

MODELISATION MULTI-AGENTS POUR LA SIMULATION DE POLITIQUES D'APPROVISIONNEMENT AU SEIN DE CHAINES LOGISTIQUES

Z.BAHROUN, M.MOALLA, G.BAAZAOU

J-P.CAMPAGNE

LIP2 : Faculté des Sciences de Tunis, Dép. des Sciences de l'Informatique, Campus universitaire 1060 Tunis..
Zied.bahroun@fst.rnu.tn, mohamed.moalla@fst.rnu.tn

LIESP, 20, Avenue Albert-Einstein
INSA-Lyon, F-69621, Villeurbanne, France.
jean-pierre.campagne@insa-lyon.fr

RESUME : *Les nouveaux contextes industriels se caractérisent par des marchés de portée mondiale, saturés et marqués par une forte exigence du consommateur, ce qui soumet l'entreprise à de très fortes concurrences. Dans ces nouveaux contextes, les entreprises cherchent à optimiser leurs chaînes logistiques pour améliorer leurs positions concurrentielles. Plusieurs approches et techniques se sont développées ces dernières années pour aider à la conception, au pilotage, à la synchronisation et à la coordination des chaînes logistiques. Nous proposons dans ce travail une modélisation générique des chaînes logistiques basée sur les systèmes multi-agents dans le but de simuler et d'évaluer des politiques d'approvisionnement au sein de ces chaînes. Pour valider le modèle proposé, une implémentation d'une chaîne logistique basée sur le « jeu de la bière » et où on simule plusieurs politiques d'approvisionnement est présentée.*

MOTS-CLES : *chaînes logistiques, systèmes multi-agents, modélisation, simulation.*

1. INTRODUCTION

L'amélioration de la performance de la chaîne logistique nécessite l'analyse de son comportement et de ses paramètres. Ces études nécessitent la construction de modèles qui permettent de reproduire les phénomènes constatés et d'analyser la validité des solutions proposées.

La mutation de l'environnement économique est à l'origine de nouvelles tendances. On veille de plus en plus à satisfaire le client et lui offrir des produits très personnalisés en respectant la qualité du produit et du service (livraison, paquetage...). Aussi, il faudrait développer la synchronisation et aller au delà des périmètres propres de l'entreprise pour coordonner ses planifications et ses exécutions avec ses partenaires. Dans ces conditions, les partenaires doivent collaborer davantage et ont intérêt :

- à une gestion collaborative de la demande en propageant l'information sur les ventes et sur les besoins du marché en amont de la chaîne et l'information sur la disponibilité des produits et sur les niveaux de stock en aval de la chaîne.
- à la réalisation collaborative des ventes où le fournisseur gère les stocks de son client tandis que le client fournit directement les données sur la demande du marché au fournisseur.
- à la planification collaborative où les partenaires doivent générer des plans communs à moyen et long terme.

Toutes ces formes de collaboration nécessitent essentiellement un partage efficace des informations et ont conduit au développement de différents systèmes d'informations tels que les EDI (Electronic Data Interchange), les ERP (Enterprise Resource Planning), les B2B & B2C (Business to Business & Business to Customer), les VMI (Vendor Managed Inventory) et CRP (Continuous Replenishment Program) ou encore les CPFPR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment).

Parallèlement à ces techniques et approches, les Systèmes multi-agents (SMA) présentent de grandes promesses pour concevoir et gérer les chaînes logistiques. En effet, plusieurs similitudes entre les chaînes logistiques et les SMA favorisent leur utilisation pour la modélisation et le pilotage des chaînes logistiques :

- Il existe différents types d'entreprises dans une chaîne logistique qui sont des entités autonomes qui décident ce qu'elles doivent faire pour réaliser leurs objectifs. De la même façon, un SMA se compose de différents types d'agents dont les comportements sont autonomes.
- Chaque entité possède ses propres objectifs et ses propres règles de gestion. Egalement, dès sa conception, chaque agent a un objectif et est doté d'un comportement spécifique.
- Chaque entreprise a des tâches à exécuter et peut déléguer une partie de ces tâches à d'autres. De la même manière, les agents peuvent subdiviser une tâche en sous tâches et les déléguer à d'autres agents.

- Les entreprises doivent coordonner leurs échanges de flux. Cet aspect est fréquemment utilisé entre les agents qui se coordonnent par communication.
- Chaque entité est génératrice d'un morceau d'information nécessaire pour la gestion de toute la chaîne. Ces informations doivent être partagées entre les différents acteurs. La communication entre les agents permet ce partage.
- La structure de la chaîne peut à tout moment, changer en ajoutant des acteurs ou en éliminant d'autres. Dans un SMA, on peut créer de nouveaux agents ou en éliminer certains.

2. ETAT DE L'ART

Si on étudie la littérature dans le domaine, Fox (Fox, 1993) a été probablement parmi les premiers à avoir modélisé une chaîne logistique comme un SMA. Les premiers projets SMA peuvent être classés en deux grandes catégories à savoir la conception ou la gestion d'une chaîne logistique (pour plus de détails Moyaux et al., 2006, Shen et al., 2006).

En ce qui concerne les projets de conception, nous pouvons citer BPMAT, une librairie logicielle développée par IBM pour modéliser les activités d'une entreprise (IBM, 2003). Le réseau de dépendances des tâches (Walsh, 2001) est un protocole de marché qui permet d'allouer des tâches parmi des agents en concurrence pour l'utilisation de ressources rares.

En ce qui concerne les projets de gestion des chaînes logistiques, nous pouvons citer d'abord le projet DragonChain (Kimbrough et al., 2002) où l'on a simulé des chaînes logistiques à l'aide de SMA et d'algorithmes génétiques dans le but de réduire l'effet du « coup de fouet ». Agent Building Shell (Barbuceanu and Fox, 1995) offre une plateforme permettant le développement de SMA et composée de deux types d'agents : six agents fonctionnels correspondant aux différentes activités d'une chaîne logistique et des agents informationnels permettant le traitement et la circulation de l'information. Metamorph (Maturana et al. 1999) est un projet où l'on utilise deux types d'agents : des agents médiateurs statiques ou dynamiques et des agents ressources. Le projet Netman (Cloutier et al. 2001) formalise des organisations de productions organisées en réseaux, dans le but d'obtenir des réseaux de production agiles dans un environnement dynamique. MASCOT (Sadeh et al., 1999) est une architecture reconfigurable pour la planification et la coordination d'une chaîne logistique. Enfin, OCEAN (Bournez et Gutknecht, 2001) est un système de pilotage basé sur des contraintes et dont le but est de montrer que des compétitions à un niveau individuel peuvent être à l'origine de coopérations à un niveau plus global.

