
Thierry Moyaux
Groupe DAMAS

Juillet 2002

Techniques multiagents pour la réduction
de l'amplification de la demande
dans une chaîne logistique :
application à l'industrie forestière

Directeur :

Prof. Brahim Chaib-draa

Co-directeurs :

Prof. Sophie D'Amours

Prof. Bernard Espinasse

Proposition de thèse

Doctorat en informatique
Département d'informatique et de génie logiciel
Université Laval, Ste-Foy, PQ, Canada

Table des matières

1	Introduction	4
2	Problématique	7
2.1	Survol des problèmes industriels	7
2.2	Problématique générale de l'effet coup de fouet	10
2.3	But et objectifs	12
3	Éléments de base et revue de littérature	13
3.1	Causes et conséquences du coup de fouet	13
3.2	Gestion d'une chaîne logistique	18
3.2.1	Centralisation de l'information, VMI/CRP et CPFR	18
3.2.2	Techniques décentralisées de gestion de chaînes logistiques	19
3.3	Technologies de l'information pour la gestion des chaînes logistiques	20
3.3.1	Objectifs des technologies de l'information	21
3.3.2	Mise en œuvre des technologies de l'information dans la chaîne logistique	22
3.3.3	Application des technologies de l'information dans la chaîne logistique	26
3.3.4	Vers des solutions avancées pour les chaînes logistiques	29
3.3.5	Les systèmes multi-agents dans la chaîne logistique	31
3.4	La chaîne logistique de l'industrie forestière comme exemple de chaîne logistique	36
3.5	Le jeu de la bière (<i>Beer Game</i>)	38
3.6	Discussion	41
4	Généralisation de l'effet coup de fouet	42
4.1	Une vision de l'effet coup de fouet élargie aux systèmes distribués	42
4.2	Réduction de l'effet coup de fouet dans le cas général	44
5	Propositions pour réduire l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique	47
5.1	Caractérisation de la solution attendue dans une chaîne logistique	47
5.2	Mesure instantanée de l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique	49
5.3	Réduction de l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique par coordination décentralisée	52
5.4	Contributions pour les systèmes multiagents	58
6	Mise en œuvre dans l'industrie forestière	59
6.1	Modélisation d'une chaîne logistique de l'industrie forestière	60
6.2	Simulation d'une chaîne logistique de l'industrie forestière	63
6.2.1	Squelette du simulateur	64
6.2.2	Génération de l'effet coup de fouet	66
6.2.3	Fonctionnement de l'agent-entreprise générique	67
6.3	Installation physique	70
7	Planning de travail	71
8	Collaborations	72
9	Schéma de la thèse	73

Table des figures

1	Exemple de chaîne logistique [Swaminathan et al., 1998].	8
2	L'effet coup de fouet [Lee et al., 1997a].	11
3	Niveau 1 du modèle SCOR [Supply Chain Council, 2001].	12
4	Triangle de complexité de la chaîne logistique [Wilding, 1998].	16
5	Imbrication de la centralisation de l'information, de VMI et de CPFR.	19
6	Objectifs et moyens de gestion de la chaîne logistique [Simchi-Levi et al., 2000].	21
7	Support d'une chaîne logistique par les technologies de l'information (d'après [Quinn et al., 2000] et [Berger, 2000]).	29
8	Approche orientée-agent contre technologies conventionnelles [Parunak, 1996]. .	33
9	Exemples d'utilisation d'agents dans la chaîne logistique.	35
10	Structure du jeu de la bière (<i>Beer Game</i>) [Haartveit and Fjeld, 2002].	39
11	Comparaison des jeux de la bière du MIT et de Columbia [Kimbrough et al., 2001].	40
12	Structure du jeu du bois divergent [Haartveit and Fjeld, 2002].	40
13	Structure du jeu du bois intégré [Haartveit and Fjeld, 2002].	41
14	Lutte contre l'effet coup de fouet par homogénéisation temporelle.	46
15	Mécanisme d'impôts et de subventions.	53
16	Système de gestion de la production PAC [Buzacott and Shanthikumar, 1992]. .	57
17	Partie de jeu du bois : commandes passées dans la chaîne du papier.	60
18	Partie de jeu du bois : commandes passées dans la chaîne des planches.	61
19	Fonctionnement de l'agent entreprise générique.	62
20	Organisation des agents dans le simulateur.	62
21	Architecture logicielle d'un agent.	64
22	Hierarchie de classes du simulateur.	66
23	Répartition des variables dans un agent-entreprise.	68
24	Règles à effectuer par chaque agent.	70
25	Planning de travail.	72

