organizational evolution, learning, and selection : A genetic-algorithm based model. *Academy of Management Journal*, 39(5) :1322–1349, 1996.
- [28] M. V. Butz, D. E. Goldberg, and P. L. Lanzi. Gradient-based learning updates umprove xcs performance in multistep problems. In K. Deb et al. (Eds.), editor, *GECCO 2004*, number 3103 in LNCS, pages 751–762. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [29] M. V. Butz and S. W. Wilson. An algorithmic description of XCS. *Lecture Notes in Computer Science*, 1996 :253–272, 2001.
- [30] P. Cahuc. *La nouvelle microéconomie*. Collection Repères, 1993.

- [31] A. Cardon and Z. Guessoum. Système multi-agents adaptatifs. In *JFIADSMA '2000*, pages 100–116, October 2000.
- [32] K. M. Carley. Adaptive organizations and emergent forms. *IEEE 769, 1998*, 4 :153–172, 1994.
- [33] K. M. Carley. Adaptive organizations and emergent forms. Working Paper 1-26, CASOS, Center for Computational Analysis of Social and Organizational Systems, 1998.
- [34] K. M. Carley, M. J. Prietula, and Z. Lin. Design versus cognition : The interaction of agent cognition and organizational design on organizational performance. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1(3), 1998.
- [35] D. Carmel and S. Markovitch. Exploration strategies for model-based learning in multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-agent systems*, 2(2) :141–172, 1999.
- [36] M-J. Chen. Competitor analysis and interfirm rivalry : toward a theoretical integration. *Academy of Management Review*, 1 :100–134, 1996.
- [37] J. Child and R. G. McGrath. Organizations unfettered : organizational form in an information-intensive economy. *Academy of Management journal*, 44(6) :1135–1148, 2001.
- [38] N. Coutinet. *Le capital humain : dimensions économiques et managériales*, chapter L'importance des compétences dans la compétitivité des firmes : acquisition, création et développement, pages 111–126. Presses Universitaires d'Angers, 1999.
- [39] R. Cyert and J. G. March. *A Behavioral Theory of the Firm, Second Edition*. Prentice-Hall, 1992.
- [40] R.M. Cyert and J.G. March. *Processus de décision dans l'entreprise*. Dunod, 1970.
- [41] R. L. Daft and A. Y. Lewin. Where are the theories for the "new" organizational forms? an editorial essay. *Organization Science*, 4 :i–vi, 1993.
- [42] A. Dal Forno and H. Merlone. A multi-agent simulation platform for modeling perfectly rational and bounded-rational agents in organizations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(2), 2002.
- [43] H. Dawid. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter Agent-based models of innovation and technological change. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [44] Centro de Estudios Avanzados de la Universidad de Buenos Aires.
- [45] G. Dosi, G. Faggiolo, and L. Marengo. *Evolutionary Foundations of Economics*, chapter Learning in Evolutionary Environments. Cambridge : Cambridge University Press., 2005.
- [46] G. Dosi and R. R. Nelson. An introduction to evolutionary theories in economics. *Journal of Evolutionary Economics*, 4 :153–172, 1994.
- [47] G. Drean. L'entreprise et la théorie économique. *Le québécois libre*, (114) :9, Novembre 2002.
- [48] A. Drogoul. *De la Simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 1993.

- [49] R. Durand. *Management Stratégique des Ressources et performances des firmes*. PhD thesis, Ecole des hautes études commerciales, France, 1997.
- [50] R. Durand, editor. *Entreprise et évolution économique*. Belin, France, 2000.
- [51] R. Durand. Firm selection : An integrative perspective. *Organizations Studies*, 2001.
- [52] R. Durand, editor. *Développement de l'organisation : Nouveaux regards*. Economica, France, 2002.
- [53] R. Durand and B. Quélin. *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie*, chapter Les contributions de la théorie des ressources à une théorie évolutionniste de la firme, pages 45–75. L'Harmattan, 1999.
- [54] S. K. Ethiraj and D. Levinthal. Bounded rationality and the search for organizational architecture : An evolutionary perspective on the design of organizations and their evolvability. *Administrative Science Quarterly*, 49(3), 2004.
- [55] J. Ferber. *Les systemes multi-agents*. InterEditions, 1995.
- [56] J. Ferber. *Multi-agent systems*. Reading MA : Addison-Wesley, 1999.