Parmi des travaux plus récents, nous pouvons citer Wang et al. (2007) qui proposent une approche multi-agents sous contraintes pour l'intégration des chaînes

logistiques. Ils utilisent des agents médiateurs pour la coordination et la synchronisation des informations et des décisions sous contraintes à travers les différentes composantes d'une chaîne logistique. Kwon et al (2007) traitent le problème de la collaboration dans un environnement incertain (approvisionnement et demande) par une approche multi-agents. Les résultats obtenus montrent l'importance d'une collaboration intensive pour un maximum d'efficacité de la chaîne. Zarandi et al. (2007) proposent une approche basée sur les SMA et la logique floue pour réduire l'effet du « coup du fouet ». Ils montrent que les résultats obtenus avec leur approche permettent d'obtenir des politiques d'approvisionnement plus performantes que celles obtenues par les approches analytiques. Govindu et Chinnam (2007) proposent une plateforme générique basée sur des processus dans le but de simplifier le développement de SMA pour des chaînes logistiques. Monteiro et al (2007) proposent une approche SMA pour la coordination multi-sites. Les auteurs pensent qu'avec leur approche, gérer un réseau d'entreprises deviendra plus transparent et ressemblera à la gestion d'une simple entreprise dans le réseau. L'utilisation des agents va permettre la distribution physique des décisions et procure une structure hiérarchisée de l'organisation avec un contrôle décentralisé qui garantit l'autonomie de chaque entité et la flexibilité du réseau. Enfin, Liang et Huang (2006) proposent un SMA pour la prévision de la demande dans une chaîne logistique multi-échelons. Les agents contrôlent le stock des différentes entités de la chaîne et se coordonnent dans le but de réduire le coût de gestion total. La prévision de la demande est effectuée à l'aide d'algorithmes génétiques.

Par rapport à tous ces travaux, notre objectif dans ce travail est de présenter une approche **générique** et **simple** pour la modélisation d'une chaîne logistique à l'aide d'un SMA dans le but principal de **simuler** et d'**évaluer** des politiques d'approvisionnement. L'ambition de ce travail est de développer à terme un outil **configurable** qui permet de **modéliser rapidement** une chaîne logistique par un SMA et de pouvoir par la suite simuler et évaluer différentes politiques d'approvisionnement en y introduisant une dimension importante qu'est la **collaboration**.

3. MODELISATION MULTI-AGENTS D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE

3.1. Objectifs

Dans une chaîne logistique, il existe plusieurs centres de décisions qui, en général, suivent pour chacun un ensemble de règles stratégiques. Leur fonctionnement d'une façon isolée et séparée est à l'origine, le plus souvent, de décisions incohérentes et même parfois incompatibles. La répercussion de ces décisions affecte, par contre, tous les autres centres et donne naissance à des phénomènes dont l'incidence sur la performance de toute la chaîne est grandissante et dont la compréhension

reste de nature difficile pour les industriels. Une politique d'approvisionnement est un ensemble de règles stratégiques qui conditionnent des décisions logistiques. Celles-ci sont déterminées principalement par les dates de réapprovisionnement et les quantités de réapprovisionnement. La modélisation recherchée vise à simuler des politiques d'approvisionnement en vue d'évaluer leurs performances et de piloter les chaînes logistiques. Le modèle auquel on aboutit doit permettre, d'une part, d'exprimer une large gamme de telles politiques, de les exécuter et de tirer les enseignements utiles sur leurs impacts, notamment en ce qui concerne l'effet du « coup de fouet » et les variations des coûts globaux, et d'autre part, de servir comme un outil d'aide à la décision pour le pilotage, en temps réel, des chaînes logistiques et de profiter des technologies de l'information et de la communication pour intégrer les différents centres de décision logistiques.

3.2. Identification des besoins

3.2.1. Généricité du modèle pour les différents maillons d'une chaîne logistique

Commençons par souligner qu'une chaîne logistique se présente, dans le cas général, comme une structure de réseau en couches à deux dimensions : une dimension horizontale qui explicite le type d'entreprises « fournisseurs » se trouvant en amont et le type d'entreprises « clientes » se trouvant en aval et une dimension verticale qui traduit la multiplicité et l'organisation structurelle des entreprises se trouvant aussi bien en amont qu'en aval de chaque entreprise maillon. Toute entreprise maillon de la chaîne est, donc, appelée à être modélisée par un agent dont on va étudier l'impact des décisions prises dans ses interactions avec les entreprises « fournisseurs » en amont et les entreprises « clientes » en aval.

3.2.2. Différents aspects à prendre en compte

Le modèle générique doit, en effet, prendre en compte un certain nombre d'aspects fondamentaux qui constituent les éléments d'assise de la modélisation. En effet, notre approche consiste à modéliser la chaîne logistique par un système multi-agents où chaque maillon sera représenté par un agent. Chaque agent maillon de la chaîne comprendra alors sept modules nécessaires au pilotage de la chaîne logistique :

- relation client : gère les relations avec les clients (réception et négociation des demandes, livraison et suivi de livraison),
- relation fournisseur : gère les relations avec les fournisseurs (lancement des commandes, suivi approvisionnement et réception des produits),
- activité de transformation : décrit l'activité de l'entreprise ainsi que ses paramètres de transformation,
- planification : assure le fonctionnement de l'entreprise aussi bien que sa réactivité aux fluctuations du marché,

- approvisionnement : gère la logistique d'approvisionnement,
- collaboration : permet la collaboration des partenaires de la chaîne logistique,
- performance : évalue les performances de l'entreprise et par conséquent la chaîne à laquelle elle appartient.

3.3. Modèle d'un agent générique

Suite à la phase d'identification des besoins, on constate que la chaîne se compose de différents types d'entreprises. Il s'avère, alors, préférable d'avoir un modèle au moyen duquel on peut représenter les différents maillons de la chaîne par de simples duplications. Pour cela, le modèle doit être le plus générique possible afin d'offrir la possibilité de configurations spécifiques selon les besoins.

On constate également que l'entreprise intègre différents processus de natures différentes. Cette diversité nous incite à établir pour chaque processus un sous modèle qui décrit son fonctionnement et à choisir minutieusement l'approche de modélisation qui lui convient le mieux. Cet ensemble de sous modèles constitue enfin le modèle global de l'entreprise qui sera un modèle multimodal.

Notre choix s'est porté sur le développement d'un modèle à architecture générique dont les modules sont configurables. Dans cette approche, la modélisation de toute la chaîne revient à instancier autant d'agents que de maillons dans la chaîne et à implémenter pour chacun de ces maillons ses propres stratégies dans les modules appropriés.