Résumé

Dans le contexte actuel de grande compétitivité entre les entreprises, on parle de plus en plus de chaîne logistique, une vision d'entreprises récemment introduite en vue de développer l'avantage concurrentiel des entreprises qui la forment. Une chaîne logistique est l'ensemble des entreprises qui participent à la mise sur le marché d'un produit ; une telle chaîne comprend typiquement les fournisseurs de matières premières, les usines de transformation et d'assemblage et le réseau de distribution (distributeurs, grossistes, détaillants, etc.). Au niveau de l'entreprise, les planifications de la production, de la distribution et des stocks sont des problèmes difficiles en eux-mêmes à cause de nombreuses contraintes. Le problème devient plus difficile lorsque ces planifications sont faites ensemble dans une même entreprise, puis quand les planifications de plusieurs entreprises d'une chaîne logistique sont réalisées conjointement. En plus de ces problèmes de planification dans la chaîne logistique se superposent d'autres problèmes telle que l'amplification de la demande, aussi appelée l'effet coup de fouet.

L'*effet coup de fouet* se manifeste dans une chaîne logistique de la façon suivante : les clients achètent régulièrement des produits dans chaque point de vente, lequel point de vente commande assez irrégulièrement à son fournisseur. Le phénomène est récursif entre chaque échelon de la chaîne logistique, c'est à dire que chaque entreprise amplifie les irrégularités entre les commandes reçues du client et émises vers le fournisseur. Finalement, au bout de la chaîne logistique, le fournisseur de matières premières reçoit des commandes totalement aléatoires. Ce problème a été identifié et expliqué en 1958 par un chercheur nommé Forrester. Le but de notre recherche vise à réduire, voire à éliminer, cet effet coup de fouet néfaste à bien des égards (augmentation du niveau des stocks, réduction du service rendu aux clients, etc.)

La solution que nous proposons au coup de fouet repose sur une généralisation du problème à l'ensemble des systèmes distribués : dans tous ces systèmes, les fluctuations pourraient être évitées en les homogénéisant dans le temps par lissage ou en les homogénéisant dans l'espace par répartition des pics et des creux entre les différentes entités du système. Dans cette recherche, nous nous concentrons plus spécifiquement sur l'homogénéisation temporelle que nous instancions au cas de la chaîne logistique. Cette instanciation nous a amené à proposer un mécanisme à base : (1) *d'impôts*, de manière à amener les entreprises à réduire leurs commandes quand elles seraient tentées de commander trop et (2) *de subventions*, de manière à inciter les entreprises à sur-commander par rapport à leurs besoins lors des creux de la demande. Il s'agit donc bien d'une homogénéisation temporelle dans la mesure où un lissage des commandes est réalisé. Ce lissage atténue les excès et les manques de demandes par rapport au niveau désiré par le marché. Pour déterminer ce niveau cible, une quantification de l'effet coup de fouet est proposée.

Le mécanisme à base d'impôts et de subventions proposé est ensuite opérationnalisé par un système de jetons qui constitue un mécanisme de coordination multiagent décentralisé. De cette manière, nous proposons bien une approche multiagent (dans le sens où chaque entreprise est considérée comme un agent) pour la réduction de l'amplification de la demande. Finalement, nous proposons de valider le mécanisme de coordination entre agents, via les jetons, en le simulant sur une chaîne logistique réelle : la chaîne forestière. Cette validation repose sur un modèle de chaîne logistique basé sur le jeu du bois et sur un modèle d'entreprise inspiré du modèle proposé par le *Supply Chain Council*.

