

**ACADEMIE DE MONTPELLIER  
UNIVERSITE MONTPELLIER II  
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

**MEMOIRE DE DEA**

**SPECIALITE : INFORMATIQUE**

**ECOLE DOCTORALE : INFORMATIQUE STRUCTURES ET  
SYSTEMES**

**INTERET DU PARADIGME AGENT GROUPE ROLE  
POUR LA MODELISATION :  
APPLICATION A LA FORMALISATION  
DES RESEAUX D'APPROVISIONNEMENT**

**PAR**

**DAMIEN BOUQUIER**

**MAITRES DE STAGES :**

**DR FRANCOIS BOUSQUET**

**DR JEAN PIERRE MULLER**

**JUIN 2004**

INTRODUCTION.....	3
<b>1 LES CHAINES D'APPROVISIONNEMENT ET ELARGISSEMENT AUX SUPPLY NETWORKS MANAGEMENT .....</b>	<b>4</b>
1.1 LA NAISSANCE DE LA NOTION DE SUPPLY CHAIN .....	4
1.2 DEFINITION DES CHAINES D'APPROVISIONNEMENT ET ELARGISSEMENT A LA GESTION DES CHAINES D'APPROVISIONNEMENT. ....	5
1.3 UNE VISION DYNAMIQUE DE LA CHAINE D'ECHANGE : LE RESEAU LOGISTIQUE .....	6
1.4 TYPOLOGIE DES SUPPLY NETWORKS DANS LA LITTERATURE .....	7
1.4.1 <i>Les modèles linéaires et les modèles Multi Agents.</i> .....	7
1.4.2 <i>Les différentes approches Multi Agents des Supply Networks.</i> .....	8
1.4.3 <i>Ce qui n'existe pas dans la littérature</i> .....	10
<b>2 LES SIMULATIONS ET LE MODELE AGR.....</b>	<b>11</b>
2.1.1 <i>Les approches spatiales, objets et fonctionnelles</i> .....	11
2.1.2 <i>La naissance des groupes</i> .....	12
2.1.3 <i>Les utilisations des rôles</i> .....	13
<b>3 UNE REPRESENTATION OCMAS DES RESEAUX D'APPROVISIONNEMENT .</b>	<b>14</b>
3.1.1 <i>La qualité et l'hétérogénéité dans les réseaux logistiques</i> .....	14
3.1.2 <i>Les Decision Making Units, l'approche Objet des supply chains.</i> .....	15
3.1.3 <i>Les Communication Units, l'approche fonctionnelle</i> .....	16
3.2 LES GROUPES D'ECHANGE .....	17
3.2.1 <i>La composition des groupes d'échange</i> .....	17
3.2.2 <i>La création des groupes d'échange</i> .....	18
3.3 DE LA COMMUNICATION A L'ECHANGE COMMERCIAL.....	18
3.3.1 <i>Les ontologies</i> .....	18
3.3.2 <i>Les messages relatifs aux échanges commerciaux</i> .....	20
3.3.3 <i>Les messages relatifs aux relations entre agents</i> .....	21
3.4 LES AGENTS PERMETTANT LA VISUALISATION.....	21
3.4.1 <i>L'algorithme de visualisation du système AGR.</i> .....	21
3.4.2 <i>La visualisation des résultats</i> .....	21
<b>4 DEUX EXEMPLES DE RESEAUX D'APPROVISIONNEMENT.....</b>	<b>22</b>
4.1 UNE FILIERE THEORIQUE : LE JEU DE LA BIERE (BEER GAME) .....	22
4.1.1 <i>Règles du jeu</i> .....	22
4.1.2 <i>Analyse Agent-Groupe-Rôle du jeu de la bière</i> .....	23
4.1.3 <i>Conclusion</i> .....	23
4.2 UN RESEAU D'APPROVISIONNEMENT EXPERIMENTAL DE L'APPROVISIONNEMENT EN RIZ 24	
4.2.1 <i>Analyse en AGR</i> .....	25
4.2.2 <i>Les ontologies nécessaires aux modèles</i> .....	26
4.2.3 <i>L'agencement des agents, des rôles et des groupes</i> .....	26
<b>5 CRITIQUES ET OUVERTURE.....</b>	<b>26</b>

5.1	CRITIQUE DE L'UTILISATION DU PARADIGME AGENT GROUPE ROLE POUR LA SIMULATION .....	26
5.1.1	<i>Un bon cadre de modélisation.</i> .....	26
5.1.2	<i>Une bonne intelligibilité des modèles (ce qui se conçoit bien s'énonce clairement)</i> .....	27
5.1.3	<i>Une programmation simplifiée</i> .....	27
5.2	L'UTILISATION CONJOINTE DES APPROCHES FONCTIONNELLES ET OBJETS.....	28
5.3	VERS UNE EXPLORATION DE LA GESTION DES RESEAUX D'APPROVISIONNEMENT	28
	BIBLIOGRAPHIE .....	29

## Introduction

Les simulations Multi-Agents sont basées sur un ensemble d'entités indépendantes interagissant dans un environnement déterminé. En leur attribuant des comportements proche de la réalité on crée des modèles qui permettent d'analyser les situations. Historiquement la première approche Multi-Agents est dite orientée Agent car elle ne fournit pas de structure particulière à la simulation. Plus récemment l'approche Organisation formule une architecture précise telle que les agents endossent des rôles dans des groupes.

La gestion des écosystèmes et des ressources renouvelables emploie fréquemment des Systèmes Multi-Agents (SMA) comme outils de simulation des organisations sociales. Mais les systèmes orientés Agent (Agent Centred Multi Agents Systems ou ACMAS) ne proposent pas d'architecture particulière à la modélisation. Les nouvelles architectures orientées Organisation permettent d'exprimer des relations sociales et en font d'excellents outils de modélisation. L'utilisation de ces méthodologies et des outils associés accompagne le développement des paradigmes des sciences sociales. En particulier, ces études qui mettent en jeu les acteurs sur le terrain vont de paire avec l'analyse des dynamiques sociales. Elles nous apprennent que différents acteurs (stakeholders) interagissent à titre personnel ou en tant que membre d'un groupe, et que leurs comportements et les émergences qui apparaissent sont les notions clefs de la compréhension de l'organisation sociale. De même plusieurs niveaux d'organisation sont sollicités allant des individus et des communautés jusqu'aux pays. Dans ces cas, les architectures Multi-Agents sont souvent utilisées comme outils de modélisation des sociétés. Elles servent à représenter des entités hétérogènes et à simuler leurs interactions afin d'observer l'évolution du système. En fournissant une structuration solide, l'architecture AGR propose une nouvelle manière de représenter le système.

La thématique développée par l'équipe Green du CIRAD cette équipe est le management des écosystèmes et des ressources naturelles par le développement et l'utilisation de Systèmes Multi Agents (SMA). Cette équipe utilise la modélisation d'accompagnement afin d'aider définir des règles d'usage collectif des ressources tout en tenant compte des retombées écologiques (dégradation du milieu, surexploitation)(Bousquet and Page 2004).

Dans le cadre de la gestion des écosystèmes, l'analyse des réseaux d'approvisionnement en produits agricoles est importante. Les réseaux décrivent les flux

de marchandises et de commandes. Dans la pratique se superpose des relations sociales entre les différents acteurs.

L'objectif est d'utiliser le paradigme Agent Groupe Rôle afin de formuler une plate-forme permettant l'implémentation générique de réseaux d'approvisionnement. Nous montrerons comment ces approches structurantes permettent de mieux conceptualiser la réalité en fournissant un squelette pour construire un modèle.

Ce stage s'est déroulé entre la Thaïlande et la France. L'objectif était en premier lieu de modéliser les filières riz de la région Issan correspondant au Nord Est de la Thaïlande. Dans le cadre de ce stage, il est demandé de concevoir une plate-forme générique d'implémentation de Supply Chain en milieu AGR. En parallèle, il convient de s'interroger sur la pertinence d'une telle approche. Si cette approche s'est d'ors et déjà révélée pertinente dans le cas des systèmes distribués, il faut s'interroger sur les avantages et les inconvénients de cette architecture dans le cadre de la modélisation de phénomènes naturels. La plate-forme produite devra être utile autant pour la recherche fondamentale en Supply Chain qu'utilisable comme support lors de processus collectifs de prise de décision.

(Ce mémoire porte sur l'intérêt d'utiliser une telle architecture dans la conception et l'implémentation des simulations. Nos questionnements trouvent leur application dans la thématique des supply chains ou chaînes logistiques. )

Nous présenterons d'abord la thématique des Supply Chains puis nous élargirons notre étude aux Supply Networks en nous concentrant sur les notions de qualité des produits. Afin de réaliser une plate-forme générique il nous faut étudier une partie de la littérature et en retenir les éléments caractéristiques. Nous étudierons en parallèle la littérature portant sur les systèmes multi-agents organisationnels capables de gérer des agents hétérogènes, et notamment l'apparition du concept de rôle et de groupe. Nous présenterons alors notre formalisation en détaillant les différents agents et leur organisation en groupe. Une fois l'architecture de la modélisation expliquée, nous précisons alors les mécanismes de communication et d'échange entre ceux-ci. Nous fournirons alors deux exemples permettant de valider la formalisation. Dans une dernière partie nous nous interrogerons sur la pertinence de la formalisation proposée et l'intérêt d'utiliser un système orienté organisation.

## **1 Les chaînes d'approvisionnement et élargissement aux Supply Networks management**

*Il faut en moyenne trois mois à une boîte de céréales pour voyager entre l'usine et le supermarché.*

### **1.1 La naissance de la notion de Supply Chain**

Dans les filières classiques, le matériel brut est transformé par une ou plusieurs usines, les produits sont envoyés aux entrepôts pour un stockage intermédiaire puis distribués aux vendeurs en gros puis aux détaillants. Au cours des années 80, les entreprises ont utilisé de nombreuses stratégies de production afin de réduire les coûts de

production. Le kanban, le management total de la qualité, le « juste à temps » sont autant d'exemples de technologies de la production inventés durant cette période.

Parallèlement, le nombre de processus nécessaires à la production d'un article a augmenté rendant les processus de plus en plus nombreux et spécialisés. La spécialisation des étapes de production a incité les entreprises à sous traiter la production de pièces intermédiaires. Il résulte alors une fragmentation de la chaîne de production en de nombreuses entreprises aux fonctions bien définies et leur regroupement au sein de ce que les stratèges industriels appellent « l'entreprise virtuelle ». Une usine virtuelle peut être décrite comme une communauté d'usines chacune restreinte à une étape précise. Chaque unité est liée aux autres par un réseau leur permettant de fonctionner comme une seule entreprise flexible et autonome. Ainsi la réalisation d'un produit nécessite la coordination de plus en plus d'unités de production et les filières se sont complexifiées exponentiellement.

