

## MODELISATION MULTI-AGENTS POUR LA SIMULATION DE CHAINES LOGISTIQUES DE TYPE PERSONNALISATION DE MASSE

O. LABARTHE<sup>1,2</sup>, B. MONTREUIL<sup>1</sup>, A. FERRARINI<sup>2</sup> et B. ESPINASSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CENTOR - CENTre de recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau,  
Chaire de recherche du Canada en ingénierie d'entreprises,  
Université Laval, Pavillon Palasis Prince,  
G1K 7P4, Québec, Qc - Canada  
[Benoit.Montreuil@centor.ulaval.ca](mailto:Benoit.Montreuil@centor.ulaval.ca)

<sup>2</sup> LSIS UMR-CNRS 6168 – Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes  
Université Aix-Marseille III, Faculté St Jérôme,  
13397, Marseille Cedex 20 - France  
[Olivier.Labarthe, Alain.Ferrarini, Bernard.Espinasse@lisis.org](mailto:Olivier.Labarthe, Alain.Ferrarini, Bernard.Espinasse@lisis.org)

**RÉSUMÉ :** *Notre recherche présente une démarche de modélisation multi-agents pour la simulation de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse. L'objectif est de permettre l'analyse du comportement global de la chaîne logistique et du comportement local des acteurs qui la composent. Dans une première partie nous montrons comment les systèmes multi-agents sont utilisés pour la modélisation de chaînes logistiques. Une deuxième partie présente une démarche de modélisation pour la représentation de chaînes logistiques s'inscrivant dans un cadre général et permettant plus particulièrement d'appréhender son comportement dans un contexte de personnalisation de masse. Cette démarche de modélisation autorise une représentation selon différents points de vue organisationnels et s'appuie sur la description des comportements de chaque acteur inscrit au sein du réseau, et ce, selon différents niveaux décisionnels. Enfin, une dernière partie présente le modèle et les comportements résultants simulés d'un des acteurs clefs de la chaîne logistique dans le cadre de la personnalisation de masse : les consommateurs.*

**MOTS-CLÉS :** *Chaînes Logistiques, Personnalisation de Masse, Systèmes Multi-Agents, Simulation Orientée Agents*

### 1. INTRODUCTION

La mondialisation se traduit par un contexte économique de plus en plus concurrentiel pour les entreprises industrielles. Ces nouvelles réalités économiques font que la satisfaction du client est devenue le point central de la stratégie des entreprises. La conjoncture actuelle rend difficile le maintien et la conquête de parts de marchés pour les entreprises. La solution qui s'impose passe par leur intégration dans un réseau d'entreprises collaborateur qu'est la chaîne logistique.

La conception et le pilotage de la chaîne logistique s'orientent vers les exigences clients qui sont devenues plus volatiles. Cette nouvelle donne conduit à une structure de chaîne définie par les segments produits/marchés et à des modes de pilotage *tirés par la demande*. Ces deux facteurs déterminants conduisent à une offre basée sur la personnalisation des produits satisfaisant les exigences des consommateurs. La personnalisation de masse implique un ajustement des systèmes manufacturiers composant la chaîne en termes d'opérations, de processus et d'interactions. Cet

ajustement doit permettre aux acteurs impliqués au sein de la chaîne de développer des capacités de flexibilité et de réactivité face à la dynamique de leur environnement. Leurs stratégies d'affectation de ressources et de gestion des flux s'orientent alors vers une offre de produits hautement paramétrables, et ce, dans des délais de plus en plus courts. La demande oblige les acteurs à adapter leurs offres, influant ainsi sur la configuration du réseau logistique. Les acteurs se situent dans un cadre de relations-clients multiples (*Make To Stock, Make To Order, ...*) définissant ainsi la structure du réseau.

Afin d'évaluer le fonctionnement et les performances des chaînes logistiques les acteurs doivent disposer d'outils leur permettant d'analyser leurs comportements. L'un de ces outils est un système d'aide à la décision par simulation de la chaîne logistique. La simulation est une représentation abstraite de la réalité qui passe par la création d'un modèle. Ce modèle doit réagir de manière similaire au comportement du système réel, suivant un ensemble d'hypothèses traduites sous forme de scénarii. Les propriétés qui caractérisent les systèmes multi-agents, pour la modélisation de systèmes socio-

techniques, apparaissent adaptés pour l'étude et la représentation comportementale des entités qui constituent la chaîne logistique, entités soumises à la nature dynamique des interactions. Ce choix de modélisation nous conduit à proposer une démarche pour la représentation de chaînes logistiques s'inscrivant dans un cadre général, et permettant plus particulièrement d'appréhender son comportement dans un contexte de personnalisation de masse.

La deuxième section présente différentes approches de modélisation multi-agents de chaînes logistiques. La troisième section décrit notre démarche de modélisation multi-agents. La quatrième section présente le cas industriel. La cinquième section introduit le modèle conceptuel correspondant. La sixième section présente le comportement des consommateurs dans le modèle de simulation multi-agents. Enfin nous concluons sur les perspectives associées à nos travaux de recherche.