3.3.1 Architecture globale

Il convient de rappeler, tout d'abord, que la chaîne logistique peut être modélisée selon plusieurs points de vues. Notre travail est fondé sur une combinaison d'une vision structurelle et d'une vision opérationnelle. Ce choix se justifie par le souci d'intégrer l'aspect organisationnel de la chaîne logistique avec l'aspect fonctionnel qui se manifeste par l'ensemble des interactions entre les différents maillons. En effet, le premier point de vue nous induit à représenter la chaîne logistique sous la forme d'un graphe de nœuds représentant les entreprises, interconnectés par des arcs qui décrivent la circulation des flux physiques et informationnels. Alors que, du deuxième point de vue, on tire profit de la description donnée par le modèle SCOR pour schématiser l'entreprise comme une succession de processus qui décrivent ses relations avec ses partenaires en tenant compte de la manière dont elle amène ses produits vers ses clients. Ainsi, le schéma de l'entreprise se résume par une fonction d'achat, suivie d'une fonction de transformation et finissant par une fonction de livraison, le tout étant piloté par une fonction de planification et une fonction d'approvisionnement. La figure suivante présente l'architecture modulaire proposée :

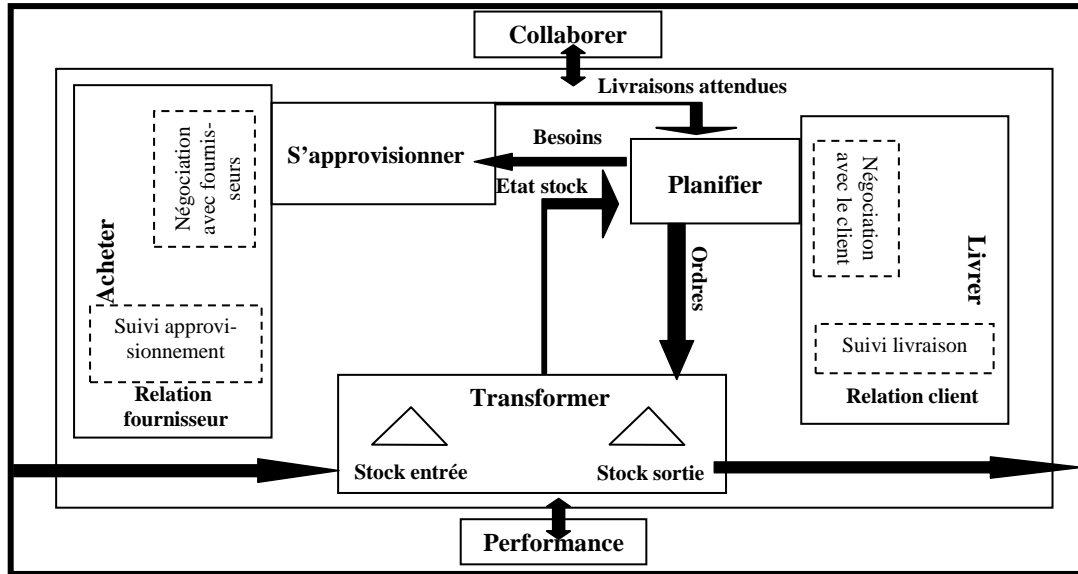


Figure 1. Architecture de l'agent générique

3.3.2 Description des modules

On constate que l'on peut répartir les décisions que prennent les décideurs dans la chaîne logistique dans l'ensemble des modules que l'on a défini précédemment. Cette répartition reste dans la plupart des cas applicable pour tout type d'entreprise (il est possible parfois que des modules ne soient pas instanciés). L'ensemble des modules ainsi obtenus représente les différents processus de l'entreprise sous la forme de centres de décision. Dans cette approche, on définit pour chaque module, de façon générique, l'ensemble des informations nécessaires et l'ensemble des décisions prises. Le modèle de l'agent générique résultant est, alors, une encapsulation des différentes décisions de l'entreprise dans un ensemble de modules en interaction. Le présent modèle présente les principales fonctions de l'entreprise telles que la gestion relation client (CRM), la gestion relation fournisseur (SRM), la transformation. De plus, il permet aussi de modéliser des scénarii de collaboration et d'implémenter des fonctions de mesures de performances.

Selon qu'on utilise ce modèle pour la simulation ou pour l'aide à la décision, il y existe deux façons de procéder : en mode « simulation », les décisions sont prises d'une façon automatisée par l'agent selon l'algorithme implanté ; en mode « aide à la décision », certaines décisions sont prises par les êtres humains tandis que le reste est récupéré par la connexion des modules respectifs au système réel de l'entreprise. Dans ce qui suit, nous allons exposer les différents modules, les décisions qu'ils encapsulent, ainsi que les informations nécessaires pour leur fonctionnement.

Relation client : C'est le module support de la communication aval de l'entreprise. Il se compose de deux sous modules dont le premier a pour rôle l'établissement des commandes avec les clients et l'autre veille sur leur livraison.

- **Négociation avec les clients :** La gestion des demandes clients repose sur un équilibre établi entre le profit du fournisseur et la satisfaction du client par l'offre. Pour établir cet équilibre, il est souvent nécessaire d'avoir recours à des négociations. Lors de ces négociations, le fournisseur effectue alternativement une « analyse de la demande » et des « soumissions de propositions ». Les décisions qu'il doit prendre pendant cette phase sont :

- Quelles propositions (en termes de quantité, délai et prix) soumettre en réponse à chaque consultation d'un client ?
- Quelles demandes (en termes de quantité, délai et prix) accepter parmi l'ensemble des demandes qu'il reçoit ?
- Quelles priorités accorder aux clients ?

Les deux premières décisions ci-dessus sont arrêtées sur la base des informations résultant de la planification et de la gestion des stocks. La décision qui concerne la mise à jour des connaissances sur les clients est un résultat des deux premières décisions relativement aux accointances qu'on possède avec eux.

- **Suivi livraison :** A chaque échéance, le fournisseur peut se trouver dans deux situations : soit il peut satisfaire toutes les demandes, soit il a rencontré des problèmes au niveau de la production et il ne dispose pas de la quantité suffisante. Il doit alors décider :

- A qui livrer ?
- Livrer en quelles quantités ? ce qui a pour but de rationner les livraisons des clients. On arrête les décisions ci-dessus en fonction des demandes en instance et de l'importance du client.

Planification : A partir des demandes commerciales prévues ou réelles, l'entreprise construit un plan directeur de production (PDP). Pour assurer la conduite de son système de production, elle doit générer une bonne planification des approvisionnements sur la base d'un calcul de besoins. De ce calcul, on génère des

ordres de fabrication (OF) pour piloter l'activité de transformation et des besoins en matières qui seront traités par la fonction d'approvisionnement. On doit répondre dans cette fonction aux questions suivantes :

- Est-ce que la demande peut être satisfaite ou non ? La réponse doit être donnée au module négociations.
- Quels produits finis fabriquer ? La réponse à cette question permet de construire le Plan Directeur de Production.
- Quelles quantités et pour quand ? Le calcul des besoins fixe les quantités à fabriquer et les approvisionnements nécessaires à cette fin.
- Avec quelles ressources ? Ceci détermine un ordonnancement.