Vers la fin des années 90 de nombreuses compagnies ont ainsi réduit autant que possible leurs coûts de production. La compétition devait se jouer sur un nouveau front. De nombreuses entreprises ont réalisé alors que l'augmentation des profits et la conquête de nouveaux marchés allaient passer par la rationalisation de leurs réseaux d'échanges. Les coûts de mouvement, de stockage, les délais et les retards étaient autant de causes de perte de temps et d'argent. Ainsi il est apparu que l'efficacité d'une filière dépend plus de la coordination des différentes parties de la Supply Chain que de l'efficacité de chaque étape.

Alors est née la notion de Supply Chain. Une Supply Chain est la description d'une filière centrée sur les échanges commerciaux et informationnels. La manipulation de ces informations permet de décrire les problèmes d'acheminement (logistique) et de proposer des réponses (Gestion de chaîne d'approvisionnement).

Le management des Supply Chains permet de coordonner différents postes et d'optimiser le réseau (Staatz). Elle considère que l'efficacité d'une chaîne ne dépend pas uniquement de l'efficacité de ces composants mais surtout de la capacité de chaque composant de se coordonner au mieux. Dans le pire des cas, les buts de ses composants peuvent être antagonistes. Par exemple, un magasin limitera au maximum son stock tandis qu'un client préférera avoir un large choix de produits immédiatement disponibles.

## **1.2 Définition des chaînes d'approvisionnement et élargissement à la gestion des chaînes d'approvisionnement.**

Une Supply Chain est un ensemble d'entreprises produisant ou transportant des articles jusqu'au consommateur. Les relations entre les acteurs peuvent être caractérisées par des délais ou des contraintes. Cette définition donne une vision purement descriptive et statique des chaînes d'approvisionnement comme un réseau de relations fixées et immobiles.

Dans la littérature, cette notion est toujours liée à l'étude des flux de marchandises le long de la filière. La science de la logistique nous apprend la démarche consistant à identifier les points de blocage et les potentialités.

De plus, les conclusions sont toujours reprises de façon à maximiser une fonction de satisfaction correspondant à différents critères tel que le minimum de retard et la maximisation du profit. Le domaine s'intéressant aux mesures à prendre pour optimiser les réseaux d'accompagnement et pour leur mise en place se nomme la gestion des chaînes d'approvisionnement. La majeure partie de la littérature s'intéresse en fait à ce dernier thème. Ainsi de nombreuses définitions ne séparent pas l'aspect descriptif de l'optimisation de la Supply Chain.

La définition suivante est plus proche de la réalité pratique de la littérature :

Supply Chain ou chaîne d'approvisionnement: *ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les clients (détaillants, vendeurs en gros, dépôts, manufacturiers) de façon que les marchandises soient produites et distribuées dans les bonnes quantités, aux bons endroits et au bon moment en limitant les coûts de stockage tout en satisfaisant un niveau de service requis.*

### **1.3 Une vision dynamique de la chaîne d'échange : le réseau logistique**

La littérature évoque deux types de chaînes d'approvisionnement qui ne traitant pas de la même échelle sont abordées différemment. Premièrement, comme nous l'avons vu, de nombreuses études portant sur les relations inter-entreprises considèrent qu'en échangeant des commandes et des marchandises de façon appropriée, elles tendent à baisser leurs coûts. Cependant il existe aussi des études intra entreprise visant à améliorer l'efficacité d'une chaîne au sein même de l'entreprise (Arunachalam, Sadeh et al. 2003). La thématique est alors légèrement différente en ce que chaque atelier a connaissance de l'état des autres ateliers (fil d'attente, pannes), les seules inconnues étant les commandes en entrée. Ces deux types de Supply Chains présentent de nombreux points communs, ainsi nous considérerons que ces deux approches peuvent se regrouper selon une thématique plus générale.

La fragmentation de la filière et de la spécialisation a rendu chaque entreprise plus dynamique. La description d'une filière comme un réseau figé d'entreprises n'est plus conforme à la réalité (Vriend 1994). Alors que les chaînes d'approvisionnement actuelles sont essentiellement statiques, basées sur des relations sur le long terme entre les acteurs clefs, des pratiques plus flexibles et dynamiques ont prouvés leur capacité à rechercher de meilleurs combinaisons entre le fournisseur et le consommateur lors des changements d'état du marché. Les logiciels de chaînes logistiques doivent permettre aux acteurs de changer de partenaires commerciaux. Il est donc nécessaire de fournir aux acteurs des moyens efficaces de communication. Ainsi nous nous concentrerons sur une description moins figée des Supply Chains que nous allons appeler « Supply networks » ou « Réseau Logistique ».

Ainsi nous avons élargi notre étude selon deux axes. D'une part nous ne considérons pas uniquement l'aspect descriptif du réseau logistique mais nous essayons de fournir des outils d'analyse et de management en proposant d'exécuter la simulation. De plus, en permettant au réseau social d'évoluer selon des critères définis de façon externe à la Supply Chain, nous inscrivons notre étude dans un cadre plus large.

La suite de ce mémoire traite donc de réseaux d'approvisionnement dynamique et de la gestion de ceux-ci. Nous nommerons cette thématique « Gestion des réseaux logistiques ».

## **1.4 Typologie des Supply Networks dans la littérature**

Notre travail consiste en la formalisation informatique des Supply Networks sous la forme d'une plate-forme générique permettant l'implémentation des composants d'un réseau logistique. Il faut présenter à l'utilisateur un formalisme clair et efficace, c'est-à-dire facilement compréhensible et maniable. De plus nous devons créer des bibliothèques d'ontologies génériques mais aussi personnalisables et incrémentables.

Le travail se concrétise dans l'implémentation d'une plate-forme permettant l'expression et la simulation de réseaux d'approvisionnement.

Enfin l'implémentation des deux exemples issus de cas réels va permettre de valider cette approche.

La thématique des Supply Networks recouvre des domaines différents : logistique, management, économie ainsi que divers champs en sciences de l'informatique. Chacun de ces domaines aborde les réseaux d'approvisionnement avec son propre point de vue. Si l'on ne peut recenser la variété d'approches utilisées, on peut cependant classer les publications en plusieurs catégories.

### **1.4.1 Les modèles linéaires et les modèles Multi Agents.**

Selon (Parunak, Savit et al. 1998) les systèmes à agents et les systèmes à équations partagent des concepts communs. En effet, les deux représentations considèrent des entités bornées. Les bornes peuvent être claires dans le cas des paysans ou plus floues si l'on considère par exemple une usine. Les entités sont généralement sensées avoir un comportement et souvent des actions. Les deux modèles considèrent aussi que les entités ou leurs agrégats présentent des caractéristiques mesurables.

Ainsi certaines publications proposent des modèles linéaires de Supply Chains. Le problème est abordé de façon générale par la résolution numérique de systèmes d'équations aux dérivées partielles. Le modèle est premièrement analysé de façon à établir les variables qui caractériseront l'état du système à un instant. La dynamique est alors explicitée par un ensemble d'équations liant les différentes variables. L'exécution du modèle consiste alors à évaluer ces expressions. Diverses analyses peuvent facilement être employées sur ce genre de modèle. Par exemple une étude de sensibilité des paramètres mettra en avant l'importance des valeurs initiales (Davidson and Wernstedl 2003).

Mais les deux approches sont différentes selon deux axes majeurs. D'abord les relations entre les différentes entités qu'elles modélisent puis les niveaux où elles concentrent leur attention et la forme des résultats.

La possibilité d'établir des résultats justifiés mathématiquement est un grand avantage des modèles à équations sur les simulations orientées Agent. Ces modèles se limitent cependant à de petites Supply Chains obéissant à des règles simples. Cette puissance analytique est balancée par la nécessité de maintenir des hypothèses simples et donc de schématiser de façon drastique les modèles. De plus, ces systèmes ne peuvent tenir compte de phénomènes asynchrones ou chaotiques. En particulier il n'est pas

possible de faire jouer un humain en tant qu'agent de la simulation. Pour cette raison, cette méthode s'applique principalement à l'étude de cas théoriques.

Dans un modèle à équation, chaque relation évoque une réalité dynamique entre les variables, elle caractérise la dynamique moyenne d'un agrégat d'éléments. Une interprétation de l'équation permet de retrouver la loi qui explique le comportement moyen des éléments. (Cette particule est plus grosse donc elle précipite plus vite). Ainsi dans un modèle à équation, le modélisateur peut retrouver la conséquence d'une succession de relations individuelles cependant ces relations ne sont pas décrites en particulier (Le modèle n'expliquera pas pourquoi une grosse particule peut remonter).

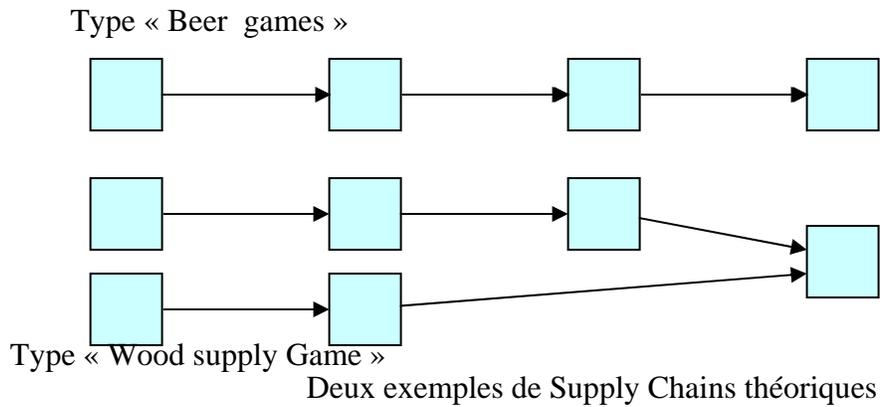
En modèle agent, les comportements individuels sont la brique de base de la simulation. Le comportement d'un agent va induire la réaction d'un autre que ce soit directement (vente directe) ou indirectement (la vente massive d'un article baissera son prix), ce modèle devrait prendre en compte l'ensemble des comportements effectivement observés. Un système agent est beaucoup plus facilement maniable.

Au final les modèles à base d'agents sont plus simples à construire, les systèmes Multi agents permettant de définir naturellement de nombreux niveaux d'interactions. Les systèmes à agents et à équations doivent être validés au niveau de l'agrégat mais seul les modèles à agents peuvent être validés au niveau individuel. Il possède donc intrinsèquement plus d'informations sur le système et constitue une représentation des connaissances plus étoffée.