## 2. MODELISATION ET SIMULATION DE CHAINES LOGISTIQUES

### 2.1. Approches de modélisation

Trois grandes approches de modélisation sont définies dans [15] : (i) l'approche *Théorie du Contrôle*, (ii) l'approche *Recherche Opérationnelle*, et, (iii) l'approche *Simulation-Emulation*. La première approche qui repose sur des équations différentielles, ou aux différences, ne s'avère pas satisfaisante pour représenter la majorité des chaînes logistiques en raison de leurs comportements non linéaires. La deuxième approche, qui repose sur des théories d'optimisation, la théorie des jeux et l'analyse statistique, ne permet pas de représenter l'ensemble des caractéristiques dynamiques du comportement des chaînes logistiques (approximations statistiques et non prise en compte de l'échelle temporelle). La dernière approche, soit celle de simulation-émulation, repose sur l'expérimentation à partir de modèles exécutables et débouche sur une observation du comportement de la chaîne logistique dans le temps. Cette approche permet une étude plus réaliste en termes de modélisation et d'analyses comportementales de la chaîne logistique.

Parunak et al. [15] distinguent deux grands types de modèles de *Simulation-Emulation* : (i) les modèles à base d'équations, et, (ii) les modèles à base d'agents. Les premiers expriment les relations entre les *observables* (caractéristiques quantifiables définissant les individus)<sup>o</sup>; leurs exécutions consistent en une évaluation de ces équations faisant évoluer ces observables. Les seconds sont composés d'individus (*agents*), encapsulant le comportement d'éléments du système et dont l'exécution revient à simuler ces comportements en terme d'observables accessibles par les agents. Ces derniers modèles apparaissent mieux adaptés à une modélisation plus proche de la structure des chaînes logistiques et à l'étude de leurs comportements.

### 2.2. L'approche multi-agents

La modélisation multi-agents de chaînes logistiques permet la représentation des comportements des entités au sein du système ainsi que les interactions existantes. Les chaînes logistiques sont caractérisées par la décentralisation de la prise de décisions. Les propriétés d'autonomie, de pro-activité, de réactivité et de sociabilité caractérisant les agents font que l'approche de modélisation s'appuyant sur le paradigme agent s'adapte particulièrement bien à ce type de problème [14].

Le domaine de l'étude, les objectifs du ou des utilisateurs du système d'aide à la décision et le niveau d'abstraction influent sur le travail du modélisateur dans la conception de l'organisation multi-agents traduisant celle de la chaîne logistique. Cette traduction n'est pas systématiquement isomorphe comme dans [8] et [20] où chaque site manufacturier est représenté par un agent. Le projet *DASCh* [1] s'appuie sur deux agents par entreprise, le projet *MASCOT* [17] sur trois agents par entreprise et les travaux de [21] définissent un agent *Entreprise* lui-même structuré selon quatre sous-agents. Le projet *ANTS* [18] et les travaux de [4] se positionnent à un niveau d'abstraction qui associe un agent par ressource manufacturière. Le niveau de détail, c'est-à-dire le niveau de décomposition des entités pour la représentation de la chaîne logistique est guidé par le niveau d'abstraction du modèle.

En fonction du modèle, un agent possède des comportements, des capacités de communication et de prise de décisions qui s'étendent de la gestion d'un poste de travail [4] à la gestion stratégique d'entreprise [8]. La plate-forme du projet *SWARM* [19], par sa décomposition récursive donnant lieu à une organisation hiérarchique, permet de simuler le partage de l'information au sein de modèles multi-agents qui se rapprochent des réalités organisationnelles des chaînes logistiques. Dans le cadre du projet *ANTS* [18], les agents "ressources" cherchent à optimiser leurs plans de charge, de manière locale, par la mise œuvre de processus de négociation basés sur les engagements. Brennan et O [4] évaluent différentes politiques d'ordonnancement par l'utilisation de protocoles de négociation. Le projet *DASCh* [1] dédie un agent expédition qui a pour rôle d'intervenir auprès de l'agent planification et gestion des stocks lorsqu'un problème intervient afin qu'il puisse re-planifier la production de manière calculatoire. Gjerdrum et al. [8] et Swaminathan et al. [20] ont recours aux théories d'optimisation pour guider les décisions émises par les agents.

### 2.3. Limites des travaux présentés

#### 2.3.1 Modélisation de chaînes logistiques

L'analyse des travaux de modélisation et de simulation multi-agents montre que les agents sont utilisés pour modéliser les entités ou les processus décisionnels au sein des chaînes logistiques. Les entités ou processus décisionnels disposent des mêmes propriétés que celles

qui caractérisent les agents (autonomie, pro-activité, réactivité, sociabilité). Cependant, les différents travaux de recherche divergent sur l'approche retenue pour l'obtention du modèle de simulation multi-agents et ne proposent pas un cadre de modélisation des entités qui prenne en compte la diversité de configuration des chaînes logistiques. Les interactions existantes entre les agents sont, dans la plupart des projets, spécifiées à partir de canaux de communication pré-établis caractérisant le type de message échangé. Ceci rigidifie le modèle de simulation face à la dynamique de l'environnement dans l'établissement de nouvelles conversations ou processus de négociation.

### 2.3.2 Prise en compte de la personnalisation de masse

Dans le cadre de la personnalisation les délais apparaissent comme étant les éléments caractéristiques conditionnant les méthodes de pilotage et de gestion face à une demande difficilement prédictible. Les activités de transformation des produits sont déclenchées suite à la réception de commandes fermes (ex : *Make to Order*). Les produits finis sont spécifiés par les consommateurs à partir d'options et/ou de paramètres ce qui rend impossible leur production à l'avance pour fins de stockage. Cependant, des modules et/ou des composants formant les produits finis peuvent quant à eux être stockés, dépendant de la nomenclature des produits. La mise en oeuvre de ce type de relation influe sur l'architecture de la chaîne logistique et le comportement des acteurs qui la composent.