1 Introduction

Il est beaucoup plus facile de donner les qualités permettant à une entreprise de réussir que de donner l'origine de ces qualités. A titre d'exemple, il est facile de dire qu'un coureur

gagne une course parce qu'il est rapide, qu'il est en bonne condition physique ou encore qu'il suit une bonne stratégie. Il est toutefois plus difficile de déterminer l'origine de ces qualités. Le problème est similaire pour une entreprise : elle conquiert des marchés parce qu'elle est compétitive, mais cette constatation n'oriente pas l'action en vue de la rendre plus compétitive [Lakhal et al., 1998]. La notion de *chaîne logistique* apparaît comme la voie la plus prometteuse pour développer la compétitivité d'une entreprise face à la concurrence. Une chaîne logistique peut se définir comme l'ensemble des processus à l'intérieur et entre les entreprises qui produisent et livrent des biens et des services aux clients [Bovet and Martha, 2000]. En effet, il semble que faire fonctionner ensemble d'une part, tous les composants d'une entreprise et d'autre part, toutes les entreprises d'une même chaîne logistique, permette de développer la position concurrentielle d'une entreprise de cette chaîne. Au niveau des composants d'une entreprise, les décisions concernant la planification de la production, de la distribution et des stocks sont faites indépendamment les unes des autres dans la majorité des organisations. Ces processus de prise de décisions sont complexes en eux-mêmes, car soumis à de multiples contraintes, telles que les capacités à ne pas dépasser ou les législations nationales à respecter. De plus, quoique traitée individuellement, chaque décision concernant l'un des trois types de planification (production, distribution ou stockage) dépend des deux autres types, et considérer conjointement ces trois activités de planification permettrait de les synchroniser, donc d'améliorer l'intégration des diverses composantes de l'entreprise. Lorsque l'on étend ensuite le problème à la gestion du groupe d'entreprises composant une chaîne logistique, les problèmes se compliquent encore : non seulement, chaque entreprise doit faire face à ses propres problèmes de gestion de la production, de la distribution et du stockage, mais en plus ces problèmes doivent être résolus en tenant compte des résolutions du même type faites dans les autres entreprises. Enfin, des problèmes propres à la chaîne logistique apparaissent ; nous nous intéressons dans ce papier à l'un de ces problèmes : l'effet coup de fouet.

L'*effet coup de fouet* est une déformation de la demande du marché lorsque cette demande se propage d'entreprise en entreprise : l'information de la demande est transmise par le point de vente à ses fournisseurs sous forme de commande, puis elle va de ces fournisseurs vers leurs fournisseurs respectifs, etc. Concrètement, le problème de l'effet coup de fouet est que le point de vente rencontre une demande du marché quasi-constante, alors qu'il commande à son fournisseur des quantités variant plus et de façon moins régulière que cette demande. Puis cette déformation se propage et s'amplifie récursivement de fournisseur en fournisseur. En bout de chaîne (au niveau du fournisseur de matières premières), le motif (*pattern*) des commandes passées ne ressemble plus du tout à la demande du marché. Quoique les manifestations de l'effet coup de fouet varient d'un secteur à l'autre [Fjeld, 2001], il semble que cet effet se manifeste dans toute chaîne logistique. Ce problème est gênant pour les entreprises, car il induit une réduction de la réactivité permettant aux organisations de faire face aux changements imprévisibles dans leur environnement ainsi qu'une augmentation de la taille des stocks. Ces deux conséquences provoquent à leur tour des effets néfastes : des opportunités sont perdues du fait de l'immobilisation financière de la valeur des produits stockés, le maintien des stocks est coûteux (électricité, chauffage, personnel, location de l'entrepôt, etc.), le service au client est réduit, la production est plus difficile à ordonnancer dans chaque entreprise... L'effet coup de fouet force les entreprises à collaborer, car celles qui génèrent le coup de fouet (entreprises en aval de la chaîne logistique) ne sont pas celles qui en subissent les conséquences (amont de la chaîne). L'effet coup de fouet a été mis en évidence par Forrester [Forrester, 1958] en 1958. La seconde grande contribution est venue bien plus tard et est due à Lee, Padmanabhan