#### **1.4.2 Les différentes approches Multi Agents des Supply Networks**

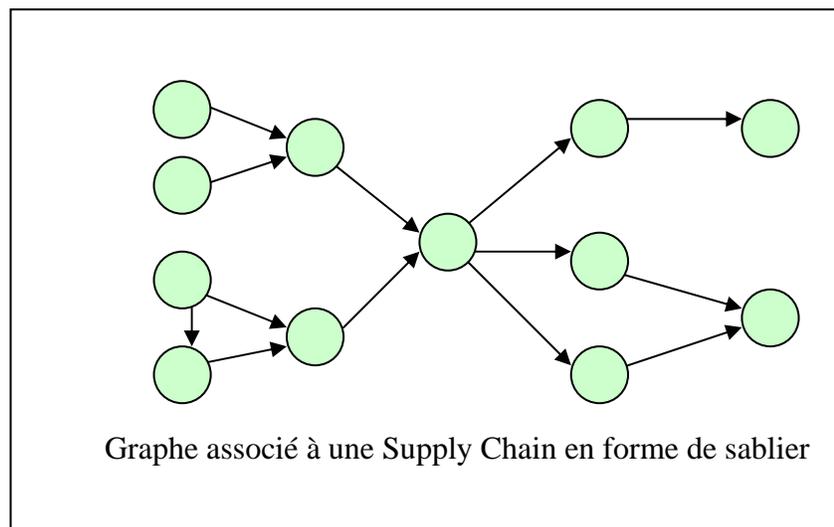
Les raisons ci-dessus expliquent sans doute la profusion d'articles ayant trait à une vision multi agent du système. On peut segmenter la littérature en trois groupes selon la forme de la Supply Chain traitée et si l'étude porte sur le management de la logistique ou des problèmes plus liés aux sciences de l'informatique.

Une première catégorie de publications étudie l'émergence de comportements et la résolution des problèmes logistiques. Très théoriques elles visent à explorer un effet particulier. Le modèle est alors aussi minimaliste que possible et est juste assez complexe pour faire apparaître le facteur émergent étudié. L'étude du classique 'Bullwhip Effect' (Moyaux, Chaib-draa et al. 2003) est à ce titre caractéristique de cette littérature. Le réseau est réduit à une simple chaîne de 4 acteurs. Le producteur, l'usine, le marchand en gros et le détaillant doivent satisfaire les commandes tout en limitant au maximum leurs stocks. On observe les commandes le long de la chaîne et l'on remarque que les variations des demandes augmentent très fortement lorsque l'on s'éloigne du consommateur. Le phénomène est bien visible même si les commandes varient très peu au cours du temps.



On peut aussi citer les études sur le ‘Snowball Effect’ (référence ...). D’autres articles comparent les approches centralisées et distribuées.

En second lieu, certaines publications traitent d’exemples réels le plus souvent réalisées en partenariat avec une entreprise (Flores and Wang 2002). D’autres traitent d’une région industrielle en particulier (Benner 2001). Dans tous les cas, elles visent à apporter une solution aux problèmes logistiques des filières étudiées. Les structures abordées par ces articles sont généralement plus complexes que les réseaux théoriques. En particulier, le réseau d’échanges adopte souvent la forme d’un sablier, l’entreprise principale étant au



centre d’un réseau de fournisseurs et de distributeurs. Cependant les échanges restent unidirectionnels, le réseau est donc un graphe orienté sans cycle. Souvent le système est considéré à priori comme isolé.

Enfin de nombreuses publications étudient d’autres aspects des Supply Chains. L’équipe de (Gupta, Whitman et al. 2001) considère les contraintes pesant sur la coordination entre les différentes entreprises. En effet, au long d’une chaîne logistique certaines entreprises peuvent souhaiter une confidentialité des informations relatives à

leur outil de production. Des problèmes de récolte des données apparaissent. L'information est alors distribuée entre les différents acteurs de la Supply Chain.

(Pathak, Nordstrom et al. 1998) fournissent un autre exemple de publication tournant autour des littératures classiques de la Supply Chain en proposant d'établir des comparaisons entre les chaînes concurrentes.

On peut ajouter dans cette catégorie les études sur les plates-formes permettant de décrire des réseaux d'approvisionnement. Ces plates-formes sont basées uniquement sur le paradigme ACMA et gère uniquement des chaînes statiques d'approvisionnements et non pas les réseaux dynamiques. Si certaines laissent au concepteur le choix de programmer ses protocoles d'échanges d'autres ne proposent que des systèmes semblables à l'algorithme de la main invisible. Enfin aucune des plates-formes proposée ne proposait d'autres types de communications que celles ayant trait à la négociations des prix.

### **1.4.3 Ce qui n'existe pas dans la littérature**

Dans l'ensemble de la littérature, les entités obéissent à des commandes et essayent de répondre efficacement. De même, les entités commandent des produits. Il y a donc un mouvement qui tire les produits vers le consommateur. Si cette vision des Supply Chains est assez logique il est remarquable cependant que le modèle de la filière riz que nous proposons à titre d'exemple fasse exception à cette règle. En effet la filière n'est pas tirée uniquement par le client mais aussi par la production. En effet, les rizeries absorbent l'ensemble de la production de riz sans négociation. Un rizier ne commande pas de riz et ne refuse jamais un chargement. C'est donc bien le producteur qui pousse la marchandise dans tel embranchement de la Supply Chain.

La thématique des réseaux logistiques a été assez peu reprise dans le monde de la simulation de gestion de ressource naturelle. Cependant (Griffon 1989) en souligne l'intérêt. En conséquence, l'utilisation de concepts de filières dans le domaine Multi Agents pour la résolution de problèmes sociaux et économiques constitue un des intérêts de ce travail.

On remarque que peu d'articles traitent des règles d'échanges. (Galtier, Bousquet et al. 2002) compare différents types d'échanges plus ou moins basés sur le libre échange (Forno and Merlone 2002) proposent une plate-forme générale les organisations d'agents mais se limitent à l'interaction d'agent dits rationnels car soumis à l'économie libérale. Au fil de la littérature des supply chain il n'existe aucun article basé sur la différence entre plusieurs protocoles d'échanges. Or des simulations traitent des différences entre protocoles, il faudra laisser modélisateur et aux acteurs économiques du réseau la possibilité de définir leurs propres protocoles.

Les logiciels de simulation considèrent que les protocoles d'échange sont contenus dans l'agent et qu'il est du devoir du modélisateur de les intégrer aux comportements de l'agent.

L'approche Agent semble la plus adéquate pour modéliser le comportement. Nous allons maintenant discuter le modèle organisationnel ainsi que les différentes approches afin de concevoir la plate-forme permettant l'implémentation des Supply Networks.

## 2 Les simulations et le modèle AGR

Le paradigme Agent a donné lieu à de nombreux développements susceptibles de supporter la construction d'une plate-forme représentant les Supply Networks. Dans un premier temps nous allons développer différentes approches proposées par la littérature puis nous expliciterons les notions de groupes et de rôles formant la base des systèmes OCMAS.

Nous avons déterminé les caractéristiques nécessaires à la formalisation des Supply Networks. Nous allons maintenant étudier l'architecture dans laquelle implémenter ces systèmes.

### 2.1 Les approches spatiales, objets et fonctionnelles

Selon (Steeb, S. et al. 1988) les systèmes multi agents peuvent être décrits de différentes façons. Dans le cadre d'un article sur la gestion du trafic aérien les auteurs présentent 3 représentations. La première, dite centrée objet, considère les différents avions et la tour de contrôle comme des entités capables de communiquer. La seconde considère les différentes phases de vols tels que le décollage, l'atterrissage, elle est dite fonctionnelle. Enfin une dernière approche considère l'unité de base du système en la fondant sur l'espace, comme les distances aux différents aéroports.

Cependant ces différentes analyses sont ni équivalentes, ni interchangeables. Nous devons utiliser la plus intelligible. Dans notre travail, il s'agit de donner un cadre efficace et compréhensible à l'implémentation. On compare donc les différentes solutions.

Guido Fioretti dans une étude sur le quartier du Prato (Fioretti 2001) décrit une filière de fabrication de vêtements comme une série d'ateliers répartis dans un espace et se déplaçant selon un mouvement brownien. La formation du réseau d'approvisionnement se fait par accolement des différentes unités de production en fonction des besoins. Les opérations de création de relations commerciales ne dépendent plus des agents mais de la position sur la grille. Cela ne correspond pas à une réalité physique car les ateliers ne se déplacent pas ! Si cet exemple permet de faciliter la conception du système en l'intégrant sur les plates-formes basées sur des terrains/grilles, il n'en reste pas moins que cette représentation n'est pas intuitive.

Dans la littérature, l'approche centrée Objet domine largement les autres approches qui ne sont pas réellement utilisées. Dans ces modèles, les entreprises sont directement représentées par des agents communicants et possèdent toute la latitude nécessaire pour exprimer leurs comportements. C'est en effet la représentation la plus immédiate. Elle est directement compréhensible par le lecteur et elle correspond directement aux organigrammes décrivant des échanges.

S'il n'existe pas d'exemple de représentation de Supply Network centrée sur les fonctions, cette approche semble pourtant intéressante. Quelles fonctions sont utilisées par les agents économiques ? Ils achètent et vendent, produisent et consomment, stockent et transforment. Les agents possèdent aussi les capacités des échanges. Comme nous le verrons plus tard, certaines contraintes pèsent sur les échanges et ne dépendent pas des agents économiques en particulier. Il faut donc introduire une réification de ces

contraintes. L'approche par fonction permet d'introduire un cadre précis d'expressions des contraintes et d'opportunités sur les échanges.

(Ferber 1997) précise que les approches objets et fonctions sont sensiblement antinomiques, mais qu'elles peuvent coexister. Et en effet, elles décrivent des aspects très différents de l'application. Cependant de nombreuses applications mettent en parallèle des approches objets et spatiales. On peut citer [Firman] où la forêt n'est pas représentée par les arbres qui la composent mais par des sous divisions de l'espace alors que les agents réactifs sont bien des agents.

## 2.2 La naissance des groupes

Les modélisateurs cités ci-dessus utilisent des plates-formes utilisant une approche correspondant aux Systèmes Multi-Agents orientés Agent (ACMAS). Par exemples des systèmes comme Swarm (Daniels April 4-6, 2000), Repast ne gèrent pas d'architectures particulières. Le monde dans lequel évoluent les agents Swarm n'est pas structuré. Depuis peu, les systèmes Multi Agents tendent à intégrer des contraintes organisationnelles. Il convient donc de revenir sur les différents concepts qui caractérisent ce paradigme afin de déterminer s'ils sont utiles pour l'implémentation de réseaux d'approvisionnements.