Ceci nécessite une connaissance de la capacité de l'entreprise, de sa charge programmée, de ses stocks, des livraisons attendues et des délais d'approvisionnement et de livraison.

Approvisionnement : Le surstockage engendre des surcoûts qui affectent les coûts globaux de l'entreprise, tandis que la rupture des stocks provoque des retards dans la réalisation des commandes et peut conduire à des pénalisations. D'un autre côté, en réagissant sur l'approvisionnement, on peut provoquer des effets négatifs comme l'effet du «coup de fouet». L'optimisation des stocks est, donc, un facteur déterminant pour la performance de l'entreprise et, par conséquent, de toute la chaîne et constitue, de la, l'élément central du système de prise de décisions logistiques.

Chaque entreprise a sa stratégie de réapprovisionnement. Ce module lui permet de déployer sa stratégie de réapprovisionnement. A chaque fois que l'entreprise a de nouveaux besoins, ce module génère un ensemble de d'ordres d'achat en se référant aux règles induites par la stratégie suivie et en fonction de l'information sur la demande et des prix adoptés sur le marché et proposés par les fournisseurs. Plusieurs facteurs, autres que les besoins, agissent sur la décision d'approvisionnement. L'optimisation des coûts liés au stockage et au lancement de commandes en fonction des délais, définit généralement les fréquences d'approvisionnement. Les décisions viennent sous la forme d'ordres d'achats qui sont déterminés par les questions suivantes :

- Quelles matières approvisionner ?
- En quelles quantités ?
- Pour quand ?

Ces ordres d'achat sont par la suite transmis au module «relation fournisseur». Les informations concernant les livraisons attendues doivent également être transmises à la planification.

Relation fournisseurs : L'organisation de la logistique amont repose sur des relations avec les fournisseurs. Ceux-ci sont choisis, pour une commande donnée, après une négociation. Le suivi de ces commandes est ensuite effectué. Ces deux fonctions sont assurées par les deux sous-modules suivants :

- Négociation avec les fournisseurs : Avant de passer des commandes, il est possible que l'entreprise lance des consultations vers ses fournisseurs afin de recevoir leurs offres de prix, leurs délais... En se basant sur les accointances de l'entreprise avec ses fournisseurs on détermine :

- o Vers quels fournisseurs lancer des consultations ?
- o Quels fournisseurs (en termes de quantités, délais et prix) retenir ? Sur la base de l'évolution des affaires communes, l'entreprise se trouve en mesure de mettre à jour ses accointances avec ses fournisseurs. Pour chacun d'entre eux se pose la question :
- o Suis-je satisfait de ce fournisseur ?

Une fois établies, les commandes sont enregistrées et déléguées au module suivant pour leur suivi.

- Suivi d'approvisionnements : A chaque réception d'approvisionnement, un certain nombre de contrôles sont lancés pour décider :

- o Quelles matières accepter ?

Pour les retards de livraison on doit déterminer :

- o Quelles commandes relancer ?

Transformation : Pour parler de façon générique, ce module désigne une activité globale de transformation. Cette activité dépend de la nature de l'entreprise : production, distribution, transport, entreposage ou autre. Elle est pilotée par un programme issu de la planification que l'on cherche à respecter en utilisant les ressources disponibles et les stocks d'entrée pour produire les stocks de sorties. Il revient, donc, à générer un ordonnancement des tâches programmées. On essaye alors de respecter le programme issu de la planification et on effectue le suivi de la production.

Collaboration : Dans les nouvelles logiques de gestion de la chaîne logistique, les maillons de la chaîne cherchent à collaborer davantage avec leurs partenaires. Cependant, la collaboration n'est pas toujours facile à mettre en œuvre par refus de divulgation d'informations considérées comme confidentielles par l'entreprise. Celle-ci décide à propos de ses partenaires :

- Si elle collabore ou non ?
- Avec qui elle collabore ?

Et à propos de la confidentialité :

- Sur quoi porte la collaboration ? (quelles informations partager ?)
- Si elle est satisfaite de la collaboration ? (mise à jour des indicateurs de collaboration)

Ce module traduit dans un sens, notre souci de tenir compte également de la dimension verticale des chaînes logistiques (organisation structurelle des entreprises). Nous reconnaissons toutefois que la dimension horizontale (relation client-fournisseur) apparaît dans notre modélisation d'une manière beaucoup plus prépondérante.

Performance : Pour atteindre des objectifs d'amélioration de positions concurrentielles, les entreprises doivent disposer d'indicateurs qui leurs

permettent d'évaluer leurs compétences. Ces indicateurs, comme par exemple le taux de service ou le rendement, sont dits des indicateurs de performance et doivent être mis à jour en fonction des activités réalisées, des niveaux de stocks retenus, des coûts... Selon le problème étudié on décide : Quels indicateurs évaluer ?

3.3.3 Les informations partagées entre les modules

Les modules décrits précédemment sont en interaction et doivent partager un ensemble d'informations :

- l'ensemble des clients : une liste qui contient l'ensemble des clients de l'entreprise.
- les demandes acceptées : constituent le carnet de commandes de l'entreprise.
- l'ensemble des fournisseurs : une liste qui contient l'ensemble des fournisseurs de l'entreprise.
- les commandes lancées : une liste qui contient les quantités commandées par l'entreprise avec leurs dates de livraison
- les stocks en entrée : l'information qui indique le stock disponible pour la production.
- le débit de la fonction de transformation : indique la moyenne de production de l'entreprise.
- les stocks de sortie : l'information qui indique le stock disponible pour livrer ses clients.

4. APPLICATION AU JEU DE LA BIÈRE « BEER GAME »

4.1. Environnement de développement

Pour le développement de notre système multi-agents, nous avons choisi la plateforme JADE (Java Agent Development Framework). C'est une plateforme développée en Java et qui a été réalisée par CSELT (Groupe de recherche de Gruppo Telecom, Italie) pour faciliter la construction des systèmes multi-agents conformément à la norme FIPA. JADE comprend deux composants de base : une **plateforme agents compatible FIPA** et une **bibliothèque logicielle** pour le développement des agents Java. La plate-forme d'agent de Jade inclut tous les composants obligatoires qui contrôlent un SMA. Ces composants sont le **Canal de Communication entre Agents (ACL)**, le **Système de Gestion d'Agents (AMS)** et le **Facilitateur d'Annuaire (DF)**. Toute la communication entre agents est exécutée par messages FIPA ACL. Ces trois agents sont automatiquement créés et activés quand la plate-forme est activée.