- [57] G. W. Flake. *The Computational Beauty of Nature : Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems and Adaptation*. A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge Manchachussetts, London, 1998.
- [58] M. Forte, J. J. Hoffman, B. T. Lamont, and E. N. Brockmann. Organizational form and environmet : An analysis of between-form and within-form responses to environmental change. *Strategic Management Journal*, 21 :753–773, 2000.
- [59] N. J. Foss. Introduction : New organizational forms - critical perspective. *International Journal of Business*, 9(1) :1–8, 2002.
- [60] M. Friedman. The methodology of positive economics. *Essays in Positive Economics (1953) publ*, 1953.
- [61] P. Gerard. *Apprentissage de l'anticipation pour la coordination*. PhD thesis, Université de Paris VI, 2002.
- [62] M. Girod. La mémoire organisationnelle. *Revue Française de Gestion*, pages 30–42, September 1995.
- [63] J. C. Gittings. *Multi-armed bandit allocation indices*. NY : John Wiley and sons, 1989.
- [64] R.M. Grant. The resource-based theory of competitive advantage : implications for strategy reformulation. *California Management Review*, pages 114–135, Spring 1991.
- [65] R. Grothmann. *Multi-agent market modelling based neural networks*. Ph'd, Faculty of Economics, University of Bremen, Germany, Munich.
- [66] G. Gueguen. Types de turbulences environnementales et adaptations stratégiques. In *tutorat Grand Sud*, Lyon, Juin 1999.
- [67] Z. Guessoum. *Modèles et architectures d'agents et de systèmes multi-agents adaptatifs*. Thèse d'habilitation de l'université de paris 6, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, 2003.

- [68] Z. Guessoum and J.P. Briot. From active object to autonomous agents. *IEEE Concurrency*, 7(3) :68–78, uly/september 1999.
- [69] Z. Guessoum, L. Rejeb, and R. Durand. Using adaptive multi-agent systems to simulate economic models. In *AAMAS04*, ACM, pages 68–76, New York City, July 2004.
- [70] R. Henderson and W. Mitchell. The interactions of organizational and competitive influences on strategy and performance. *Strategic Management Journal*, 18 (Summer Special Issue) :5–14, 1997.
- [71] J. H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology*. MIT Press, 1975.
- [72] J. H. Holland. Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1) :17–30, 1992.
- [73] J.H. Holmes, W. Soltzmann, and S.W. Wilson. Learning classifier systems : New models, successful applications. *Inf. Process. Lett*, 82(1) :23–30, 2002.
- [74] C. H. Hommes. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter Heterogeneous Agent Models in Economic Finance. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [75] G. Hutzler. *Du jardin des hasards aux jardins des données : une approche artistique et multi-agent des interfaces hommes / systèmes complexes*. PhD thesis, Université de Paris VI, Janvier 2000.
- [76] N. Jacoby. Evolution of firms in complex worlds generalized nk models. In J. Mira and A. Prieto, editors, *IWANN 2001*, volume 2084 of *LNCS*, pages 602–611. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2001.
- [77] S. Janczak and A. Ouedraogo. Changement organisationnel et nouvelles formes d’organisations : observations effectuées au canada. In *AIMS2005, XIVième Conférence Internationale de Management Stratégique*, Pays de la Loire, Angers, 2005.
- [78] L. P. Kaelbling. Learning to achieve goals. In *IJCAI*, pages 1094–1099, 1993.
- [79] L. P. Kaelbling, M. L. Littman, and A. P. Moore. Reinforcement learning : A survey. *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)*, 4 :237–285, 1996.
- [80] M. Kalika. De l’organisation réactive à l’organisation anticipative. In *Revue Française de Gestion*, number 86. 1991.
- [81] M. Kechidi. Rationalités et contextes de décisions : un retour sur h. simon. *Revue Internationale de Systémique*, 12, 1998.
- [82] T. B. Klos. *Agent-Based Computational Transaction Cost Economics*. PhD thesis, 2000.
- [83] S. Kochugovindan and N. J. Vriend. Is the study of complex adaptive systems going to solve the mystery of adam smith’s "invisible hand". *The Independent Review*, III(1) :53–66, Summer 1998.
- [84] S. Koenig and R.G. Simmons. *Recent Advances in Reinforcement Learning*, volume 22 of *Machine Learning*, chapter The Effect of Representation and Knowledge on Goal-Directed Exploration with Reinforcement-Learning Algorithms, pages 227–250. Kluwer Academic Publishers, 1996.