La première formalisation des systèmes OCMAS est décrit de (Ferber, Gutknecht et al.). Le modèle AGR a été présenté comme un modèle informatique orienté Organisation par opposition aux systèmes orientés Agent. Ce travail s'inscrit dans la thématique des systèmes distribués, des services Web et des difficultés conceptuelles qui leurs sont liées. Dans sa thèse (Gutknecht 2004) s'intéresse en particulier à la thématique de l'intégrité fonctionnelle des infrastructures collaboratrices. Il répond de plus aux critiques croissantes qui se font jour sur le modèle orienté objet dont « héritait » à priori les modèles multi agents

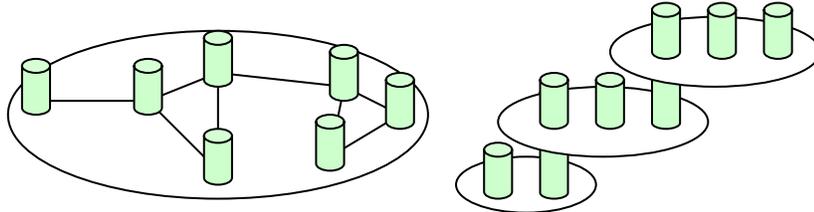
Dans le modèle AGR, les agents sont les entités actives et communicantes, jouant des rôles dans des groupes. Un agent peut jouer plusieurs rôles dans différents groupes. Ainsi les groupes sont des ensembles d'agents interagissant au travers de leurs rôles ou encore un ensemble de rôles réalisés par des agents. La particularité de ces groupes est d'être opaque aux communications, ainsi deux agents ne peuvent communiquer que s'ils font partie du même groupe.

Grâce aux hypothèses AGR, le modélisateur peut relâcher les contraintes portant sur les interactions. En effet, dans les systèmes non organisationnels, les concepteurs sont obligés de prévoir tous les agents auxquels ils adressent un message, le modèle est donc conçu une fois pour toute et est difficilement incrémentable. En AGR tous les agents habilités à recevoir le message pourront le traiter sans que l'expéditeur ait à tenir compte du nombre de récepteur. Ce système permet de faire agir des agents très différents de la même façon dès lors qu'ils partagent les mêmes rôles.

Le regroupement des agents hétérogènes selon des unités ayant une signification fonctionnelle permet une meilleure représentation des systèmes complexes. Le système AGR fournit au modélisateur une présentation logique et intuitive de son modèle. En qualifiant les agents par leurs rôles et par leurs groupes, le modèle gagne une autre dimension. Ainsi la conception AGR peut même être utilisée directement au moment de la conception pour clarifier ses idées.

La possibilité d'implémenter des rôles permet une évolution à long terme. La remise à jour est grandement facilitée. En effet, si un rôle doit évoluer, il suffit de changer une seule partie de code pour que chaque agent l'implémentant évolue.

Le comportement d'un agent comme par exemple sa stratégie peut être codée dans un rôle. Comme les rôles sont des objets qui peuvent être instanciés par les agents, il est possible d'échanger des stratégies dynamiquement.



Le Schéma AGR en introduit une nouvelle dimension de représentation des données

Les groupes mettent en relation des individus intervenant dans une activité commune. La notion de groupe est inhérente aux sociétés et il est naturel de la retrouver très présente dans l'univers de la simulation Multi Agent. Le réseau d'agents réactifs de Sugarscape (Epstein and Axtell 1996) a été étudié comme un réseau de communication. A ce titre le concept de voisinage de Moore est une notion primitive du groupe. Très vite, l'univers de la simulation a eut besoin de plus de dynamique et de nombreux chercheurs ont essayé de proposer différentes alternatives.

L'analyse proposée dans (Muller; Muller 2003; Muller 2004) plus récemment met en lien les sciences de l'informatique et le monde de la simulation en essayant de comprendre les relations entre les schèmes récurrents d'attitudes collectives (appelés organisations) et les schèmes récurrents d'attitudes individuelles (appelés rôles).

Il semble donc intéressant d'utiliser l'approche OCMAS pour concevoir des simulations. Géraldine Abrami (Abrami, Barreteau et al. 2004) utilise une telle approche afin de modéliser des conflits de gestion de l'eau.

## 2.3 Les utilisations des rôles

Selon (Parunak, Savit et al. 1998) les sociétés emploient des schémas d'attitudes [patterns behaviours] auxquels doivent se conformer les agents. Ainsi les comportements de chaque individu sont contraints par les exigences de ces 'moules' Ces notions dont font parties les ontologies sont nécessaires à la construction de sociétés multi agents évoluées.

### **Le double aspect du rôle.**

Le rôle est à la fois un bloc de base de la construction des systèmes sociaux multi agents et un intermédiaire requis aux travers desquels les agents interagissent.

Dans Cormas, par exemple, on définit le concept d'agent situé, d'agent communicant et enfin d'agent situé et communicant. En concevant le rôle comme une

entité indépendante et juxtaposable de l'agent, il est possible de définir uniquement les rôles « Communicant » et « Situé ».

En traitant des exemples de réseaux d'approvisionnement issu du terrain, on remarque que les agents sont très hétérogènes. Une certaine partie de ces hétérogénéités peut être gommée en rendant les agents paramétrables. Cependant tous les agents ne sont pas réductibles et il faut proposer de nombreuses classes. Par contre, de nombreux rôles sont conjoints entre les agents. Par exemple, tel paysan est producteur et vendeur mais son voisin, plus riche, spéculé sur l'évolution du prix du riz, il est producteur, vendeur et acheteur, enfin un voisin qui n'a pas de terre est uniquement acheteur. L'approche AGR avec Madkit, MOCA et Mimosa propose de factoriser les agents en fonction de ces rôles.

En choisissant les rôles de façon pertinente on peut grandement simplifier la mise en place du système(Onn and Tennenholtz 1998).

### **3 Une représentation OCMAS des réseaux d'approvisionnement**

Il s'agit de fournir un formalisme générique permettant de décrire et simuler des Réseaux Logistiques.

Premièrement nous allons utiliser le paradigme **Agent-Groupe-Rôle** afin de décrire la structure de la Supply Chain. Issue du domaine des télécommunications et de l'intelligence artificielle distribuée, le modèle AGR a été principalement utilisé dans des simulations visant à coordonner des agents distribués comme dans le projet Warbot. Or la majeure partie des simulations nécessite une structure sociale, nous pensons donc profiter de cette nouvelle approche pour concevoir une nouvelle formalisation des Supply Networks.

#### **3.1.1 La qualité et l'hétérogénéité dans les réseaux logistiques**

Deuxièmement nous allons nous attacher à fournir un cadre permettant de tenir compte de **l'évolution de la qualité** du produit au cours du temps. En effet, la littérature des supply networks n'exploite pas le thème de la qualité. Ce dernier regroupe de nombreux domaines comme la métrologie, la fiabilité, le management de la qualité, etc. Chaque domaine scientifique, sciences sociales ou techniques, disposent de son propre système d'analyse des filières. Les sciences sociales sont tournées vers les acteurs alors que les sciences techniques étudient les processus et les actions. Par exemple, au sein d'autres thématiques comme le maraîchage ou l'horticulture, l'accent est porté sur certaines étapes de la filière ou la manutention réclame une attention particulière. Mais peu d'études portent sur l'intégration de ces process tout au long de la filière. Cependant, avec l'attention croissante accordée au suivi des produits le long d'une filière, la traçabilité va devenir un thème prépondérant. De plus la qualité d'un produit peut être un facteur de la dynamique de la chaîne. Deux produits de qualités différentes pourront être orientés sur des filières appropriées. Ainsi la qualité d'un produit n'est pas uniquement une conséquence de son usinage mais aussi du chemin suivi. En favorisant certains embranchements la qualité peut être une notion clef de l'évolution de la simulation.

Enfin nous devons permettre à l'utilisateur de gérer une collection d'acteurs **hétérogènes**. De nombreuses publications utilisent des agents dit génériques car ils

réagissent de la même façon quel que soit le produit qu'ils transportent. Ces conceptions s'adaptent bien aux études théoriques comme le jeu de la bière où tous les acteurs sont semblables. Cependant les acteurs du monde de la simulation sont parfois fort dissemblables. Nous verrons que l'utilisation des rôles permet de simplifier grandement la coordination d'agents différents.

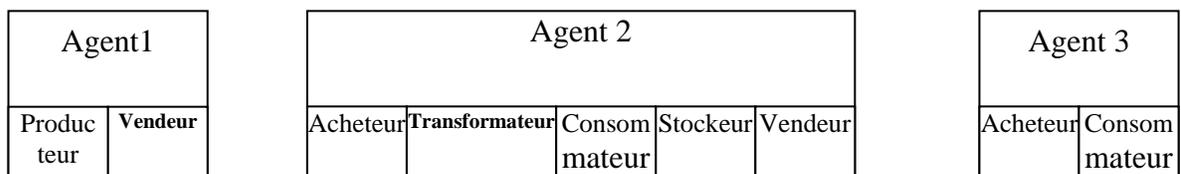
Nous allons considérer le mot généricité dans son sens étymologique « qui à la capacité de donner naissance ». Le système doit permettre de créer une Supply Chain complète. Il doit donc fournir le maximum d'outils et d'ontologies sans être intrusif.

### 3.1.2 Les Decision Making Units, l'approche Objet des supply chains.

Les Supply Chains sont un ensemble d'unités économiques échangeant des informations, des produits et des valeurs. Chaque unité est représentée par des agents cognitifs que l'on regroupe sous le terme de Decision Making Units (DMU).

Les DMU composent la partie « approche objet » du réseau d'approvisionnement. Leurs frontières sont celles du système étudié par la modélisation. Il est important de bien définir ces frontières car elles peuvent se révéler floues. Ainsi dans le modèle présenté plus bas, les agents représentant les paysans ne produisent que le riz KDML105 alors qu'ils produisent aussi du RD6.

Différentes propositions de formalisation des Supply Chains ont été avancées. [Gupta Whitman Agarwal] décomposent une Supply Chain en de nombreuses unités différentes : Les agents recevant les commandes, les agents logistiques, les transporteurs, les planificateurs, les gestionnaires de ressources et le coordinateur. En utilisant une



Exemples de combinaisons de rôles instanciées par les agents

approche ACMAS la distinction entre les agents doit s'effectuer au niveau du code par une paramétrisation lors de l'initialisation.

Certains auteurs proposent une analyse plus fine des agents et les décomposent en un faible nombre de rôles. Ainsi (Flores and Wang 2002) proposent de séparer deux rôles : les vendeurs et les acheteurs, sachant qu'un agent peut être les deux. On voit ici tout l'intérêt d'une démarche AGR. Dans ce genre d'approche, l'agent est un réceptacle dans laquelle viendra se greffer des protocoles et des stratégies. Il nous reste à déterminer judicieusement les rôles. Nous ne nous limiterons pas à deux rôles afin de ne pas trop réduire la sémantique de la plate-forme, cependant nos rôles ne seront pas aussi précis que ceux proposés par Gupta afin de permettre la généricité. Nous proposons six rôles que nous classons dans deux sous-groupes.

- Les rôles portant sur les échanges Ventes et Achats. Ces rôles étant principalement des réifications des ontologies des protocoles d'échanges. Ce sont les briques indispensables
- Les rôles internes aux agents comme la production, la consommation, le stockage et la transformation.

Les agents vont donc instancier ces rôles selon les besoins du modélisateur ou dynamiquement lors de l'exécution. La possibilité d'implémenter ces rôles selon les besoins permet une importante modularité des agents. En adoptant une approche OCMAS, nous avons défini les rôles qui seront implémentés par nos agents.