et Whang [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b]. Grâce à ces travaux, l'effet en lui-même, ses causes, ses conséquences et des solutions pour le résoudre sont connus. Mais tout cela reste théorique : il existe sûrement un fossé entre la théorie et la pratique, puisque cela fait maintenant plus de 40 ans que Forrester a identifié et expliqué ce problème et malgré plusieurs papiers académiques publiés entre-temps, l'effet se produit encore dans beaucoup de chaînes logistiques [Taylor, 2001]. C'est pourquoi nous proposons dans ce papier un mécanisme à mettre en place dans une chaîne logistique. Ce mécanisme sert à coordonner le passage de commandes des entreprises de façon distribuée.

L'effet coup de fouet est un *problème de prise de décision concernant les questions « quand commander ? » et « combien commander ? »*. Répondre à ces deux questions n'est pas trivial car cette réponse influe non seulement sur les planifications de la production, de la distribution et des inventaires de l'entreprise qui passe la commande, mais aussi sur toutes les autres entreprises de la chaîne logistique. Chaque décision doit se prendre en coordination avec le maximum d'entreprises de la chaîne logistique, car son impact va se faire ressentir dans toute la chaîne logistique. L'effet coup de fouet et son contexte sont présentés dans la section 2. Une revue de littérature et des éléments de base utiles à cette recherche complètent ensuite ces présentations dans la section 3. L'idée centrale de l'approche que nous proposons pour réduire l'effet coup de fouet consiste à voir la chaîne logistique comme *un cas particulier de système distribué* dans lequel des fluctuations se propagent en s'amplifiant sur les liens reliant les entités du système. Ce système peut être une chaîne logistique, un système informatique (réseaux d'ordinateurs, système multiagent, etc.), l'économie d'un pays, un réseau routier... Les fluctuations qui se propagent dans ce système affectent une grandeur qui change selon le système considéré : concernant la chaîne logistique, cette grandeur qui fluctue est la quantité commandée par chaque entreprise à ses fournisseurs. Pour empêcher cette grandeur inter-entité (grandeur externe) de varier, on va « mettre de l'huile » lorsque le système est « grippé », c'est à dire lorsque la grandeur externe est trop basse par rapport à sa valeur désirée (typiquement, la valeur désirée est le niveau moyen de la grandeur externe) et on va « mettre des grains de sable » lorsque le système « s'emballe », c'est à dire lorsque la grandeur externe est trop grande. Plus techniquement, ce mécanisme fonctionne par le couplage de la grandeur externe avec une grandeur interne à chaque entité : c'est cette grandeur interne qui va fluctuer de façon à maintenir constante la grandeur externe. Cette généralisation de l'effet coup de fouet à l'ensemble des systèmes distribués est décrite dans la section 4. Dans le cas de la chaîne logistique, la grandeur interne que nous avons choisie est de l'argent qui rentre ou sort d'un compte en banque selon les besoins : l'huile du mécanisme peut donc être assimilé à une subvention et le sable à un impôt. Enfin, ce mécanisme d'huile et d'impôt pourrait être implémenté entre chaque paire de client/fournisseur : l'argent ferait des va-et-vients entre une entreprise et son fournisseur ou entre cette même entreprise et son client. Au lieu de cela, nous proposons d'implémenter ce mécanisme avec un système de jetons afin de faire circuler l'argent sur toute la chaîne logistique et ainsi créer une unité dans la coordination de la chaîne. L'avantage d'avoir cette unité est que l'argent peut circuler sur toute la chaîne logistique, ce qui permet de concentrer toute « l'huile » ou tous les « grains de sable » de la chaîne logistique entre les entreprises qui en ont besoin. Cette idée d'huile et de grains de sable appliqué au coup de fouet dans une chaîne logistique et son opérationnalisation par un système de jetons sont décrits dans la section 5. Enfin, la validation expérimentale sur un modèle de chaîne logistique de l'industrie forestière et une mise en place réelle de ce système de jetons sont présentés dans la section 6.