JADE utilise l'abstraction {Comportement} pour modéliser les tâches qu'un agent peut exécuter et les agents créent des instances de leurs comportements selon leurs besoins et leurs capacités. Les comportements sont exécutés consécutivement par le même « thread ». Un planificateur (« scheduler ») exécuté par la classe de base {Agent} et caché au programmeur, exécute une politique de « round-robin » sans préemption entre tous les comportements disponibles dans la file des processus prêts. Le développeur d'agents doit étendre la classe {Agent} et implémenter les tâches spécifiques de l'agent

par une ou plusieurs classes {Comportement}, les instancier et les ajouter à l'agent. La classe {Agent} représente une superclasse commune pour tous les agents définis par l'utilisateur. Du point de vue du programmeur, la conséquence est qu'un agent JADE est simplement une classe Java qui étend la classe de base {Agent}. Cela permet à l'agent d'hériter un comportement fondamental caché (qui traite toutes les tâches liées à la plateforme, telles que l'enregistrement, la configuration, la gestion à distance, etc.), et un ensemble de méthodes qui peuvent être appelées pour implémenter les tâches spécifiques à l'agent, par exemple l'envoi des messages, l'utilisation des protocoles d'interaction standard, l'enregistrement sur plusieurs domaines, etc. De plus, il existe encore deux méthodes qui sont héritées pour gérer la file de comportements d'agents : « addBehaviour » et « removeBehaviour ». JADE inclut aussi quelques comportements prêts à être utilisés pour les tâches les plus communes dans la programmation des agents, tels que l'envoi et la réception des messages et la décomposition des tâches complexes en des agrégations de tâches plus simples.

4.2. Présentation du jeu de la bière

Le jeu de la bière a été développé au début des années 60 au MIT par Jay Forrester (Forrester, 1961). Il s'agit d'un jeu de simulation de rôles qui permet d'introduire d'une façon ludique la pensée systémique. Il s'agit d'une chaîne logistique composée d'un détaillant, d'un grossiste qui fournit le détaillant, d'un distributeur qui fournit le grossiste, et d'une usine à capacité infinie qui fournit le distributeur. Chaque membre de la chaîne a une capacité de stockage infinie et il existe un délai d'approvisionnement et un délai de transmission de l'information de la commande fixe. A chaque période une demande du client est transmise au détaillant. Il satisfait autant que possible ces demandes (et les éventuelles demandes en attente) à partir de son stock, enregistre les éventuelles pénuries et ensuite fait une commande au grossiste. Le grossiste satisfait la commande reçue (et les éventuelles commandes en attente), enregistre les éventuelles pénuries et décide quelle quantité commander au distributeur. Le distributeur et l'usine réitèrent le même processus. Une règle importante de ce jeu est que toutes les pénuries doivent être satisfaites dès que possible (les commandes ne sont pas perdues). De plus, l'objectif de chaque membre est de minimiser le coût total de la chaîne en essayant de maintenir un inventaire qui ne soit pas trop excessif, mais aussi d'éviter les ruptures de stock. En outre, la communication parmi les membres n'est pas permise. C'est-à-dire que chaque membre n'a accès qu'à la demande de son client immédiat. Chaque membre essaye d'estimer la demande du client en aval en observant l'information sur les commandes qu'il reçoit de son propre client. Il existe un délai de transport dans les livraisons des produits et un délai de production dans l'usine. Pendant que les flux de produits vont de l'amont à l'aval, l'information remonte dans la direction opposée

par les commandes. Il y a un délai de traitement de l'ordre, ou délai d'information, c'est-à-dire un laps de temps entre le moment où une commande est passée et le moment où l'ordre est reçu par le fournisseur. Dans le jeu classique de la bière, la demande du client est de 4 unités de bière par semaine pour les premières 4 semaines et chaque joueur doit commander quatre unités pour maintenir l'équilibre. Pour le reste du jeu, la demande du client est de 8 unités par période. A partir de la semaine quatre, les joueurs sont autorisés à commander la quantité qu'ils souhaitent. Chaque membre a son propre stock de sécurité initial de douze unités.

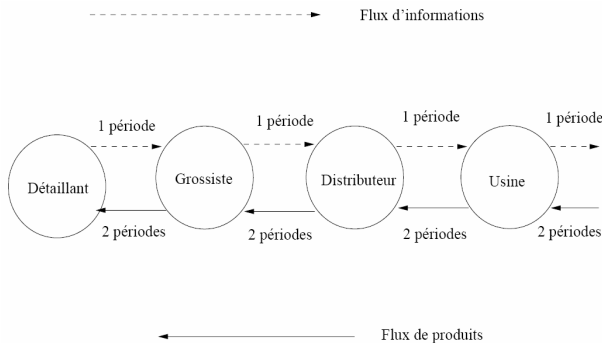


Figure 2. La chaîne logistique du « jeu de la bière »

La figure 2 représente les flux de produits et d'informations dans la chaîne logistique. Cette figure spécifie aussi les deux types de délais pour chaque membre. En jouant ce jeu, on remarque deux phénomènes conduisant à de très mauvaises coordinations. Tout d'abord l'interprétation des commandes reçues est délicate. Si le détaillant baisse ses commandes au grossiste, celui-ci peut considérer qu'il y a une baisse de la demande finale alors que le détaillant souhaitait seulement baisser son stock de sécurité. Le grossiste peut alors réduire ses propres commandes pour tenir compte de cette supposée baisse de la demande finale mais aussi abaisser son stock de sécurité et ainsi amplifier ce mouvement. Inversement, si la demande au détaillant augmente, il découvre que son stock va baisser et pourra peut être augmenter ses commandes au grossiste. Le stock du grossiste va alors diminuer à cause des commandes du détaillant et ce grossiste pourra tomber en rupture. Le détaillant obtiendra alors seulement une quantité partielle de sa commande. Un réflexe classique est alors de continuer à augmenter ses commandes au grossiste, sans penser que les quantités déjà commandées sont censées avoir été enregistrées. Le grossiste pourra avoir le même comportement et il augmentera alors ses ordres au distributeur.

Ces deux phénomènes d'amplification des stocks et/ou des ruptures sont très classiques. Bien que chaque joueur soit libre de prendre ses propres décisions, ces comportements émergent dans pratiquement chaque expérimentation du jeu, en démontrant précisément le rôle puissant du système d'information dans le comportement des joueurs.