### 3.1.3 Les Communication Units, l'approche fonctionnelle

Nous nous sommes fixés comme but de fournir un cadre à l'implémentation des protocoles d'échange. Or on remarque que de nombreuses contraintes/opportunités pèsent sur les échanges et ne dépendent pas directement d'un agent particulier. Si on devait coder dans un DMU les contraintes correspondant à cet agent, ce but ne serait pas respecté. On peut distinguer trois cas.

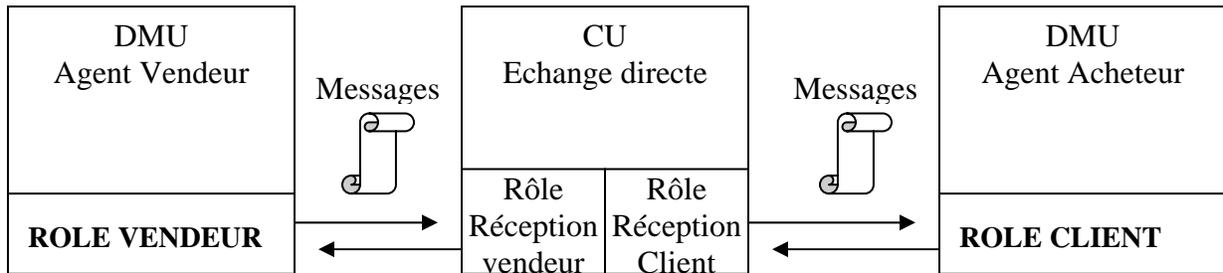
Premièrement, il existe des **contraintes portant sur les agrégats** d'agents. Dans un marché sur une place, les emplacements peuvent être attribués selon divers protocoles. L'ordre d'arrivée le matin, l'ancienneté, un tirage aléatoire, une mise aux enchères sont autant d'exemples de protocoles d'allocation de l'espace dont la décision n'est pas distribuée entre les agents mais nécessite une instance centrale. Le marché a donc bien en son sein un élément qui ne participe pas directement aux échanges en ce sens qu'il n'achète ni ne vend rien il n'est donc pas intégré à la Supply Chain en tant que DMU. Cependant il participe de l'organisation du marché en imposant certaines règles. Ainsi il doit maintenir une cohérence locale, peut être sera-t-il purement réactif ou peut être aura-t-il une mémoire ou même aura-t-il un intérêt propre. Ainsi on ne peut lui supprimer le qualificatif d'agent.

Deuxièmement, il existe des **contraintes pesant sur les échanges**. Les délais dans l'expédition sont un exemple de contraintes qui ne sont pas à proprement parlé interne à un agent. Dans certaines implémentations du jeu de la bière où le délai est de deux tours, l'agent reçoit de suite les commandes et les marchandises mais fait semblant de ne pas les voir avant que le délai soit écoulé. Si ce choix est compréhensible du point de vue de la programmation, il est cependant discutable quant à la représentation des connaissances. En effet, on pourrait de même décider que l'agent expéditeur « oublie » d'envoyer les commandes. Ainsi il n'y a pas unité d'implémentation des processus liés aux échanges. C'est pour cela qu'il faut introduire une autre entité, un esprit du groupe, capable de réifier ces contraintes.

Enfin certaines simulations mettent en scène de nombreux agents impliquant de nombreuses négociations, la complexité peut croître très fortement et des **contraintes algorithmiques** se font sentir. L'exemple de la main invisible dans un marché virtuel est à ce titre particulièrement représentatif. Dans un marché, les vendeurs et les acheteurs sont prêts à échanger des biens si les profits qu'ils retirent sont jugés intéressants. Ainsi un vendeur peut ne pas vouloir vendre si le prix est trop bas, vouloir tout vendre si le prix est élevé ou vendre juste une partie de sa production. De même l'acheteur peut acheter rien, tout ou partie d'une production à un ou plusieurs vendeurs. Ainsi chaque vendeur

peut aller voir chaque acheteur, essayer de marchander et continuer ainsi de suite. Au bout de plusieurs tours de marché un équilibre se fixera. On arrive progressivement à l'établissement d'un prix fixe où l'offre est égale à la demande. L'établissement de ce prix par des agents distribués peut demander énormément de calcul. Par contre si un agent connaît les contraintes de chaque agent il existe alors un algorithme rapide permettant d'obtenir le prix dit « optimal » (Cheng and Wellman 1996) qui assure l'équilibre.

Un autre type de contraintes algorithmiques est celle ayant rapport aux facteurs d'échelle. Dans le modèle de la filière riz, on considère des paysans ayant quelques hectares de surface, des rizeries concentrant le riz d'une partie de province et les négociants exportant dans le monde entier. Comme nous ne pouvons pas instancier 11 millions de paysans, nous nous limitons donc à quelques paysans par village. L'agent correspondant multipliera artificiellement les productions en clonant les propositions. Ainsi du point de vue des agriculteurs comme des rizeries, les comportements n'ont pas



à tenir compte des effets d'échelle.

Ces agents que nous appelons Communications Units sont donc la réification de ces contraintes selon une approche fonctionnelle. Le méta modèle que nous proposons est donc basé sur une double approche orientée Fonction et orienté objet.

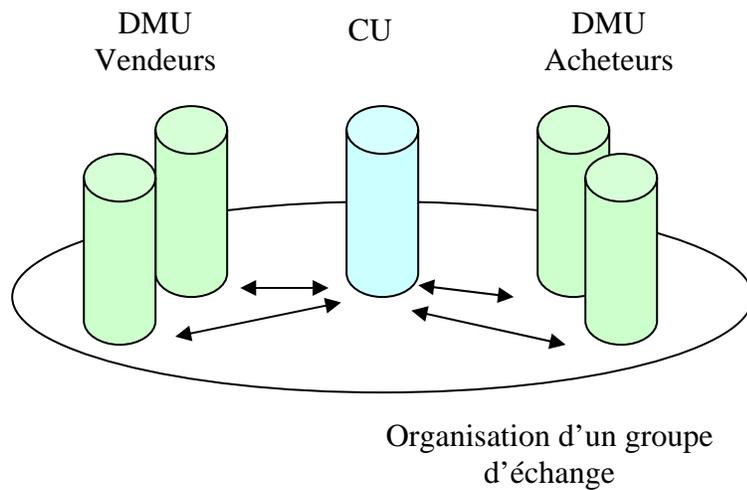
## 3.2 Les groupes d'échange

### 3.2.1 La composition des groupes d'échange

Nous avons les briques de base, il faut maintenant pouvoir les assembler au sein d'une unité fondamentale de la relation d'approvisionnement de l'échange marchand.

Les échanges entre des acheteurs et des vendeurs qui sont des Decision Making Units munis des rôles appropriés et une Communication Unit assurant le transfert des biens, le respect de règles et certains processus algorithmiques. Afin d'assurer la cohésion de ces acteurs, ils sont rassemblés au sein d'une groupe.

Le groupe est régi par les règles introduites dans le CU. Les CUs possèdent des rôles leur permettant d'écouter les propositions faites par les DMUs. De mêmes les DMUs communiquent avec le CUs au travers de rôles.



### 3.2.2 La création des groupes d'échange

La formation des groupes d'échange demande un protocole. Lors de la création d'une CU dans un groupe celle-ci demande aux vendeurs et aux acheteurs de venir la rejoindre. En fonction du protocole spécifique encodé dans cette CU, elle fournit les éléments nécessaires à l'inscription des DMUs par l'intermédiaire de rôles appropriés dans le groupe « Tous ». Ainsi seul les agents habilités à communiquer pourront s'inscrire dans le groupe.

On peut envisager de nombreux protocoles d'échanges. Par exemple, dans les deux exemples proposés un agent crée un CU qui lors de son initialisation crée son groupe et y souscrit comme CU puis envoie dans le groupe « Tous » des messages proposant aux DMUs de se joindre aux échanges.

## 3.3 De la Communication à l'échange commercial

Nous avons donc les briques de base et le schéma permettant la communication, il reste à définir explicitement le protocole de communication entre les différents acteurs. Le travail de [6] montre que la performance d'un marché dépend de la capacité d'assurer la dissémination de l'information entre les agents économiques.

La thématique des Supply Networks est basée (avec pour exemple le jeu de la bière) sur le manque de connaissance qu'un agent a de la situation de ses partenaires. Les croyances sont labiles et l'aspect communication de la Supply Chain est fondamental. Ainsi la majeure partie des solutions envisagées pour résoudre le problème du « bullwhip effect » est basée sur l'ajout d'informations avec les commandes, (ce qui est un peu de la triche). Ainsi au réseau de pure relation commerciale basé sur le graphe AGR s'ajoute le réseau de communication.

### 3.3.1 Les ontologies

Lors d'échanges commerciaux, les acteurs communiquent des informations et des biens. Afin de décrire les interactions entre les acteurs économiques nous allons nous inspirer de la théorie de la communication développée par Shannon et Weaver (1948) .

La communication est alors considérée comme une transmission d'informations qui met en jeu deux protagonistes. L'émetteur qui émet un message et le récepteur qui est le destinataire du message. Selon Harold D.Lasswell, la communication est décomposable en cinq questions fondamentales chacune représentant un aspect du phénomène.

**QUI** est la source de la communication, c'est l'émetteur. Bien que cette notion soit plurielle chez Lasswell, nous nous limiterons dans le cadre de cette étude à un seul émetteur. Le QUI est l'agent à l'origine de la communication. Il doit fournir les indications sur les autres questions.

**À QUI**, c'est le public ou les récepteurs. Le paradigme AGR définit des règles sur les destinataires. Les messages doivent correspondre aux groupes et aux rôles auquel le message est envoyé. L'émetteur doit aussi faire partie de ce groupe.

**AVEC QUEL EFFET** pose la question de l'influence des messages sur les récepteurs. La communication passe par le rôle de l'envoyeur puis par le rôle du récepteur. Les rôles présentés fonctionnent en tandem avec d'autres rôles endossés par d'autres agents. Ils permettent ainsi de réifier les protocoles de communications entre agents. C'est donc les rôles qui vont supporter la majorité des ontologies alors que la réflexion et la coordination des rôles seront laissées aux agents.

**DIT QUOI** est le message. Dans cette étude on considère seulement deux types de communication : Les communications visant à instaurer la structure des échanges (c'est à dire former les groupes) d'une part et les échanges économiques à proprement parler. Ce dernier point regroupe essentiellement des propositions d'échange de matériaux (exclusion des processus bancaires, ...). Il faut donc fournir les ontologies permettant l'expression de ces messages.

**PAR QUEL MOYEN** se réfère ici aux opportunités et aux contraintes imposées par le protocole d'échanges. Les différentes modalités sont réifiées par le CUs. Les us et coutumes, apparaissent à ce niveau. Or les échanges commerciaux sont très protocolaires.

Nous utiliserons la théorie des actes de langage qui séparent les actes locutoires, illocutoires et perlocutoires définies par Austin et Searle (Austin 1975).