- [85] T. Kovacs and M. Kerber. *Advances in Learning Classifier Systems*, chapter What Makes a Problem Hard for XCS?, pages 80–99. LNCS : Springer-Verlag, 2001.
- [86] E. Kutschinski, T. Uthmann, and D. Polani. Learning competitive pricing strategies by multi-agent reinforcement learning. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 27 :2207–2218, 2003.
- [87] B. Le Baron. Building the sfi artificial stock market. Technical report, International Business School, USA, 2002.
- [88] B. Le Baron. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter Agent-Based Financial Markets. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [89] C. Le Bas. La théorie évolutionniste de la firme. etat des lieux raisonné et implications pour l’analyse stratégique. Document de travail 274, Centre Walras -CNRS-UMR 5056, Centre Auguste et Leon Walras, Lyon, 2003.
- [90] J. L. Le Moigne. Représenter et raisonner : Les comportements socio-économiques. Technical report, Programme européen M.C.X/A.P.C.
- [91] J. L. Le Moigne. On theorizing the complexity of economic systems. *The Journal of Socio-Economics*, 24(3) :477–499, 1995.
- [92] K. Lee and J. M. Pennings. Mimicry and the market : adoption of a new organizational form. *Academy of Management journal*, 45(1) :144–162, 2002.
- [93] D. A. Levinthal and J. G. March. The myopia of learning. *Strategic Management Journal*, pages 95–112, 1993.
- [94] D.A. Levinthal. Adaptation on rugged landscapes. *Management Science*, 43 :934–950, 1997.
- [95] A.Y. Lewin, C. P. Long, and T. N. Caroll. The coevolution of new organizational forms. 10(5) :535–550, September-October 1999.
- [96] A.Y. Lewin and H.W. Volberda. Proegomena on coevolution : A framework for research on strategy and new organizational forms. *Organization Science*, 10(5) :519–534, September-October 1999.
- [97] A. Lomi and E. R. Larsen. Interacting locally and evolving globally : A computational approach to the dynamics of organizational populations. *Academy of Management Journal*, 39(4) :1287–1321, 1999.
- [98] A. Lopez-Paredes, C. Hernandez-Iglesias, and J. Pajares Gutierrez. Towards a new experimental socio-economics, complex behavior in bargaining. *The Journal of Socio-Economics*, 31 :423–429, 2002.
- [99] M. M. Maes. Modeling adaptative autonomous agent. *Artificial life journal*, 1(1 et 2) :135–162, 1994.
- [100] J. G. March and H. A. Simon. *Les organisations*. Editions Dunod, 1991.
- [101] R. Matthews, H. Piranfar, I. Telmsani, and T. Brabzon. Evolutionary learning : Significance for business organisation and strategy. Kingston business school occasional papers series, Kingston Business School, 2003.
- [102] J. Metcalfe. Evolutionary economics and technological policy. *Economic Journal*, 104 :931–943, 1994.

- [103] N. Meuleau and P. Bourguine. Exploration of multi-state environments : Local measure and back-propagation of uncertainty. *Machine Learning*, 35(2) :117–154, 1999.
- [104] F. Michel. *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. Ph'd, Université des Sciences et Techiques du Langedoc, Longuedoc, 2004.
- [105] H. L. Miramontes and T.C. Fogarty. Social simulation using a multi-agent model based on classifier systems : the emergence of vacillating behavior in the "el farol" bar problem. In P. L. Lanzi, W. Stolzmann, and S. W. Wilson, editors, *Advances in learning classifier systems*, number 2321 in LNCS. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [106] L. Miramontes H. Co-evolutionary agent self-organization for city traffic congestion modeling. In K. et al. (Eds.) Deb, editor, *GECCO 2004*, number 3103 in LNCS, pages 993–1004. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [107] J. Mitlohner. Classifier systems and economic modeling. In UK. ACM, editor, *Proceedings of the APL 96 Conference on Designing the Future*, volume 19, pages 77–86, Lancaster, UK, July 1996.
- [108] R. R. Nelson and S. J. Winter. *An Evolutionary Theory of economic change*. Belknap Press, 1982.
- [109] G. O'Driscoll and M. Rizzo. *The Economics of Time and Ignorance*. New York : Routledge, New York, 1996.
- [110] J. Pajares, C. Hernández-Iglesias, and A. López-Paredes. Modeling learning and r&d in innovative environments : a cognitive multi-agent approach. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 7(2), 2004.