Ce jeu est utilisé depuis pratiquement cinq décades maintenant pour étudier la dynamique des systèmes de

distribution dans différentes situations. Ainsi, Thomsen (1992) étudie le comportement hyper-chaotique que pourrait avoir un système de distribution de la bière dans certaines situations. Bando (1995) a même utilisé ce jeu pour étudier des phénomènes de circulation routière. Il étudie dans ce sens les fluctuations qui peuvent s'établir dans les vitesses d'une file de véhicules dont les conducteurs réagissent à la distance qui les sépare du précédent. Plus récemment, Kimbrough et al. (2002) ont implémenté un système multi-agents dédié au jeu de la bière. Ils définissent par la suite un algorithme génétique de génération de règles de lancement des commandes des différents agents. Ils montrent ainsi que des agents artificiels peuvent trouver assez rapidement de bonnes politiques qui réduisent l'effet du coup de fouet. Strozzi et al. (2007) ont également développé dans le cadre du jeu de la bière un algorithme génétique dans le but d'optimiser la politique de lancement des commandes lorsque la demande augmente.

4.3. Implémentation du jeu « Beer Game » dans notre SMA.

Pour implémenter ce jeu on a utilisé trois classes d'agents. Une classe d'agent « entreprise » basée sur le modèle développé précédemment et deux nouvelles classes simples « client » et « production » qui sont décrites ci-dessous :

1. l'agent « entreprise » est un agent intelligent construit à base du modèle développé précédemment. On a utilisé quatre instances de cet agent pour représenter les entreprises de la chaîne simulant ainsi le **détaillant**, le **grossiste**, le **distributeur** et l'**usine**.
2. On utilise une instance de la classe d'agent « client » pour simuler la demande du marché. Cette instance d'agent lance au début de chaque tour une commande vers le détaillant selon des règles définies au début de la simulation dans un tableau de taille égale au nombre de tours à simuler.
3. la classe d'agent « production » représente une entité avec une capacité de production et de stockage infinie. Un agent instance de cette classe reçoit, à chaque tour, une demande de l'usine et lui fournit ce qu'elle a commandé dans les délais définis dans les paramètres de la simulation. Enfin, pour la synchronisation du jeu, il signale à la fin de son traitement à l'agent « client » qu'il peut commencer un nouveau tour.

Pour définir le comportement global de l'agent « entreprise » on a implémenté, au niveau de chaque module, au moins un algorithme selon le besoin. Pour les cas où l'on a besoin de simuler plusieurs comportements, on a implémenté plusieurs alternatives comme dans le cas du module d'approvisionnement. Les modules définis dans le modèle de base de l'agent « entreprise » sont implémentés au niveau de la plateforme de développement par des comportements (« behaviours »):

1. Négociation avec le client : d'après les règles du jeu, toutes les demandes sont acceptées et la négociation aboutit donc systématiquement à une acceptation.
2. Livraison du client : à partir du stock disponible on sert tout ce qu'on peut servir. Les arriérés seront livrés dès que possible.
3. Planification : la planification est constituée par un calcul de besoins. Le besoin est calculé pour la semaine en cours par l'algorithme suivant : somme (demandes du client) - somme (livraisons du fournisseur) - stock + cumul demandes non satisfaites.
4. Approvisionnement : plusieurs politiques d'approvisionnement (avec ou sans collaboration) sont implémentées afin d'analyser leurs répercussions en termes d'amplification de la demande.

5. Négociation avec le fournisseur : le fournisseur de chaque client accepte, conformément aux règles du jeu, toutes les demandes et la négociation aboutit, dans ce cas, automatiquement à une acceptation.
6. Réception des livraisons : ce module reçoit sous forme de messages les demandes livrées par le fournisseur. Ces livraisons effectives seront, donc, comptabilisées dans le stock pendant le tour suivant. On simule ainsi le contrôle de la matière reçue.
7. Transformation: la transformation des produits reçus nécessite un délai égal à zéro.

L'ensemble des agents décrits précédemment forme le corps de notre simulateur.

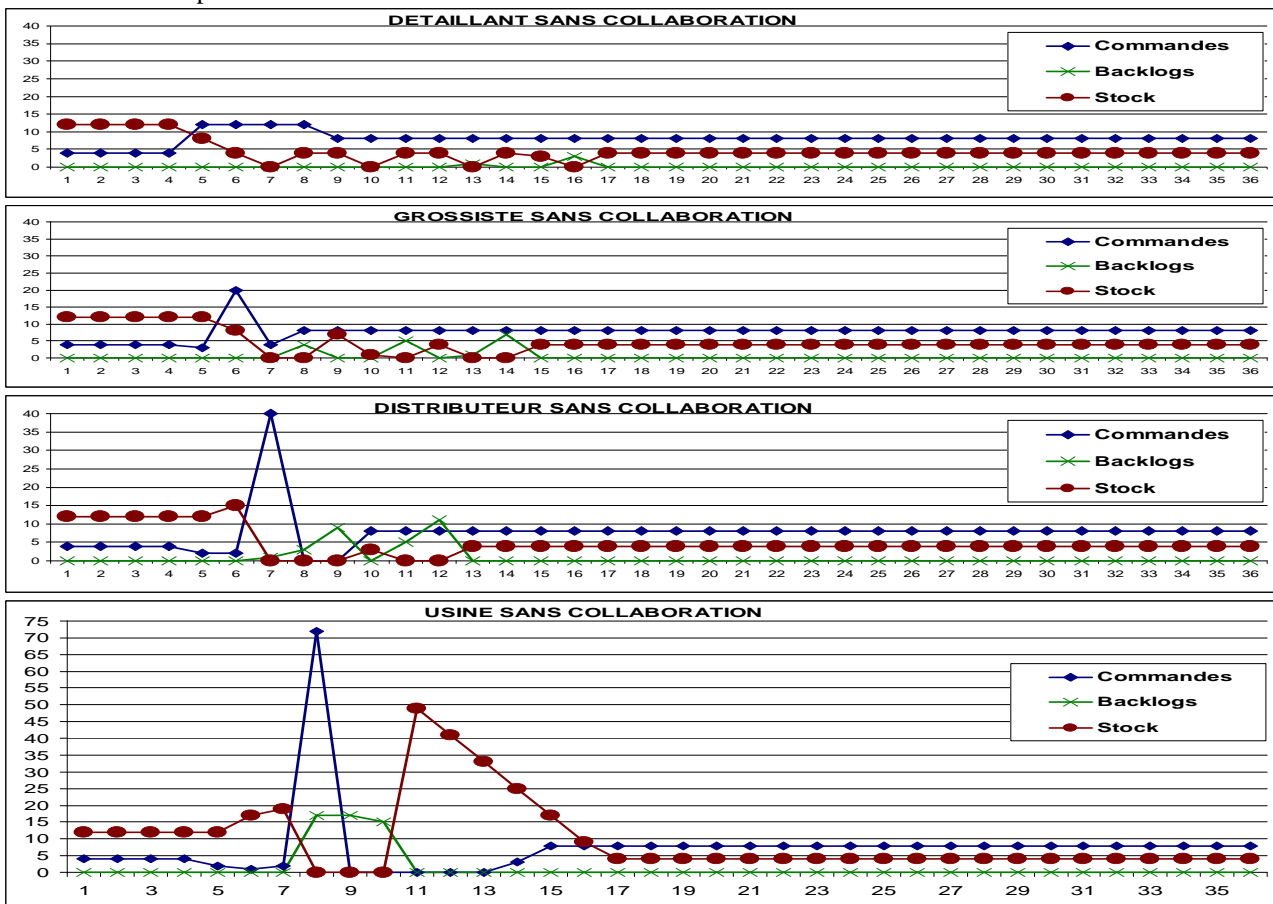


Figure 4. Résultats de la politique d'approvisionnement à dates fixes et quantités variables sans collaboration