Les travaux de [20] et de [2] sont axés sur la modularité et la réutilisation de modèles conceptuels par l'utilisation d'une bibliothèque d'éléments de chaînes logistiques. Cette bibliothèque est composée d'éléments structurels et fonctionnels. Les éléments structurels permettent de recenser les acteurs qui entrent dans la composition du réseau logistique. Les éléments fonctionnels permettent de décrire le comportement de chacun des acteurs du réseau spécifiant ainsi les décisions émises et les actions réalisées (politiques de contrôle [20] et de gestion des flux [2]). L'utilisation d'une telle bibliothèque peut s'avérer restrictive si les éléments nécessaires à la conception d'un nouveau modèle ne correspondent pas aux éléments proposés (e.g. les consommateurs n'appartiennent pas aux éléments structurels). De plus le nombre de rôles que peuvent jouer les agents au sein du réseau apparaissent comme étant limité par rapport à la mise en oeuvre de relations-clients multiples.

Enfin, dans les projets présentés, la demande est spécifiée comme un paramètre d'entrée du modèle de simulation (*allures de demande*). Cependant, les caractéristiques intrinsèques à la personnalisation de masse dans les chaînes logistiques, nécessitent la représentation des comportements des consommateurs dans la démarche de modélisation. En effet, dans un contexte de personnalisation la demande devient plus difficile à prévoir. Ainsi le recours aux techniques de prévisions de ventes classiques est limité par le manque de données ou d'historiques, ou un manque de granularité de celles-ci.

## 3. MODELISATION DE CHAÎNE LOGISTIQUE A PERSONNALISATION DE MASSE

Une voie d'amélioration des performances de la gestion des chaînes logistiques réside dans l'étude de la coordination et de la synchronisation des acteurs du réseau. La conduite d'expérimentations soutenant une telle analyse étant difficilement réalisable sur un système réel il devient alors nécessaire de disposer d'un modèle adapté à cette analyse. Le client se présente comme étant le donneur d'ordre au sein de la chaîne logistique. Dans le cadre de la personnalisation de masse le réseau d'acteurs doit faire face à une demande erratique et mettre en oeuvre des relations-clients multiples.

Il est alors nécessaire de disposer d'un cadre de modélisation adapté à la représentation de la structure du réseau et des modes pilotage induits par l'allure de la demande. La gestion et le pilotage de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation doivent prendre en considération les perturbations liées aux divers aléas tels que les défaillances fournisseurs et l'évolution de l'allure de la demande.

### 3.1. Démarche générale de simulation

Frantz [5] définit une démarche générale de simulation (Figure 1) pour la conduite d'expérimentations afin de comprendre comment le système du monde réel réagit à certains stimuli. Dans cette démarche le système réel est décrit selon un modèle appelé modèle conceptuel. Il permet d'obtenir une image approchée de la structure et du comportement du système réel. Ce modèle est ensuite implémenté en un modèle de simulation. Ce dernier est une représentation informatique du modèle conceptuel, et sert à l'exécution des scénarii de simulation définis par les différents utilisateurs.

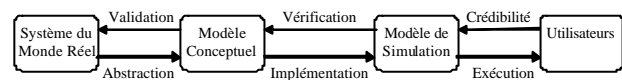


Figure 1. Démarche de simulation [5]

### 3.2. Une démarche de modélisation spécifique

En nous appuyant sur les constats précédents, tout en considérant les propriétés liées au domaine des chaînes logistiques nous proposons un modèle s'intéressant à la description et à l'étude comportementale de chaque acteur du réseau. Notre démarche de modélisation, s'appuyant sur le paradigme agent, permet de prendre en compte la structure du réseau (décomposition en réseau d'acteurs) et de spécifier le comportement de chacun des acteurs face à la dynamique de son environnement. Cette démarche de modélisation autorise une représentation de la structure de la chaîne logistique selon différents niveaux décisionnels (chaîne logistique, entreprise,...) dans un cadre unifié qui inclut également la description des comportements et des interactions des acteurs selon ces niveaux (inter entreprises, inter services, ...). Dans ce cadre méthodologique, le modèle conceptuel se

décline en un Modèle Structurel et un Modèle Dynamique. Ce modèle conceptuel est basé sur le paradigme agent, ce qui nous permet de maintenir une cohérence structurelle entre le modèle conceptuel et le modèle de simulation. Cette cohérence se traduit par une phase d'opérationnalisation du modèle conceptuel en modèle de simulation précisant les comportements des agents et les intégrant dans une plate-forme de simulation dédiée. En plus des agents issus du modèle de domaine, cette dernière apporte des agents de services assurant la bonne exécution du modèle de simulation multi-agents (service de communication, d'interaction avec l'utilisateur, etc.). Nous proposons ainsi une extension du schéma de Frantz (Figure 2).