- [111] H.V.D. Parunak, R. Savit, and R. Riolo. Agent-based modeling vs. equation-based modeling. In *Multi-agent systems and Agent-Based Systems MABS'98*, LNAI 1534, pages 10–25. Springer, 1998.
- [112] E. T. Penrose. *The Theory of the Growth of the Firm*. Basil Blackwell, 1959.
- [113] D. Phan. *Cognitive Economics*, chapter From Agent-Based Computational Economics towards Cognitive Economics, pages 371–398. Springer Verlag, 2004.
- [114] J.J. Pluchart. Développement des compétences dynamiques d'une firme et création de valeur pour ses actionnaires. In *LA METAMORPHOSE DES ORGANISATIONS Design organisationnel : créer, innover, relier*, Vittel, France, Octobre 2002.
- [115] L. Polos, M. Hannan, and G. Carroll. Forms and identities : On the structure of organizational forms. Working Paper 99-177, CCSOM, University of Stanford, 1999.
- [116] L. Polos, M. Hannan, and G. Carroll. Foundations of a theory of social forms. *Industrial and Corporate Change*, 11(2), 2002.
- [117] M. Porter. *Competitive advantage*. Free Press, New York, 1985.
- [118] A. Péres-Urbe and B. Hirsbrunner. The risk of exploration in multi-agent learning systems : a case study. In *Proc. Agents-00 Joint workshop on learning agents*, pages 33–37, Barcelona, June 2000.

- [119] A. Pyka and G. Fagiolo. *The Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*, chapter Agent-Based Modelling : A Methodology for Neo-Schumpeterian Economics. Edward Elgar, Cheltenham, 2005.
- [120] L. Rejeb, Guessoum, R. Z., Durand, and T. Jarraya. Adaptive multi-agent simulation of firms and organizational forms. In *ISPS2003 International Symposium on Programming and Systems*, Algeria, Mai 2003.
- [121] L. Rejeb and Z. Guessoum. An adaptive approach for the exploration-exploitation dilemma for learning agents. In Springer, editor, *proceedings of the fourth International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEE-MAS 2005)*, number 3690 in LNAI, pages 316–325, Budapest, Hungary, September 2005.
- [122] L. Rejeb and Z. Guessoum. *Artificial economics : Agent-based methods in finance, game theory and their application*, volume 564 of *Lecture Notes in Economics and Mathematica Systems*, chapter Firms adaptation in dynamic economic systems, pages 53–64. Springer, 2005.
- [123] L. Rejeb, Z. Guessoum, and R. M’Hallah. An adaptive approach for the exploration-exploitation dilemma and its application to economic systems. In Verbeeck Katja Jan’t Hoen Pieter Tuyls, Karl and Sen Dandip, editors, *AAMAS 05, Workshop 20 : Learning and Adaptation in MAS(LAMAS)*, pages 97–106, Utrecht, the Netherlands, July 2005.
- [124] G.B. Richardson. The organization of industry. *Economic Journal*, pages 883–896, September 1972.
- [125] M. Richiardi. On the use of agent-based simulations. Technical report, Laboratorio R. Revelli, 2003.
- [126] S. L. M. Rivero, B. H. Storb, and R. S. Wazlawick. Economic theory, anticipatory systems and artificial adaptive agents. *Brazilian Electronic Journal of Economics*, 2(2) :19, 1999.
- [127] E. Romanelli. The evolution of new organizational forms. *Annual rev. Soc.*, 17 :79–103, 1991.
- [128] C. Roux-Dufort. *Développement de l’organisation, Nouveaux regards*, chapter L’apprentissage organisationnel et le développement de l’organisation, pages 111–134. Economica, 2002.
- [129] M. Ruef. The emergence of organizational forms : A community ecology approach. *American Journal of Sociology*, 106(3) :658–714, 2001.
- [130] A. M. Rugman and A. Verbeke. Edith penrose’s contribution to the resourcebased view of strategic management. *Strategic Management Journal*, 23(8) :769–780, 2002.
- [131] S.D. Sarasvathy and H.A. Simon. Near decomposability, effectuation, and the speed of growth of entrepreneurial firms. In *The First Annual Technology Entrepreneurship Research Policy Conference*, Robert H. Smith School of Business, University of Maryland, May 2000.