4.4. Simulation

On a étudié par simulation l'impact de plusieurs politiques d'approvisionnements sur l'amplification de la demande. Nous avons tout d'abord comparé les résultats obtenus avec le SMA avec ceux obtenus « manuellement » en faisant dérouler le jeu selon les mêmes règles. Nous avons obtenu les mêmes résultats ce qui valide en première approche l'implémentation du jeu sur Jade. Nous avons voulu par la suite utiliser notre SMA pour simuler plusieurs politiques d'approvisionnement.

Nous avons ainsi simulé la politique d'approvisionnement à dates fixes et quantités variables selon plusieurs règles de gestion ainsi que la politique (s, S). Pour chacune des politiques, nous avons comparé les résultats obtenus dans un premier cas sans collaboration et dans un deuxième cas avec collaboration sous forme de partage d'informations. **Pour des raisons de concision nous ne détaillerons que les résultats obtenus par la politique de réapprovisionnement à dates fixes et quantités variables.**

4.4.1 Politique de réapprovisionnement à dates fixes et quantités variables sans collaboration

Cette politique consiste à mesurer le niveau de stock à une périodicité fixe appelée période de révision et à le

ramener par une commande de réapprovisionnement à un niveau fixe dit niveau de recomplètement. **La demande du marché sera égale à 4 unités pendant les quatre premières périodes et 8 unités pour toutes les périodes suivantes.** La simulation de cette politique donne les résultats de la figure 4. Nous avons tracé l'évolution dans le temps (36 périodes), pour chaque agent, des commandes lancées à son fournisseur, du stock et des arriérés (la demande que reçoit chaque agent n'a pas été tracée pour des raisons de lisibilité des courbes). Dans la figure 4, les courbes sont remarquablement fluctuantes au voisinage de la période d'augmentation de la demande du marché (période 4).

Cette simulation montre une amplification de la demande et donc des commandes lancées qui s'accroît en remontant la chaîne vers l'usine. Les courbes des commandes lancées oscillent entre 4 et 12 unités pour le détaillant, 3 et 20 unités pour le grossiste, 0 et 40 unités pour le distributeur et 0 et 72 unités pour l'usine. On peut donc conclure qu'une variation de 8 unités chez le détaillant engendre une variation très importante de 72 unités au niveau de l'usine. Ce qui est avantageux pour cette politique, est qu'elle arrive à éviter les pénuries.

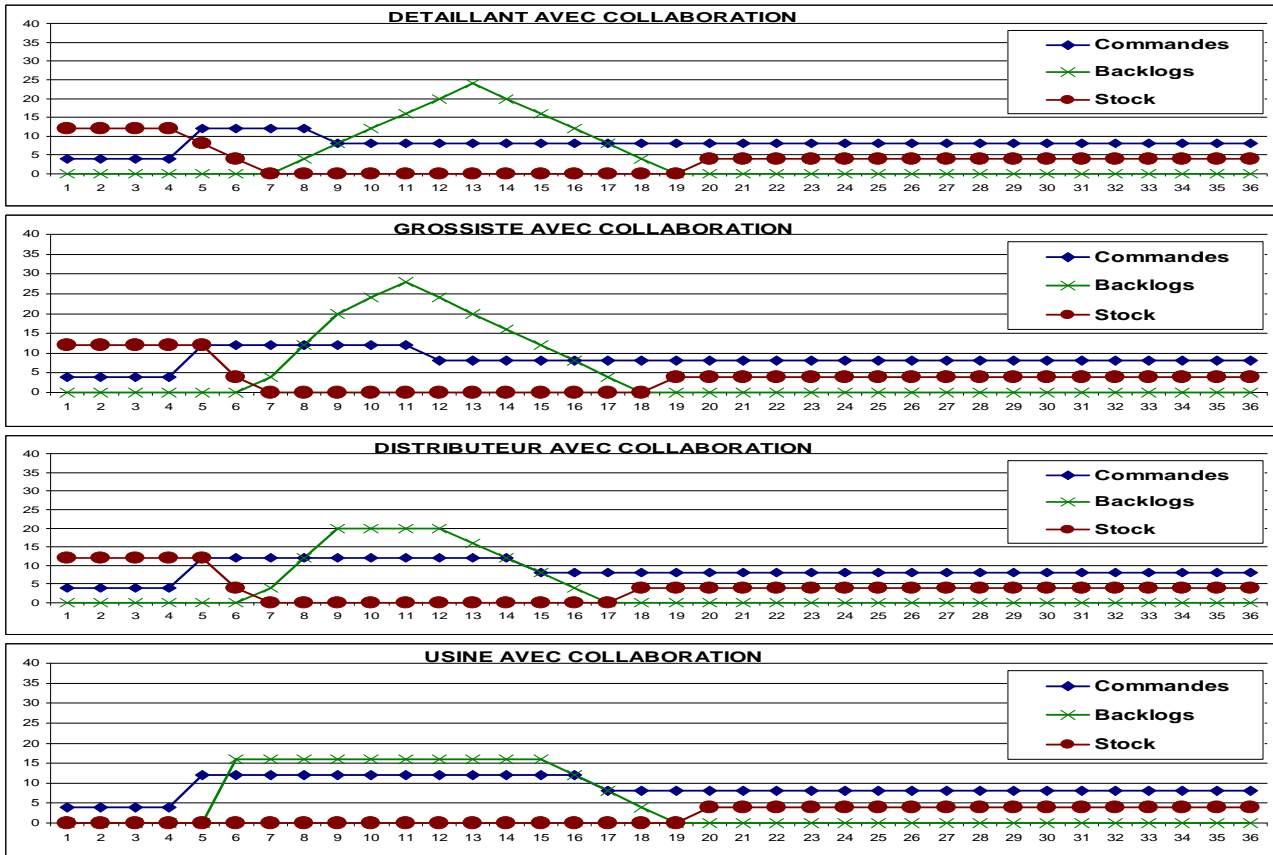


Figure 5. Résultats de la politique d'approvisionnement à dates fixes et quantités variables avec collaboration