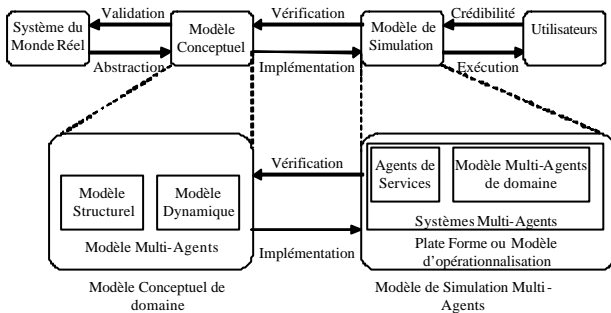


Figure 2. Modèles multi-agents pour la simulation

#### 4. LE SYSTEME REEL

Nous présentons ici le cas industriel sur lequel seront conduites les différentes simulations. La chaîne logistique considérée appartient à l'industrie du golf inspirée de trois manufacturiers majeurs. A partir de données collectées dans [13] sur le fonctionnement des acteurs, un cas reprenant les différentes caractéristiques relatives à cette industrie est proposé à la Figure 3. Ce système est notamment caractérisé par une demande qui est fonction des niveaux de personnalisation des produits définis par marché. Les entreprises qui composent la chaîne logistique sont considérées comme juridiquement autonomes et collectivement responsables pour approvisionner les produits finis sur l'ensemble des zones marchés. En amont du réseau se trouve un ensemble de fournisseurs chargés d'acheminer les composants et/ou matières premières dont ils assurent la production, vers le manufacturier de produits finis.

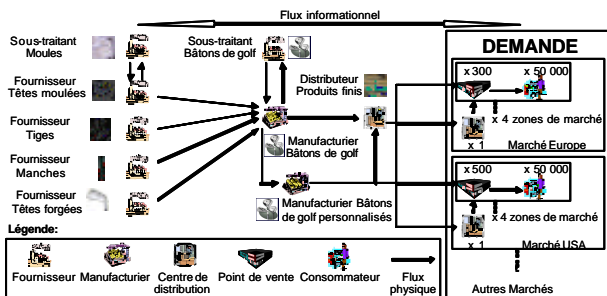


Figure 3. Le système réel

#### 5. LE MODELE CONCEPTUEL

Nous avons proposé dans [10] un cadre de référence de la structure du réseau logistique qui classe les activités des acteurs selon huit niveaux de personnalisation. Chaque acteur est caractérisé par son rôle et ses responsabilités. L'ensemble de ces caractéristiques définissent ainsi un réseau d'activité. Chaque acteur doit alors coordonner ses activités avec les autres acteurs afin de répondre à la demande. L'émission d'une commande est matérialisée sur le réseau d'activité par le point de pénétration de l'ordre correspondant à un niveau de personnalisation. Placer le point de pénétration de l'ordre consiste à déterminer le point d'entrée des commandes dans le flux physique des produits. L'identification du niveau de personnalisation permet de positionner le point de découplage sur le réseau d'acteurs. Celui-ci conditionne les politiques de gestion et les relations entre acteurs se situant en amont et en aval de ce point. Les formats de commandes définissent la typologie du réseau logistique dans le cadre de la personnalisation de masse impliquant une circulation dédiée des flux informationnels et matériels. Le choix de réponse à la demande, la relation-client ainsi que le positionnement du point de découplage définissent la configuration structurelle et la dynamique des comportements des acteurs de la chaîne logistique.

##### 5.1. Le Modèle Structurel

La représentation de la structure du réseau logistique est basée sur le concept de réseau de responsabilité [11]. Le réseau logistique est composé d'un ensemble d'acteurs autonomes qui disposent de rôles et de responsabilités complémentaires définies à partir de leurs compétences et des activités qu'ils sont aptes à réaliser. Au sein de notre démarche, ces réseaux de responsabilités se retrouvent sur toutes les strates organisationnelles suivant le principe de décomposition par niveaux décisionnels (Inter entreprises, Inter Départements, ...). Une telle approche, permet d'obtenir une récursivité dans la décomposition structurelle de l'organisation considérée (Chaînes Logistiques, Entreprises, Services ou Départements, Cellules ou Ateliers, Ressources Humaines/Matérielles). Un réseau de responsabilité peut être défini au niveau décisionnel et/ou opérationnel. Il formalise le(s) rôle(s) de chaque élément du réseau. Ce(s) rôle(s) sont défini(s) en fonction, d'une part des éléments en interactions (liens clients/fournisseurs) et d'autre part en fonction des activités dont chaque acteur assure la responsabilité. Le réseau de responsabilité selon le niveau Inter Entreprises se décompose en de nouveaux réseaux de responsabilités au niveau Entreprise. Cette démarche de décomposition implique une redéfinition des objectifs par niveau, assurant ainsi une coordination des acteurs en fonction de leurs activités (un réseau par niveau).

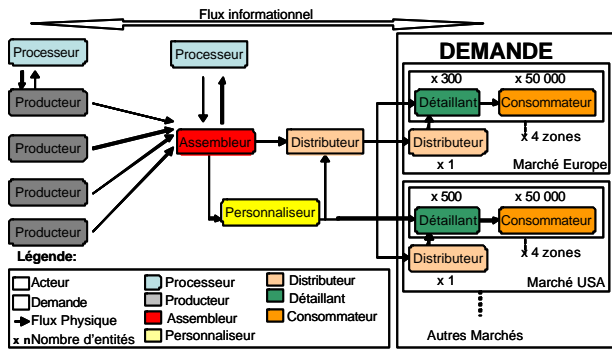


Figure 4. Le modèle structurel *Inter Entreprises*

La Figure 4 représente le modèle structurel du système réel au niveau Inter Entreprises. Le réseau est composé d'un ensemble de fournisseurs ayant pour responsabilité l'approvisionnement de l'Assembleur en matières premières et en composants. Ces manufacturiers (*Assembleur, Processeur et Personnalisateur*) ont pour responsabilités les étapes de transformation des articles en produits finis. Une fois cette phase de transformation terminée, les produits finis sont acheminés vers les centres de distribution. Les centres de distribution livrent les produits finis vers les points de vente, qui ont la responsabilité de les proposer à la vente auprès des consommateurs.