- [132] J. Schmidhuber, J. Zhao, and N. Schraudolph. *Learning to learn*, chapter Reinforcement learning with self-modifying policies., pages 293–309. Kluwer.

- [133] S. Schulenburg and P. Ross. *Learning Classifier Systems : From Foundations to Applications*, volume 1813 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, chapter An Adaptive Agent Based Economic Model, pages 265–284. Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [134] J. Schumpeter. *The Theory of Economic Development*. MA Harvard University Press, 1934.
- [135] S. Sen and G. Weiss. *Multiagent Systems : A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, chapter Learning in Multi-agent systems, pages 259–298. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [136] Olivier Sigaud. *Comportements adaptatifs pour les agents dans des environnements informatiques complexes*. Habilitation à diriger des recherches, l'Université PARIS VI, Decembre 2004.
- [137] H. A. Simon. *Administrative Behavior*. New York Macmillan, 1957.
- [138] H. A. Simon. The architecture of complexity. In *Proceedings of the American Philosophical Society*, volume 106, pages 467–482, 1962. Reprinted in : H. A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, M.I.T Press, Cambridge, Massachusetts.
- [139] H. A. Simon. style in design. In *2nd annual Design Research Association Conference*, Pittsburg, 1971.
- [140] H. A. Simon. *Models of Bounded Rationality and Other Topics in Economics - Collected Papers*, volume 2. The MIT press, 1982.
- [141] H. A. Simon. *Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach*, chapter Why should machine learn? CA : Morgan Kaufmann, Los Altos, 1983.
- [142] H.A. Simon. Information processing in computer and man. *America Scientist*, 52(3), 1964.
- [143] H.A. Simon. *Models of Bounded Rationality*, chapter Rational decision making in business,, pages 474–494. MIT press, 1982.
- [144] H.A. Simon. *Les sciences de l'artificiel*. folio essais, 2004.
- [145] J. V. Singh. Apports et limites des théories de l'évolution organisationnelle. Technical report, Les amis de l'écoles de Paris du Management, 1994.
- [146] J.V. Singh and C.J. Lumsden. Theory and research in organizational ecology. *AnnualReview of Sociology*, 16 :161–95, 1990.
- [147] C. Smirchich, L. et Stubbart. Strategic management in an enacted world. *Academy of management review*, 10(4) :724–736, 1985.
- [148] R. E. Smith, P. J. Kearney, and W. Merlat. Evolutionary adaptation in autonomous agent-systems : a paradigm for the emerging entreprise. *BT Technology Journal*, 17(4) :157–167, October 1999.
- [149] H. Sornn-Friese. *Learning in firms and markets : Organizational Adaptation and Industry dynamics in the road Haulahe industry in Denmark in the 1990s*. Phd thesis, Copenhagen business school, October 2001.
- [150] W. Stolzmann. Anticipatory classifier systems. In J. R. Koza, W. Banzhaf, K. Chellapilla, K. Deb, M. Dorigo, D. B. Fogel, M. H. Garzon, D. E. Goldberg, H. Iba, and

- R. Riolo, editors, *Genetic Programming 1998 : Proceedings of the Third Annual Conference*, pages 658–664, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, 1998. CA : Morgan Kaufmann.
- [151] R. Sun and I. Naveh. simulating organizational decision-making using cognitively realistic agent model. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 7(3), 2004.
- [152] R.S. Sutton and A.G. Barto. *Reinforcement Learning : an introduction*. MA : The MIT Press/ Bradford books, 1998.
- [153] K. Szabo. The learning firm in a rapidly changing economy. *Quarterly Journal of Budapest University of Economic Sciences*, XXI(4) :40–55, 1999.
- [154] D. J. Teece, G. Pisano, and A. Shen. Dynamic capabilities and strategic management. *SMJ*, 18(7) :509–533, 1997.
- [155] G. Tesauro. Pricing in agent economies using neural networks and multi-agent q-learning. In *Proceedings of Workshop ABS-3 : Learning About, From and With other Agents*, Stockholm, 1999.
- [156] G. Tesauro and J. O. Kephart. Pricing in agent economies using multi-agent q-learning. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems archive*, 5(3) :289 – 304, September 2002.
- [157] L. Tesfatsion. Guest editorial : Agent-based modelling of evolutionary economic systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(5) :1–6, October 2001.
- [158] S. Thornhill and R. Amit. Comprendre l'échec : mortalité organisationnelle et approche fondée sur les ressources. Technical Report 202, Statistiques Canada, Canada, 2003.