4.4.2 Politique de réapprovisionnement à dates fixes et quantités variables avec collaboration

Pour diminuer l'amplification de la demande, nous proposons de fixer une limite maximale que les commandes lancées ne peuvent dépasser de façon à ce que cette limite ne soit pas trop grande pour atténuer l'effet du coup de fouet et ne soit pas trop petite pour pouvoir limiter les ruptures de stock. La meilleure façon pour déterminer cette limite est de se baser sur la demande du marché, ce qui nécessite alors la collaboration des maillons en propageant instantanément cette information. On choisit dans notre cas de fixer la commande maximale à 1.5 fois la taille de la demande du marché. Les résultats de la simulation de cette nouvelle politique sont donnés par la figure 5. On peut remarquer qu'on est parvenu à éliminer les fluctuations sur les courbes des commandes sans laisser trop longtemps des backlogs. On pourrait encore améliorer

les résultats en faisant varier la limite maximale de commande et des simulations successives pour trouver le meilleur compromis entre le stock et les backlogs.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce travail de recherche est de pouvoir proposer un outil assez simple qui permet de modéliser d'une manière générique une chaîne logistique dans le but de simuler et d'évaluer des politiques d'approvisionnement. Notre choix s'est porté sur l'utilisation des systèmes multi-agents qui présentent une grande souplesse pour la modélisation des organisations et l'implémentation des outils de simulation et d'aide à la décision. Pour cela, on a considéré la chaîne comme un ensemble de nœuds qui ont en commun une architecture définie par des besoins de communication, de planification et de mesure. Nous avons construit tout

d'abord, un modèle générique d'entreprise qui nous permet de modéliser l'ensemble de maillons dans une chaîne et on a essayé d'appliquer ce modèle sur l'exemple du jeu de la bière.

Pour valider et illustrer notre modèle, nous avons implémenté notre modèle, en utilisant la plateforme JADE, pour représenter une chaîne logistique du jeu de la bière. Sur le modèle obtenu, on a tout d'abord vérifié que le comportement de notre SMA est identique au déroulement « manuel » du jeu. Nous avons par la suite simulé la politique d'approvisionnement à dates fixes et quantités variables ainsi que la politique (s, S) sans la collaboration des différents partenaires de la chaîne. On a montré que les réactions des acteurs de façon isolée étaient à l'origine d'une remarquable distorsion de la demande engendrant ainsi l'effet « coup de fouet ». Par la suite, en s'appuyant sur l'analyse des résultats obtenus, on a pu apporter des améliorations à ces politiques d'approvisionnement en introduisant la collaboration sous forme de partage d'informations facilité par des mécanismes de communication. On a pu ainsi réduire sensiblement l'amplification de la demande pour ces deux politiques d'approvisionnement.

Ce travail ne représente qu'une première étape, nous continuerons dans une seconde étape en modélisant des chaînes logistiques réelles dans le but, d'une part, d'exploiter au mieux la richesse de nos agents et, d'autre part, de simuler et d'évaluer des politiques d'approvisionnement et permettre ainsi une aide à la décision. Le but à terme de ce projet est de pouvoir proposer un outil simple et configurable qui permet la modélisation de différentes chaînes logistiques à l'aide de SMA.

REFERENCES

- Bando, M., K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, 1995. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical Review*, E51, p. 1035-1042.
- Barbuceanu, M. and M. Fox, 1995. The architecture of an agent building shell. *Intelligent Agents II*, Springer-Verlag, LNAI 1037, p. 235–250.
- Bournez, C., and O. Gutknecht, 2001. Modèle de contrôle par émergence de coordinations dans un réseau de contrats multiagents. *Journées Francophones de l'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents*, Montreal, Canada.
- Cloutier, L., J.M. Frayret, S. D'Amours, B. Espinasse and B. Montreuil, 2001. A commitment-oriented framework for networked manufacturing coordination. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14, p. 522–534
- Fox, M.S., J.F. Chionglo and M. Barbuceanu, 1993. *The integrated supply chain management*. Department of Industrial Engineering, Internal report of the E.I. Laboratory, University of Toronto, Canada.
- Govindu R. and R.B. Chinnam, 2007. MASCF: A generic process-centered methodological framework for analysis and design of multi-agent supply chain systems. *Computers & Industrial Engineering*, in press.
- IBM Research, 2003. BPMAT: A business process modeling and analysis tool, <http://www.research.ibm.com/pdtr/bpmat.htm> (accessed Sept. 19, 2003).
- Kimbrough, S.O., D. Wu and F. Zhong, 2002. Computers play the Beer Game: Can artificial agents manage supply chains? *Decision Support Systems*, 33, p. 323-333.
- Kwon, O., G. P. Im and K. C. Lee, 2007. MACE-SCM: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and demand uncertainties, *Expert Systems with Applications*, 33, p.690–705
- Liang, W.Y. and C.C. Huang, 2006. Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain. *Decision Support Systems*, 42, p. 390–407
- Maturana, F., W. Shen and D. Norrie, 1999. Metamorph: an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing. *International Journal of Production Research*, 37, p. 2159–2173
- Monteiro, T., D. Roy and D. Ancaix, 2007. Multi-site coordination using a multi-agent system, *Computers in Industry*, 58, p. 367–377.
- Moyaux, T., B. Chaib-draa, and S. D'Amours, 2006. *Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview*. MultiAgent-Based Supply Chain Management, B. Chaib Draa and J.P. Müller, Springer. Chapter 1.
- Sadeh, N., D. Hildum, D. Kjenstad and A. Tseng, 1999. MASCF: An agent-based architecture for coordinated mixed-initiative supply chain planning and scheduling. *3rd International Conference on Autonomous Agents (Agents' 99)*.
- Shen, W., Q. Hao, H.J. Yoon and D. H. Norrie, 2006. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, 20, p. 415–431.
- Strozzi, B., J. Bosch, and J.M. Zaldivar, 2007. Beer game order policy optimization under changing customer demand. *Decision Support Systems*, 42, p. 2153–2163.
- Thomsen, J.S., E. Mosekilde, and J.D. Sterman, 1992. Hyperchaotic phenomena in dynamic decision making. *Systems Analysis Modeling Simulation*, 9, p. 137-156.
- Walsh, W.E., 2001. *Market protocols for decentralized supply chain formation*. Thèse de Doctorat, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Wang, M., J. Liu, H. Wang, W.K. Cheung and X. Xie, 2007. On-demand e-supply chain integration: A multi-agent constraint-based approach. *Expert Systems with Applications*, in press.
- Zarandi, F., M.H., M. Pourakbar and I.B. Turksen, 2007. A Fuzzy agent-based model for reduction of bullwhip effect in supply chain systems. *Expert Systems with Applications*, in press.