Ainsi un message a la forme suivante :

<Expéditeur, Destinataire ([agent], groupe, rôle), message, objet>

Au niveau des rôles les messages sont analysés selon leur composante locutoire puis interprétés selon leur composante illocutoire et perlocutoire.

Le système doit être générique et permet l'instanciation de multiples sortes de Supply Chains. Il ne faut pas non plus oublier que la simulation peut avoir des aspects qui ne sont pas limités aux échanges de biens. Le système doit pouvoir être ouvert de plusieurs façons. D'une part il doit permettre l'utilisation d'agents qui ne sont pas membre du réseau d'approvisionnement proprement dit. D'autre part les membres du réseau d'approvisionnement doivent avoir l'opportunité de réaliser d'autres fonctions au sein de la modélisation.

Enfin la plate-forme doit permettre aux agents membre de la Supply Chain d'avoir d'autres rôles. On voit bien ici tout l'attrait du paradigme AGR qui permet de faciliter le travail des agents par l'accolement de différents modules.

Le terme générique recouvre donc le fait qu'il faille fournir à l'utilisateur des comportements réutilisables entre différents agents et sur différentes simulations. Le comportement d'un agent ou d'un rôle doit donc être facilement compréhensible et le plus général possible. Pour cela il nous faut définir des ontologies et fixer quelques caractéristiques du système. Nous ne nous limiterons pas aux ontologies liées aux échanges au sein de la Supply Chain et nous aborderons aussi les ontologies nécessaires à la manipulation de la Supply Chain.

Il nous faut donc fournir des ontologies de plusieurs types :

Les négociations prennent des formes très différentes selon le type de marché suivi. Le protocole (fixé en un rituel) d'un marché à la criée n'est pas celui d'une vente aux enchères. Les unités de communication correspondant aux protocoles d'échange doivent être fixées. Ces derniers sont codés dans des rôles permettant les entrées-sorties aux niveaux des agents. Ils échangent des produits circulant par les canaux.

Les réseaux d'approvisionnement sont dynamiques, les agents peuvent souscrire ou quitter un groupe d'échange nous devons donc aussi concevoir des ontologies liées aux déplacements des agents dans les marchés.

### **3.3.2 Les messages relatifs aux échanges commerciaux**

Tout au long de l'exécution de la simulation les agents échangent des informations comme par exemple l'ouverture d'un marché, une proposition d'échange. Ils instaurent un environnement propice aux discussions. Ils proposent et négocient des prix de leurs marchandises. Enfin informent le système de leur état.

Un message est envoyé d'un agent (l'expéditeur) à d'autres agents (les destinataires). Le message est envoyé au sein d'un ensemble d'agents prédéfini dont fait partie l'expéditeur (le groupe). Un message peut aussi être adressé à un agent particulier.

Afin de permettre des envois à tous les agents, un groupe « Tous » regroupe tous les agents de la simulation. De plus chaque agent souscrivant à un groupe endosse automatiquement le rôle « Membre ».

Si la plupart des communications sont encapsulé dans les rôles, il reste au modélisateur à définir deux types de messages.

#### **3.3.2.1 Le message marchandise**

Les agents vont bien entendu échanger des produits. On cherche un moyen d'empaqueter ces communications au sein d'un objet générique appelé marchandise. Il regroupe les informations nécessaires à la transaction : l'expéditeur, le nom du produit, le prix, la quantité ainsi qu'un pointeur vers l'objet. Selon le cas certains paramètres seront optionnels.

#### **3.3.2.2 Le message Order**

Pour simplifier la sémantique nous avons rajouté un message Order qui possède exactement les mêmes attributs que les messages marchandises. Il permet de demander un article particulier. En séparant clairement ces deux classes, il est plus aisé de ne pas faire d'erreur au moment de l'implémentation. Il représente cependant un acte de langage au caractère illocutoire performatif très marqué.

### 3.3.3 Les messages relatifs aux relations entre agents

Les agents d'un réseau d'approvisionnement sont des agents éminemment communicants qui créent des relations commerciales ou les rompent. Le réseau d'approvisionnement doit donc être dynamique, c'est à dire que le réseau de relation doit pouvoir évoluer en fonction des différents acteurs (interne à la Supply Chain ou non). De plus les marchés doivent pouvoir être modifiés par d'autres agents au travers de rôles et de protocoles d'échange.

### 3.4 Les agents permettant la visualisation

Des outils de visualisation performant sont nécessaires à une plate-forme de modélisation. Dans le cadre de notre travail il semble important de fournir des outils permettant la visualisation des relations entre agents.

#### 3.4.1 L'algorithme de visualisation du système AGR.

La représentation d'un système AGR pose cependant quelques problèmes. Ferber introduit la représentation en « plateau à fromage » ou « cheeseboard ». Les schémas sont construits ainsi : les plateaux représentent les groupes alors que les agents sont représentés par des tiges traversant les plateaux indiquant ainsi qu'ils en font partie. Des étiquettes précisent quels rôles les agents jouent dans le système. Cette représentation est très pratique pour enseigner le concept AGR, cependant elle n'est pas applicable dans tous les cas. Dans le cadre de simulations de problème impliquant de nombreux acteurs hétérogènes jouant plusieurs rôles dans différents groupes, la représentation AGR devient rapidement complexe. En effet, certains systèmes ne peuvent être représentés sans enfreindre quelques lois (agents tordus, groupes évitant certains agents).

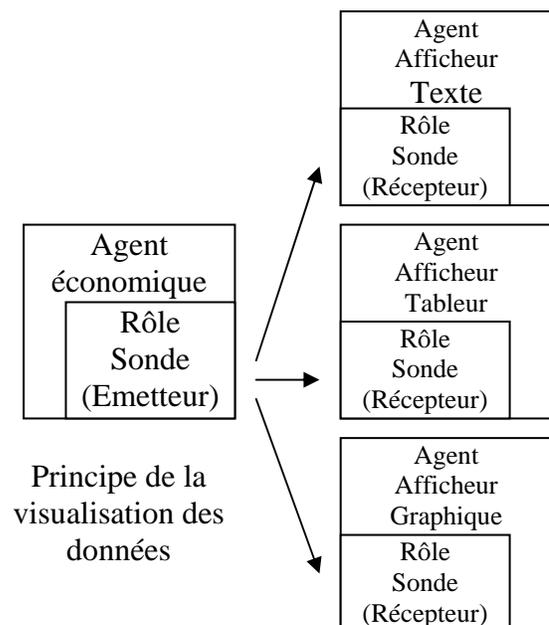
On préfère donc l'approche swimlane proposée par (Parunak and Odell 2003) basée sur UML. Un diagramme swimlane est un tableau dans lequel on associe les colonnes aux groupes, les lignes aux acteurs, les rôles étant énumérés aux intersections. Avec Géraldine Abrami (Abrami, Barreteau et al. 2004) nous reprendrons la visualisation AGR sous forme de swimlane [reference].

#### 3.4.2 La visualisation des résultats

La visualisation est assurée par d'autres agents présents dans le système mais ne faisant pas partie du réseau d'approvisionnement. L'agent sondé endosse un rôle et le code qui va avec et envoie un message au rôle correspondant endossé par l'agent sondeur.

Nous nous trouvons donc dans le cas d'une communication MVC (Model View Controler) où le rôle du contrôleur est joué implicitement par l'environnement.

On peut ainsi facilement écrire des rôles envoyant les données sous une forme précise.



Les informations sont récupérées par un ou plusieurs agents correspondants. S'il faut présenter les résultats sous une autre forme il suffira d'écrire un autre agent ayant le même rôle dans le même groupe pour qu'il soit à même de recevoir les informations sans n'avoir rien à changer dans le code de l'émetteur. De même tout agent de visualisation peut être supprimé sans déstabiliser le système.

## 4 Deux exemples de réseaux d'approvisionnement

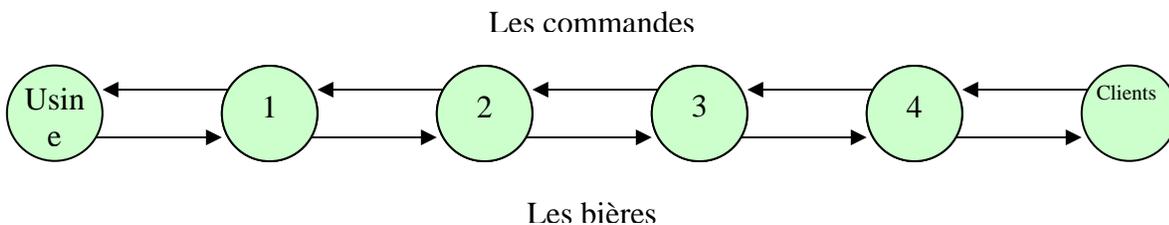
Afin de valider l'approche nous avons implémenté deux exemples. En premier lieu nous présenterons le jeu de la bière qui est l'exemple classique de Supply Chain théorique, le second est basé sur l'étude de la filière Riz en Thaïlande.

### 4.1 Une filière théorique : le jeu de la bière (Beer Game)

Le jeu de la bière a été inventé au MIT au cours des années soixantes. Il simule de façon simple les échanges logistiques d'une chaîne d'approvisionnement. Malgré la simplicité des mécanismes et la faible variation des commandes, les comportements des différents acteurs deviennent très complexes. L'amplification de la variabilité des commandes que l'on observe au cours de ce jeu se nomme le « bullwhip effect ». Ce phénomène provoque des variations d'inventaire très fortes et cause de nombreux problèmes financiers dus aux manipulations, aux retards dans les livraisons ou aux stockages trop importants.

#### 4.1.1 Règles du jeu

Le jeu de la bière se joue avec 4 agents qui sont chacun les fournisseurs et les clients d'un autre. A chaque tour de jeu, les participants reçoivent les articles envoyés par leurs fournisseurs et les commandes par leur client. En réponse, ils essayent de répondre à leur client, et commande des bières à leurs fournisseurs et essayent d'y répondre en fonction de leur stock. Ils peuvent aussi commander des bières à leurs fournisseurs. Les commandes et les envois de bières nécessitent deux tours de jeu pour arriver à leur destinataire.



On ajoute deux autres agents qui simulent l'usine produisant les bières et le client qui commande des packs de bière. Ces deux agents n'ont pas réellement d'autonomie de décision, l'usine produisant et expédiant exactement ce qu'on lui commande et le client pouvant être assimilé à un signal d'entrée.

Le score est calculé de la façon suivante : 1 point pour chaque bière dans le stock et 2 point pour chaque bière commandée mais non envoyée. On évalue ainsi les deux critères suivants : taille minimale du stock et satisfaction de la demande.