- [159] S. B. Thrun. *The role of exploration in learning control*. Van Nostrand Reinhold, Florence, Kentucky, 1992.
- [160] K. G. Troitzsch. Approaching agent-based simulation. In *FIRMA meeting June 2000*, Universitat Koblenz Landau, June 2000.
- [161] I. Truck. *Approches symbolique et floue des modificateurs linguistiques et leur lien avec l'agrégation*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardennes, Laboratoire d'Études et de Recherches Informatiques, Décembre 2002.
- [162] M. Tushman and E. Romanelli. Organization evolution : a metamorphosis model of convergence and reorientation. *Research in Organizational Behavior*, 7 :171–232, 1985.
- [163] S. A. Tywoniak. *Repenser la stratégie*, chapter Le modèle des ressources et des compétences : un nouveau paradigme pour le management stratégique ?, pages 166–204. Librairie VUIBERT, Paris, 1998.
- [164] S. Van der Hoog. *Handbook of Computational Economics Vol. 2 : Agent-Based Computational Economics*, chapter On Multi-Agent Based Simulation. North-Holland (Handbooks in Economics Series), 2005.
- [165] H.W. Volberda and A.Y. Lewin. Co-evolutionary dynamics within and between firms : From evolution to co-evolution. 40(8) :2111–2136, 1999.

- [166] C. Watkins. *Learning from Delayed Rewards*. PhD thesis, University of Cambridge, 1989.
- [167] G. Weiss. *ADAPTION AND LEARNING IN MULTI-AGENT SYSTEMS*, volume 1042 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, chapter Adaptation and Learning in Multi-Agent Systems - Some Remarks and a Bibliography, pages 1–21. Springer-Verlag, 1996.
- [168] M. Wiering. *Explorations in Efficient Reinforcement Learning*. PhD thesis, University of Amsterdam, February 1999.
- [169] S. W. Wilson. State of xcs classifier system research. In P. L. Lanzi, W. Stolzmann, and S. W. Wilson, editors, *Learning Classifier Systems, From Foundations to Applications*, volume 1813, pages 63–82, 2000.
- [170] S. W. Wilson. Classifier systems for continuous payoff environments. In K. Deb et al. (Eds.), editor, *GECCO 2004*, number 3103 in LNCS, pages 824–835. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [171] S.W. Wilson. *From Animals to Animats 4, Proc. of the 4th International Conference of Adaptive Behavior*, chapter Explore/Exploit Strategies in Autonomy. Cambridge.
- [172] S.W. Wilson. Zcs : A zeroth-level classifier system. *Evolutionary Computation*, 2(1) :1–18, 1994.
- [173] S.W. Wilson. Classifier fitness based on accuracy. *Evolutionary Computation*, 3(2) :149–175, 1995.
- [174] S. G. Winter. *Four Rs of Profitability Rents Resources, Routines and Replication*, pages 147–178. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [175] U. Witt. *Explaining Process and Change : Approches to Evolutionary Economics*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1992.
- [176] A. V. Witteloostuijn, C. Boone, and G. R. Carroll. A resource-based theory of market structure. Research report, Groningen : University of Groningen, 2002.
- [177] Ronald R. Yager. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18 :183–190, 1988.
- [178] M. Yildizoglu. Connecting adaptive behaviour and expectations in models of innovation : The potential role of artificial neural networks. *European Journal of Economics and Social Systems*, 15(3), 2001.
- [179] M. Yildizoglu. Modeling adaptive learning : R and d strategies in the model of nelson and winter (1982). In *DRUID's Nelson and Winter Conference*, Aalborg, Denmark, 12-15 Juin 2001.
- [180] M. Yildizoglu. Competing r and d strategies in an evolutionary industry model. *Computational economics*, 19 :51–65, 2002.
- [181] L. A. Zadeh. A new direction in AI : Toward a computational theory of perceptions. *AI magazine*, 22 :73–84, 2001.
- [182] L. A. Zadeh. From computing with numbers to computing with words - from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *International journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 12(3) :307–324, 2002.

- [183] H. J. Zimmerman and P. Zysno. Latent connectives in human decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 4 :37–51, 1980.
- [184] M. Zollo and S. Winter. From organizational routines to dynamic capabilities. Working paper of the Reginald H. Jones Center WP-99-07, Wharton School, University of Pennsylvania, 1999.