## 5.2. Le Modèle Dynamique

L'organisation (centralisée, décentralisée, ...) désigne d'une part la structure du système (aspect statique) et d'autre part le comportement des éléments de la structure (aspect dynamique). L'étude du comportement des systèmes, l'aspect dynamique du modèle, consiste à décrire les réponses de l'organisation aux stimuli de l'environnement. Nous nous basons pour la conception du modèle dynamique sur le cadre méthodologique NETMAN (*Networked Manufacturing*) [6] et [12]. Ce cadre s'intéresse à la conception et l'opérationnalisation de la structure organisationnelle de réseaux manufacturiers hiérarchiques ou *hétérarchiques*. Il permet la planification, le contrôle et la gestion des activités des acteurs du réseau dans un environnement dynamique. Chaque unité d'affaire indépendante du réseau (acteur) est représentée par des centres NETMAN. Ces centres collaborent et se coordonnent, par interactions de flux informationnels avec d'autres centres et des acteurs externes à l'organisation considérée (clients et fournisseurs). Les flux informationnels, utilisés pour traduire la dynamique du système, définis dans [6] sont : (i) les besoins, (ii) les offres, (iii) les données de coordination, et, (iv), les modèles de coordination. Les besoins sont représentés sous forme de commandes caractérisées par le niveau de personnalisation. Les offres sont exprimées par niveaux de personnalisation et délais de livraison associés (par zone de marché), [16].

Nous proposons d'exprimer les données de coordination à partir de l'analyse des performances définies d'un point de vue local et global (acteur et réseau d'acteurs) [10]. L'analyse des performances permet de disposer d'informations concernant les actions réalisées par les acteurs à partir des décisions qu'ils ont émis. Au niveau des modèles de coordination nous proposons de décrire les comportements selon deux approches : (i) les modèles de réseau, et, (ii) les modèles de centre. Les modèles de réseau s'intéressent à la coordination des activités d'un acteur. Les modèles de centre décrivent la coordination des acteurs au sein du réseau. Ces modèles disposent de deux modes de transmission, l'un aval et le second amont. Nous spécifions ainsi le contenu des informations échangées entre les membres du réseau afin que les acteurs puissent se coordonner efficacement.

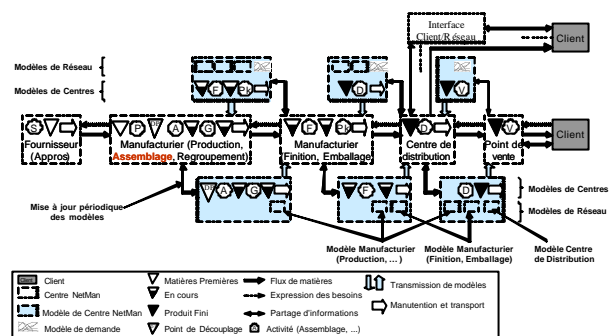


Figure 5. Le Modèle Dynamique *Inter-Entreprises*

Le Modèle dynamique ainsi obtenu, permet aux membres du réseau de mettre en œuvre des processus décisionnels basés sur les performances des acteurs du réseau (définie de manière locale) et la performance du réseau d'acteurs (définie de manière globale).

## 5.3. Le Modèle Multi-Agents

Les agents sont des entités logicielles autonomes réalisant des actions par l'adoption de comportements simples (cas des agents réactifs) ou élaborés (cas des agents intelligents). Ils sont capables d'interagir avec d'autres agents de manière réactive ou pro active sans une intervention extérieure (exemple : intervention humaine). Le concept d'interaction inhérent aux relations dynamiques qui s'établissent entre les agents s'intéresse aux actions collectives qui sont mises en œuvre dans le système. Les agents doivent être capables de communiquer avec d'autres agents pour le partage et la transmission de données, d'informations et de connaissances. Les agents peuvent renvoyer des comportements intelligents, résultats des actions autonomes qu'ils réalisent au sein de leur environnement. Les propriétés qui définissent les systèmes multi-agents fournissent un cadre de modélisation adapté à la représentation des chaînes logistiques.

Nous utilisons les systèmes à base d'agents pour la représentation des entités du monde réel en tentant

d'adopter au plus près le comportement des entités qu'ils modélisent. Nous souhaitons étudier le comportement d'un "système physique" issu du monde réel au comportement programmé et d'un "système décisionnel" dans lequel des processus de décisions complexes interviennent. Il s'agit de mettre en évidence les comportements et les réactions du système physique face aux décisions issues du système décisionnel elles mêmes dépendant de l'état du système physique. Nous proposons un modèle multi-agents pour la représentation des entités du Modèle Structurel et de leurs comportements définis dans le Modèle Dynamique, basé sur un modèle d'agent, l'agent Acteur, illustré à la Figure 6. L'agent Acteur est constitué de deux types d'agents aux rôles différents, [9]. En fonction de leur mode de fonctionnement et de la représentation qu'ils possèdent de leur environnement, les agents peuvent être soit réactifs soit cognitifs. L'agent Acteur est composé d'un agent cognitif et/ou d'un ou plusieurs agents réactifs. Au sein du modèle de l'agent Acteur un agent cognitif possède une représentation du comportement décisionnel d'une entité sous forme de plans (Plans Comportementaux) conduisant à la définition d'un ou plusieurs processus de décision. La mise en œuvre de Plans Comportementaux permet à l'agent d'agir pour atteindre ses buts. Les décisions émises peuvent faire intervenir des processus de communication par envoi de messages, pour la demande d'informations ou pour la réalisation d'actions. Un agent réactif représente une entité physique dont les comportements sont définis sous forme d'états. Ces états spécifient les actions réalisées suite à la réception de messages d'agents cognitifs ou de signaux émanant de l'environnement.