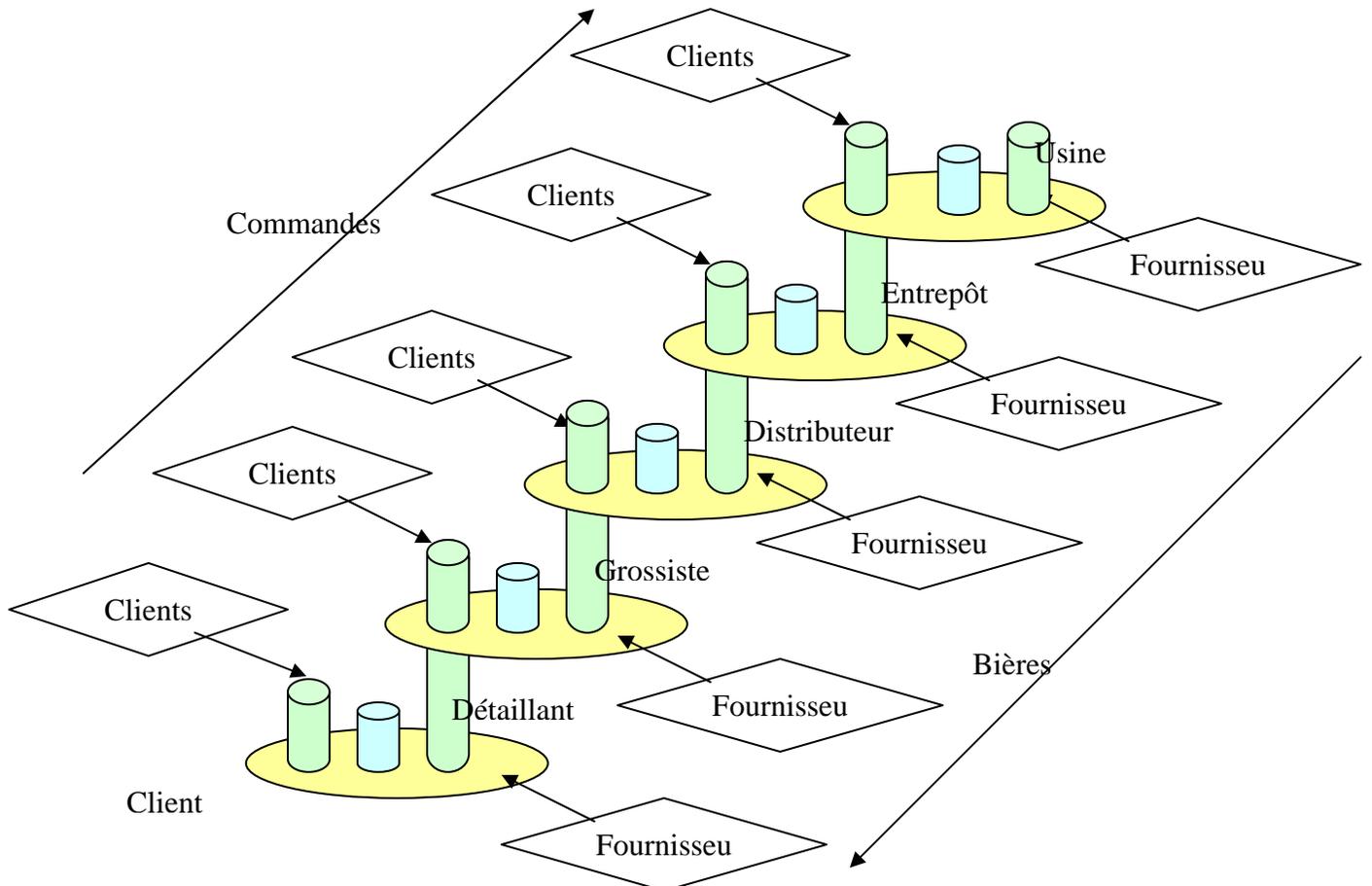
### 4.1.2 Analyse Agent-Groupe-Rôle du jeu de la bière

L'analyse de ce jeu est évidente, les différentes entreprises seront représentées par les DMUs. Ils endossent deux rôles : client et fournisseur. L'usine et le client échappent à cette règle sont respectivement uniquement fournisseur et client. Le rôle de client consiste à commander en utilisant directement message Order (sans sous classe) et à recevoir les bières (directements le message Marchandise). Le rôle de fournisseur est directement parallèle et consiste à recevoir les messages Order et à renvoyer des messages Marchandises (« biere »). Ces deux rôles sont coordonnés au niveau de l'agent qui décide combien de bière il doit commander.

Les CUs ont pour fonction d'assurer le délai physique des transports des commandes et des marchandises.

### 4.1.3 Conclusion

Le jeu de la bière est un exemple caractéristique de chaîne d'approvisionnement issue du monde de l'analyse théorique. Premièrement, la chaîne est composée de peu d'unités. Très courte elle met en évidence l'émergence ( faible ) de phénomènes d'amplification au long de la chaîne. Seulement quatre acteurs sont des agents et ont une véritable liberté de décision, car l'usine et le client sont purement réactifs. Deuxièmement la structure est très simple, la chaîne est linéaire sans ramification ni cycle. Le réseau



		Groupe				
		Echange 1	Echange 2	Echange 3	Echange 4	Echange 5
Agent	Usine	Fournisseur				
	Entrepot	Client	Fournisseur			
	Distributeur		Client	Fournisseur		
	Grossiste			Client	Fournisseur	
	Epicerie				Client	Fournisseur
	Client					Client

Graphique SwimLane du jeu de la bière

d'échange est donc fixé en accord avec la définition stricte des supply chains. Troisièmement les modalités d'échanges sont peu nombreuses. En l'occurrence une seule modalités ayant pour rôle de transmettre sans bruit mais avec un délai les commandes et les marchandises. De même il existe un seul produit qui n'évolue pas au cours du temps.

En consequence les agents sont tous semblables et se pretent bien à une simulation. On peut objecter qu'il serait plus facile d'utiliser un environnement classique ou même Agents non organisationnels. La formalisation en DMUs et Cus permet cependant de bien séparer l'agents en tant qu'entreprise et les caractéristiques des échanges

## 4.2 Un réseau d'approvisionnement expérimental de l'approvisionnement en riz

Le modèle décrit la filière d'approvisionnement du riz aromatique dans le nord-est thaïlande. Il est basé sur un document fourni par le ministère thaïlandais de l'agriculture qui décrit la filière en partant des paysans et finissant aux consommateurs locaux ou aux pays importateurs. L'étude est menée en gardant en tête deux mots clefs : l'**hétérogénéité** de la population notamment des paysans et des riziers et le suivie de la **qualité** du riz au long de la filière.

Les paysans sont les producteurs de riz. Ils cultive prioritairement du riz glutineux pour leur consommation personnelle. Le riz aromatique est produit en plus pour assurer un revenu. Le grain brute est dit « paddy ». Il possède encore son péricarpe et son germe et il doit être usiné chez un rizier.

Une première source d'hétérogénéité sera la manière de vendre son riz. Ainsi le comportement d'une unité familiale sera différent selon la quantité de riz produite. Un paysan qui ne produit pas assez pour remplir un camion, préférera vendre dès que possible son riz au premier acheteur ou même à un autre paysan. En effet, moins une famille produit de riz, moins elle aura intérêt à chercher le meilleur prix car la différence de revenu sera faible. Un paysan produisant assez de riz pour remplir un camion sera considéré comme plus riche et aura l'opportunité de spéculer sur les fluctuations du prix du riz au cours de l'année.

La production est vendue directement ou indirectement aux rizeries qui le décortiquent, le blanchissent par abrasion et lui donnent sa forme commercialisable. Ensuite le riz blanc est vendu au travers d'intermédiaires pour la consommation locale ou

l'exportation. Récemment on observe un développement des filières courtes ainsi le riz peut être directement vendu par les riziers aux exportateurs (13 %).

## 4.2.1 Analyse en AGR

### 4.2.1.1 Les rôles

La représentation du système sous la forme AGR à l'aide des plateaux à fromages (cheeseboard) est très complexe. En effet il existe de nombreux acteurs présentant des combinaisons de rôles différentes.

**Production :** Tous les paysans produisent du riz même s'ils ne le vendent pas de la même manière. La principale source d'hétérogénéité est la variété produite ;

Les variétés produites sont le KDML105 et/ou RD15. Le riz KDML105 est le plus planté (85%) il est récolté fin novembre et décembre. Il n'est moins sujet aux pluies et donc aux moisissures. Cependant certains paysans possédant des hautes terres préféreront planter du riz RD15. Cette variété est plus précoce (récolte octobre, novembre) et est donc mise sur le marché quand le marché n'est pas saturé et est donc vendu plus cher. Mais cette culture est plus risquée car le grain risque d'être récolté après une pluie augmentant le taux d'humidité et le risque de moisissures.

**Transformation :** Seul les usines transforment le riz paddy en riz blanc. Il existe deux types de rizerie selon qu'elles sont privées ou issues de coopératives. Les rizeries privées ont une capacité plus importante et un matériel de meilleure qualité qui permet un meilleur usinage que les rizeries de coopératives.

**Consommation :** les consommateurs et les exportateurs consomment le riz.

Les **achats** et les **ventes**.

Premièrement nous distinguerons les échanges en trois catégories. La vente du riz à partir du paysan nécessite un protocole particulier tandis que les autres échanges sont plus simples et se différencient seulement selon qu'ils portent sur le riz paddy ou blanc.

Le prix d'un sac de riz est défini par l'acheteur en fonction des divers malus correspondant à l'état du sac (pureté, humidité, brisure). De plus le vendeur sait à peu près quel prix sera fixé par l'acheteur. La vente se fait toujours sur l'initiative du paysan et la transaction est toujours acceptée au prix de l'acheteur qui reste assez proche du prix du marché. Comme dit plus haut le riz est inséré dans la chaîne sans commande particulière. Le marché est donc poussé par la production.

Les paysans vendent leur riz selon des modalités différentes et à des acteurs différents. Certains paysans profiteront de la proximité d'une rizerie pour apporter directement leur riz. Les autres devront passer par des intermédiaires. D'autres, membres d'une coopérative seront tenus (en première approximation !) de fournir l'institution dans dont ils font partie. Il existe des intermédiaires pouvant collecter le riz et l'acheminer aux riziers. Enfin il est possible qu'un paysan soit aussi un collecteur.

## 4.2.2 Les ontologies nécessaires aux modèles

### 4.2.2.1 De la qualité des sacs de riz.

Le critère de pureté qui s'applique autant au riz paddy qu'au riz blanc est le facteur principal qui décidera de l'orientation du riz dans la chaîne ainsi que de son prix.

Le prix du riz paddy et du riz blanc n'est pas estimé en fonction des mêmes paramètres, c'est pourquoi on distingue deux classes d'objets : Le riz paddy (avant usinage) doit être sec afin de ne pas moisir. Le riz blanc (après usinage) doit présenter un faible taux de brisure qui traduira la qualité de l'usinage.