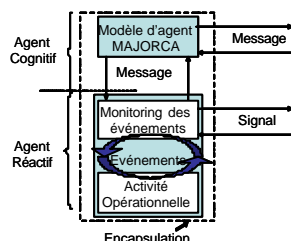


Figure 6. Le Modèle de l'Agent Acteur [9]

La Figure 6 présente l'architecture de l'agent Acteur basée sur le principe d'encapsulation d'agents réactifs et cognitifs. L'objectif est de pouvoir modéliser, par un agent Acteur, tout acteur de la chaîne logistique représenté dans le Modèle Structurel et selon des comportements décrits dans le Modèle Dynamique. Cet acteur peut alors se représenter à des niveaux de granularité différents (selon la décomposition organisationnelle résultant du niveau d'analyse spécifié). L'encapsulation définit la relation suivante : le(les) agent(s) réactif(s) est(sont) responsable(s) de la réalisation des activités opérationnelles issues des décisions prises par l'agent cognitif. Le modèle multi-agents se décompose en deux sociétés, l'une d'agents cognitifs et la seconde d'agents réactifs, Figure 7.

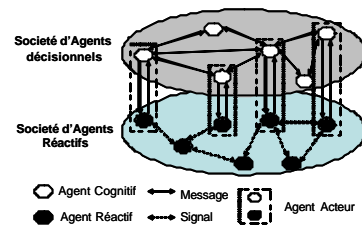


Figure 7. Modélisation par systèmes multi-agents

L'approche par société d'agents hétérogènes propose une architecture dissociant les processus décisionnels, opérationnels et informationnels au sein du système multi-agents. Cette décomposition permet de différencier les comportements, les rôles et les compétences adoptés par les entités au sein de l'organisation.

## 6. LE MODELE DE SIMULATION MULTI-AGENTS

Les propriétés et les caractéristiques des systèmes multi-agents permettent la conduite de simulations distribuées, basées sur des entités autonomes, permettant d'appréhender le fonctionnement complexe d'un système réel modélisé.

### 6.1. Le modèle Multi -Agents de domaine

Au sein du modèle multi-agents de domaine, les agents cognitifs adoptent les comportements des acteurs de la chaîne logistique qui mettent en oeuvre des processus décisionnels. Les agents réactifs adoptent le comportement des ressources physiques utilisées par les agents cognitifs pour la réalisation d'activités de transformation. Le modèle multi-agents de domaine s'intéresse à la représentation des activités opérationnelles et décisionnelles des acteurs du réseau logistique selon le niveau de granularité du modèle.

### 6.2. Le Modèle d'Opérationnalisation

Les agents cognitifs s'appuient sur des modèles d'agents MAJORCA (Moteur Agents Jess [7] Orienté Représentation de Comportement d'Agents) [22]. MAJORCA est une plate-forme qui fournit un environnement de développement de systèmes multi-agents basé sur la notion de Plans Comportementaux spécifiés à l'aide du formalisme RCA (Représentation de Comportements d'Agents). Les agents cognitifs utilisent une communication par échange de messages. Un message descendant correspond à une demande d'information ou à l'émission d'un ordre. Les agents réactifs s'appuient sur des modèles d'agents de type réflexe avec états. Les comportements d'agents réactifs sont spécifiés à l'aide du formalisme UML [3], et s'appuient sur le logiciel Anylogic© [23]. Anylogic© est un outil de simulation pour le développement de systèmes complexes discrets, continus et hybrides. En ce qui concerne les agents de service, génériques à toutes simulations, nous retrouvons les agents suivants : (i) l'Agent Pages Blanches (*Agent Name Server*), (ii)

l'Agent Pages Jaunes (*Register-Agent*), (iii) l'Agent Horloge pour la synchronisation du temps entre les agents du modèle multi-agents de domaine, (iv) l'Agent Ordonnanceur d'événements pour la synchronisation des événements, et, (v) l'agent Contrôleur de Simulation responsable de la gestion des paramètres de simulation.

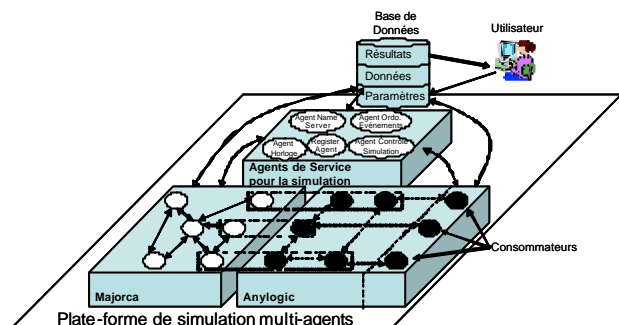


Figure 8. La plate-forme de simulation multi-agents

Cette approche représentant le comportement des agents, fournit aux concepteurs et aux utilisateurs une vision des interactions existantes dans le système, tant au niveau local (comportement de l'agent), qu'au niveau social (comportement du système). L'identification d'un acteur de la chaîne logistique par un agent rend possible l'étude du comportement de la chaîne globale et des acteurs qui la compose, de part la modularité du formalisme. En effet, cet outil de description des comportements, permet par le biais des interactions, de visualiser les scénarios de coordination et les points de synchronisation, ce qui s'inscrit de manière réaliste dans le cadre applicatif présenté concernant la gestion des chaînes logistiques. Le travail de conception est de plus facilité par la simplification de l'étape d'implémentation.