Représentation UML des objets échangés

Sac de riz Paddy	Sac de riz Blanc
Quantité Pureté Humidité	Quantité Pureté Pourcentage de brisure

L'exemple de la filière riz montre clairement qu'il n'est pas possible de représenter une Supply Chain composée de trop d'agents hétérogènes. La multiplication des groupes et le nombre de combinaisons rends bien souvent impossible une telle schématisation.

### 4.2.3 L'agencement des agents, des rôles et des groupes

Les opportunités économiques des paysans varient en fonctions de la quantité de riz produite. Certains paysans possédant assez de terre pourront subvenir à leurs besoins et spéculer sur le prix du riz. Une même classe d'agents peut donc endosser plusieurs rôles. Donc un paysan possède plusieurs rôles : producteur, vendeur et potentiellement acheteur de riz.

## 5 Critiques et ouverture

### 5.1 Critique de l'utilisation du paradigme Agent Groupe Rôle pour la simulation

Notre étude porte sur la conception d'une plateforme générique de Supply Network dans le cadre AGR. Il nous semble important de revenir sur l'utilisation de ce paradigme dans le domaine de la simulation d'organisation issue du monde réel.

L'utilisation du concept AGR a été principalement dans le milieu des systèmes distribués et des communications. Mais apporte t il quelque chose au monde de la simulation ?

#### 5.1.1 Un bon cadre de modélisation.

Afin de concevoir un modèle quel qu'il soit, il est primordial de bien analyser le problème que l'on va étudier et en premier lieu de fournir le cadre d'étude. Dans un

modèle linéaire on doit définir précisément les limites du système. Dans un système orienté Agent, il faut en plus définir les bornes entre les différentes entités afin de leur donner une autonomie individuelle. Dans un système organisationnel, il faut préciser en plus de nombreuses frontières internes. Le modélisateur doit définir précisément les groupes. Selon le choix du modélisateur un ensemble de groupes représentera des ensembles sociaux définissant des hiérarchies, séparera différentes localités et les regroupera en région ou comme dans notre étude en catégories d'acteurs. La seconde frontière est celle qui sépare les rôles verticaux ou horizontaux. En définissant précisément les limites du système dans une architecture précise le modélisateur est obligé de fournir une représentation rigoureuse de son modèle.

### **5.1.2 Une bonne intelligibilité des modèles (ce qui se conçoit bien s'énonce clairement)**

Ainsi le premier avantage de l'analyse AGR est d'offrir une représentation concrète, simplifiée et hiérarchisée de la réalité. Cette représentation est souvent très naturelle et intuitive car elle est basée sur une approche orientée Agent réputée anthropomorphique. Il est très facile de s'identifier à un agent et cet atout est particulièrement utile lors des modélisations d'accompagnement. Ainsi la formulation AGR d'un modèle permet de communiquer facilement le modèle. Dans bien des cas, il suffira de montrer un schéma organisationnel muni des rôles pour comprendre dans sa globalité un modèle. Au final, cette approche se révèle être un moyen privilégié de dialogue entre la société et la recherche.

La plupart des simulations utilisent les représentations UML ou un réseaux de relations fournissant une représentation à deux dimensions du modèle. Le modèle est aplani et perd une profondeur explicative. Au contraire une représentation AGR hiérarchise les composants et par l'intermédiaire des rôles explique clairement les interactions entre chaque acteur.

### **5.1.3 Une programmation simplifiée**

Dans l'optique d'une implémentation, l'approche AGR permet facilement d'envoyer des messages sans connaître nominativement l'ensemble des récepteurs. De plus en terme de programmation, l'envoi des messages peut se faire à des instanciations de classe qui n'existaient pas lors de la conception de la classe expéditrice.

Le paradigme Agent, Groupe, Rôle permet de grandement faciliter l'implémentation du système modélisée. Grâce aux différentes plates-formes multi-agents gérant ce paradigme, l'analyse AGR offre un appui à la programmation. Elle sépare clairement les différents rôles joués par les acteurs dans chaque groupe. Ainsi il est facile de concevoir les différentes parties de l'agent de façon autonome. La conception du système est grandement améliorée. La mise à jour des composants (rôles et agents) est grandement facilitée.

Durant les différentes phases de réalisations du modèles : conception, implémentation et évolutions, l'approche AGR joue un grand rôle en facilitant chaque étape. Même si l'expérience (séminaire à Bangkok) montre que cet outils n'est pas évident au premier abord, il montre une grande puissance formalisatrice.

## **5.2 L'utilisation conjointe des approches Fonctionnelles et Objets.**

L'utilisation de ces deux approches opposées permet de séparer clairement les différents aspects des agents économiques. L'approche Agent exprime clairement les différents acteurs de la Supply Chain. Parallèlement la partie fonctionnelle permet de coder les contraintes pesant sur les échanges et sur les agrégats d'agents. Elle permet aussi de coder les algorithmiques ad hoc permettant de simuler différents effets issus de la thématique des systèmes linéaires.

La notion d'approche fonctionnelle est elle même ambiguë à cause du double sens de ce mot. Ainsi fonction peut signifier une application qui transforme une entrée en sortie tandis qu'une fonction peut être l'expression d'un rôle.

Plusieurs agents ne possédant pas les mêmes attitudes devront respecter les contraintes imposées par les Cus. Cela se traduit dans la réalité, par la possibilité de modéliser différents agents et de les faire échangés des produits selon les mêmes protocoles.

Dans les exemples proposées les échanges se font principalement deux à deux. Les CUs peuvent représenter de vrais structures de marchés comme un environnement avec un prix fixe garanti par l'états ou un système de taxe par exemple.

## **5.3 Vers une exploration de la gestion des réseaux d'approvisionnement**

Chaque thématique importante possède un exemple classique décrivant de façon simple et minimalistes les phénomènes caractéristiques. Le domaine des Supply Chains est présenté par l'exemple du jeu de la bière, les automates cellulaires par le jeu de la vie et Sugarscape constitue une bonne introduction aux les agents réactifs. Un outil théorique permettant l'étude rigoureuse des possibilités offertes par les Supply Network manque à ce jour.

On propose l'étude d'un nouveau jeu de la bière en réseau. Il n'y aurait qu'une usine mais plusieurs entrepôts et des distributeurs, des grossistes, des marchands et des clients en quantités croissantes au cours de la chaîne. Les agents ont chaque tour deux décisions à prendre. Comme dans le jeu de la bière classique, les agents doivent choisir la quantité de produit qu'ils commandent, mais en plus ils peuvent changer de fournisseurs. Le décompte des points est effectuée de la même façon que dans le jeu de la bière.

De même que Sugarscape, ce jeu laisse place à de nombreuses variantes. Quelles seraient les stratégies gagnantes ? Il est probable que ce genre de jeu introduirait de nouveaux effets similaires au « bullwhip effect » comme par exemple un effet « aimant » dans lequel un élément intermédiaire prendrait un monopole. Une étude selon la théorie des jeux mettrait peut être en évidence des équilibres et des stratégies gagnantes mais dans un environnement si mobile, l'équilibre serait peut être instable. L'utilisation des rôles comme moyen de coder des stratégies permettrait aux agents d'échanger leurs tactiques. Y aurait il un équilibre stable dans une tel configuration ? Pourrait on ainsi d'obtenir progressivement une amélioration de la Supply Chain ?

## Bibliographie

- Abrami, G., O. Barreteau, et al. (2004). "Organisation centered agent based modelling : an irrigation management toy model example." (Submitted to Elsevier Science).
- Arunachalam, R., M. Sadeh, et al. (2003). "The Trading Agent Competition Supply Chain Management Game." IsRi Technical Report.
- Austin, L. (1975). How to Do Things with Words. Cambridge,, Mass: Harvard University Press.
- Benner (2001). "Simulating the evolution of localized industrial cluster - an identification of the basic mechanisms." Journal of Artificial Societies ans Social Simulation 4(3).
- Bousquet, F. and C. L. Page (2004). "Multi-agents simulations and ecosystem management: a review." Ecological Modelling 176(3-4): 313-332.
- Cheng and Wellman (1996).
- Daniels, M. (April 4-6, 2000). "An open framework for agent-based modeling (SWARM)."
- Davidson, P. and F. Wernstedl (2003). A framework for evaluation of multi-agent system approaches to logistics network management.
- Epstein, J. M. and R. L. Axtell (1996). Growing Artificial Societies Social Science From the Bottom Up.
- Ferber, J. (1997). "Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective."
- Ferber, J., O. Gutknecht, et al. "Organization Requierments Specification for Multi Agent Systems."
- Fioretti, G. (2001). "Information Structure and Behaviour of a Textile Industrial District." Journal of Artificial Societies ans Social Simulation 4(4).
- Flores, R. G. and X. Z. Wang (2002). A multi agent system for chemical chain simulation ans managment support. OR Spectrum. Leeds, UK. 24: 343-370.
- Forno, A. D. and U. Merlone (2002). "A multi-agent platform for modelling perfectly rational and bounded-rational agents in Organizations." Journal of Artificial Societies ans Social Simulation 5(2): 3.
- Galtier, F., F. Bousquet, et al. (2002). "Markets as communications systems." Systemes Agro Alimentaireezs Localisés (SYAL).
- Griffon, M. (1989). Introduction de la conférence "Economie des filières en région chaude". 10 e seminaire Economie et Sociologie.
- Gupta, A., L. Whitman, et al. (2001). Supply chain Agent Decision Aid System (SCADAS). Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, and M.W. Rohrer,eds.
- Gutknecht, O. (2004). Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi agent et examan de ses conséquence formelles, implémentatioires et méthodologiques.

Academie de Montpellier. Montpllellier, Université Montpllellier II science et techniques du Languedoc: 200.

Moyaux, T., B. Chaib-draa, et al. (2003). Agent-Based Simulation of the amplification of demande variability in a supply chain. 4th workshop on Agent-Based Simulation, J-P Muller, M-M Seidel.

Muller, J. P. "the MOCA plateform."

Muller, J. P. (2003). "The Mimosa generic Modelling and Simulation platform : the case of Multi Agents systems."

Muller, J. P. (2004). "MIMOSA representation des connaissances et simulation."

Onn, S. and M. Tennenholtz (1998). "Determination of Social laws for multi agent Mobilization."

Parunak, H. V. D. and J. J. Odell (2003). "Representing Social Structures in UML."

Parunak, H. V. D., R. Savit, et al. (1998). Agent-based Modelings vs. Equation-Based Modeling : A case Study and User's Guide. Proceedings af Multi-agent systems and Agent-based Simulation (MABS 98), Springer.

Pathak, S. D., G. Nordstrom, et al. (1998). "Modelling of Supply Chain : a multi agent approach."

Staatz, J. "Subsector analysis and vertical coordination."

Steeb, R., C. S., et al. (1988). "Achritectures for Distributed Air Traffic Control". Readings in distributed Artificial Intelligence.

Vriend, N. J. (1994). "A new perspective on Decentralised Trade." Economie Appliquée XLVI(5): 5-22.