### 6.3. Simulation de l'environnement de la chaîne logistique : La demande

La personnalisation de masse se caractérise comme étant une composante différenciatrice pour la gestion et le pilotage de chaînes logistiques. La demande par niveau de personnalisation est considérée comme étant l'un des éléments essentiels formant la dynamique de l'environnement de l'organisation réseau. C'est pour cela que cette partie concernant nos travaux de simulation s'intéresse à la simulation des consommateurs par niveaux de personnalisation et par zone de marché. Les deux sous-parties suivantes présentent les comportements simulés d'un acteur clef dans le cadre de la personnalisation de masse : les consommateurs.

#### 6.3.1 Les comportements des agents consommateurs

Le niveau de personnalisation est décrit selon la relation qu'entretient la chaîne logistique avec le consommateur. Les consommateurs peuvent soit acheter les produits auprès des points de vente (passation de commandes en cas d'indisponibilités ou de produits spécifiques), soit passer des commandes via une interface consommateur/réseau (ex : commerce électronique). Ce dernier cas donne la possibilité d'acquérir différents

produits depuis ceux dits *Populaires* jusqu'au produits *Sur-mesure*, caractérisant ainsi les niveaux de personnalisation définis dans [16].

Les points de ventes ou détaillants forment une interface physique entre le consommateur et le réseau. Ils peuvent correspondre à des magasins de sport, des grandes surfaces, des franchises, des magasins spécialisés, ou encore des ateliers professionnels de clubs sportifs de golf. Au niveau des points de ventes, nous allons retrouver des stocks physiques de produits finis de type populaire. Le nombre de points de vente est spécifié par zone de marché. Ainsi un consommateur appartenant à une zone de marché peut choisir d'acquérir un produit présent dans un point de vente, ou bien spécifier un désir particulier auprès de ce dernier se concrétisant par la passation d'une commande. Le point de vente peut soit commander le produit auprès d'un autre point de vente, le commander auprès de son distributeur, ou bien le commander auprès du manufacturier de bâtons de golf, dépendant des règles d'affaires instaurées. Un agent consommateur représente les clients humains d'une zone de marché. Cet agent génère les commandes en fonction des offres proposées par la chaîne logistique par marché. En ce qui concerne les offres, le tableau ci-dessous présente un exemple de caractéristiques associées au niveau de personnalisation et aux marchés considérés. Pour chaque niveau de personnalisation les variantes/mix produits sont proposées en fonction de leurs composants.

Marché Canadien	Nombre d'options par paramètre				
	Populaire	Variété	Accessoire	Paramètre	Sur mesure
Paramètres pour l'offre d'ensemble de fers	2	4	4	4	4
Modèles de tête de golf	1	1	1	2	4
Alliage de métal	1	1	1	2	4
Disponibilité des faces par modèles	2	2	2	2	2
Lofts par modèle	1	1	1	3	7
Angle du lie par modèle	1	1	5	9	13
Soie grinds par modèle	1	2	2	3	6
Type de tige et de torsion par modèle	3	12	20	40	60
Longueur par tige	1	1	5	15	30
Poids ajusté par tige	1	1	5	5	19
Type de manche par tige	1	3	10	20	35
Taille du manche	1	1	2	6	8
Nombre de combinaison d'ensemble de fers	12	576	800 000	466 560 000	125 483 904 000
Offre de Service (statut, moves)	1	3	5	10	30
Délai de livraison (jours)	1	3	5	10	30
Fiabilité de livraison (taux d'accomplissement)	96%	95%	90%	90%	75%
Penalité pour retard de livraison (par jour de retard)	\$20	\$10	\$10	\$10	\$25
Prix	\$850	\$900	\$1 000	\$1 200	\$2 000

Tableau 1. Offres versus niveau de personnalisation [13]

#### 6.3.2 Hypothèses de simulation et pré-résultats

En ce qui concerne la demande, le nombre de produits peut par exemple être spécifié par trimestre, par niveau de personnalisation et par marché selon une loi normale.

Prévisions Marché Canadien	Demande par trimestre par niveau de personnalisation offert											
	Qt	Qrt1	Qrt 1	Qrt 2	Qrt2	Qrt 2	Qrt 3	Qrt3	Qrt 3	Qrt 4	Qrt4	Qrt 4
Qz												
Populaire	12 500	139	5%	18 750	208	5%	7 500	83	5%	2 500	28	10%
Variété	5 500	61	10%	8 250	92	5%	3 300	37	10%	1 100	12	15%
Accessoire	5 000	56	15%	7 500	83	10%	3 000	33	10%	1 000	11	20%
Paramètre	1 250	14	20%	1 875	21	15%	750	8	20%	250	3	25%
Sur mesure	750	8	40%	1 125	13	30%	450	5	40%	150	2	50%
Total	25 000	417	18%	37 500	625	13%	15 000	250	17%	5 000	83	24%

Tableau 2. Paramètres de la demande par trimestre [16]

Ces données de simulation forment la configuration du scénario de la dynamique de l'environnement de la chaîne logistique (ici la demande). Ces données de simulation sont définies par l'utilisateur via une base de données relationnelle. Nous avons ainsi obtenu comme

premiers résultats de simulation, la génération de la demande pour l'ensemble des niveaux de personnalisation et selon les caractéristiques comportementales des consommateurs selon les différentes zones de marché. Ces résultats sont enregistrés dans la base de données qui permet à l'utilisateur d'obtenir une vision agrégée de la demande. Cette démarche est ainsi validée par une première opérationnalisation du comportement des consommateurs représentés par des agents réactifs.

## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre travail de recherche consiste à proposer une démarche de modélisation s'appuyant sur le paradigme agent pour la simulation de chaînes logistiques et plus particulièrement celles à personnalisation de masse. Ceci nous a conduit à proposer un modèle conceptuel multi-agents s'appuyant sur les aspects structurels et dynamiques de l'organisation (chaîne logistique). Suite à cette phase de conception nous avons défini les éléments composants le modèle de simulation multi-agents, conduisant ainsi au développement d'une plate-forme de simulation individu centré.

L'architecture d'agents réactifs dont les consommateurs (acteurs primordiaux dans un contexte de personnalisation de masse) est déjà implémentée. L'implémentation des acteurs mettant en œuvre des processus décisionnels complexes est en développement. Nous avons ici présenté les premiers résultats de simulation : la demande pour l'ensemble des niveaux de personnalisation selon les différentes zones de marché.

## REFERENCES

- [1] H. Baumgaertel, S. Brueckner, H. Parunak, R. Vanderbok and J. Wilke, Agent Models of Supply Network Dynamics, Analysis, Design, and Operation, *The Practice of Supply Chain Management*, Chapter 19, 2003.
- [2] S. Biswas and Y. Narahari, Object oriented modeling and decision support for supply chain, *European Journal of Operational Research*, vol. 153, 2004.
- [3] G. Booch, J. Rumbaugh and I. Jacobson, The Unified Modeling Language, *Addison-Wesley*, 1999.
- [4] R. W. Brennan and W. O. A Simulation Test-Bed to Evaluate Multi-Agent Control of Manufacturing Systems, *Winter Simulation Conference*, 2000.
- [5] F. K. Frantz, A taxonomy of model abstraction techniques, *Winter Simulation Conference*, 1995.
- [6] J.-M. Frayret, S. D'Amours, B. Montreuil and L. Cloutier, A Network Approach to Operate Agile Manufacturing Systems, *International Journal of Production Economics*, 74 (1-3) : 239-259, 2001.
- [7] E. J. Friedman-Hill, Jess, The Java Expert System Shell, <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess>, 1998.
- [8] J. Gjerdrum, N. Shah and L. G. Papageorgiou, A combined optimization and agent-based approach to supply chain modelling and performance assessment, *Production Planning & Control*, 12 (1) :81-88, 2001.
- [9] O. Labarthe, E. Tranvouez, A. Ferrarini, B. Espinasse and B. Montreuil, A Heterogeneous Multi-Agent Modelling for Distributed Simulation of Supply Chains, *International Conference on Holonic and Multi-agent Systems for Manufacturing*, 2003.
- [10] O. Labarthe, A. Ferrarini, B. Montreuil et B. Espinasse, Cadre de coordination distribué de chaîne logistique par mesure des performances, 5<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, 2003.
- [11] B. Montreuil and P. Lefrançois, Organizing factories as responsibility networks, *Progress in Material Handling Research*, 375-411, 1996.
- [12] B. Montreuil., J.-M. Frayret and S. D'Amours, A Strategic Framework for Networked Manufacturing, *Computers in Industry*, 42 : 299-317, 2000.
- [13] B. Montreuil and M. Poulin, Demand and Supply Network Scope for Personalized Manufacturing, *International Conference on Managing Innovations in Manufacturing*, 2002.
- [14] H. Parunak, Applications of distributed artificial intelligence in industry, *Foundations of Distributed Artificial Intelligence* : 71-76, 1996.
- [15] H. Parunak, R. Savit and R.L. Riolo, Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A case Study and User's Guide, *Center for Electronic Commerce*, 1998.
- [16] M. Poulin, B. Montreuil and A. Martel, Implications of personalization offers on demand and supply network design : a case from the golf club industry, *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, 2003.
- [17] N. Sadeh, D. W. Hildum, D. Kjenstad and A. Tseng, MASCOT: An Agent-based Architecture for Dynamic Supply Chain and Coordination in the Internet Economy, *Production Planning & Control*, 12 (3), 2001.
- [18] J. A. Sauter and H. Parunak, ANTS in the Supply Chain, *Agent based Decision Support System for Managing the Internet-Enabled Supply Chain*, 1999.
- [19] T. J. Strader, F.-R. Lin and M. J. Shaw, The impact of information sharing on order fulfillment in divergent differentiation supply chains, *Journal of Global Information Management*, 7 (1), 1999.
- [20] J. M. Swaminathan, S. F. Smith and N. M. Sadeh, Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach, *Decision Sciences*, 29 (3) : 607-632, 1998.
- [21] O. Telle, Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : Aide à la coopération au sein d'une relation Donneur d'Ordres/Fournisseur, *Thèse de doctorat de l'ENSAE*, 2003
- [22] E. Tranvouez, IAD et Ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par systèmes multi-agents, *Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III*, 2001.
- [23] XJ Technologies, <http://www.xjtek.com>, 2004.