2 Problématique

Au niveau des marchés, ainsi que de la société en général, il s'est produit une grande évolution au cours des dernières décennies. En effet, le marché est passé d'une taille quasi-infinie avec un petit nombre de compétitions locales, à un marché devenu à la fois mondial et presque saturé. Il règne une grande compétitivité sur ce marché et les exigences de ses consommateurs évoluent constamment vers des produits de meilleure qualité et moins chers. De plus, l'explosion des progrès technologiques, la compétition entre les entreprises et les attentes des consommateurs poussent à raccourcir le cycle de vie des produits. L'aspect le plus connu des changements actuels est la mondialisation qui se met en place. La mondialisation redéfinit le contexte concurrentiel mondial, et les entreprises doivent s'adapter à ce nouveau contexte si elle ne veulent pas voir se détériorer leur position concurrentielle [Martel, 2001]. Enfin, les législations et les goûts des consommateurs imposent la prise en compte de considérations écologiques lors de la production (utilisation des ressources naturelles, gestion des déchets, etc.) et de ce qu'il advient aux produits après avoir quitté le point de vente (recyclage, etc.). Tout cela rend *l'environnement de l'entreprise de plus en plus dynamique*. Seules les entreprises qui s'en accommoderont connaîtront la réussite économique sur le long terme et pourront exploiter les opportunités qui se présentent à elles en s'adaptant rapidement aux changements. De ce fait, les entreprises sont aujourd'hui obligées de trouver des solutions originales et toujours plus efficaces pour conduire le processus qui amène leurs produits et leurs services du bureau d'études jusqu'aux magasins des détaillants où ils sont offerts aux clients finaux. Les exigences d'un environnement féroce concurrentiel font qu'il est impératif pour les entreprises non seulement de tirer parti de toutes les sources d'efficacité de leurs systèmes, mais aussi de redéfinir et de rationaliser le fonctionnement de leur *chaîne logistique*, pour pouvoir mettre en place un réseau totalement efficace, depuis l'achat des matières premières jusqu'au consommateur [Poirier and Reiter, 2001].

2.1 Survol des problèmes industriels

Le concept de chaîne logistique représente l'ensemble des entreprises qui conçoivent, machinent, trouvent des débouchés, fabriquent et distribuent des produits et des services aux clients finaux [Muckstadt et al., 2001]. Nous utilisons dans ce papier le terme chaîne logistique pour faire référence au terme consacré anglais *supply chain*, mais d'autres traductions existent, telle que chaîne d'approvisionnement. Comme l'illustre la figure 1 [Swaminathan et al., 1998], une chaîne logistique est donc le fruit du réseautage des activités entre plusieurs entreprises : les fournisseurs expédient des produits aux usines qui les transforment avant de les envoyer aux centres de distribution, lesquels les dispatchent vers les détaillants. Mais ceci est une vue de haut niveau : dans la réalité, les chaînes logistiques ont une structure bien plus complexe, puisqu'elles sont souvent reliées à d'autres chaînes logistiques [Backx et al., 1998] et une analyse significative nécessite l'ajout de détails considérables concernant les activités et les processus de transformation, les ressources et les capacités, les coûts décrivant les installations et les liens de transport [Shapiro, 2000]. De nos jours, le terme de chaîne logistique s'applique à de petits regroupements d'entreprises travaillant en *partenariat*. La collaboration dans une chaîne logistique peut se définir comme l'ensemble des activités réalisées par et entre les partenaires d'une chaîne logistique qui touchent aux créations rentables, opportunes et fiables, ainsi qu'aux mouvements de matières pour satisfaire aux besoins des clients [Muckstadt et al., 2001].

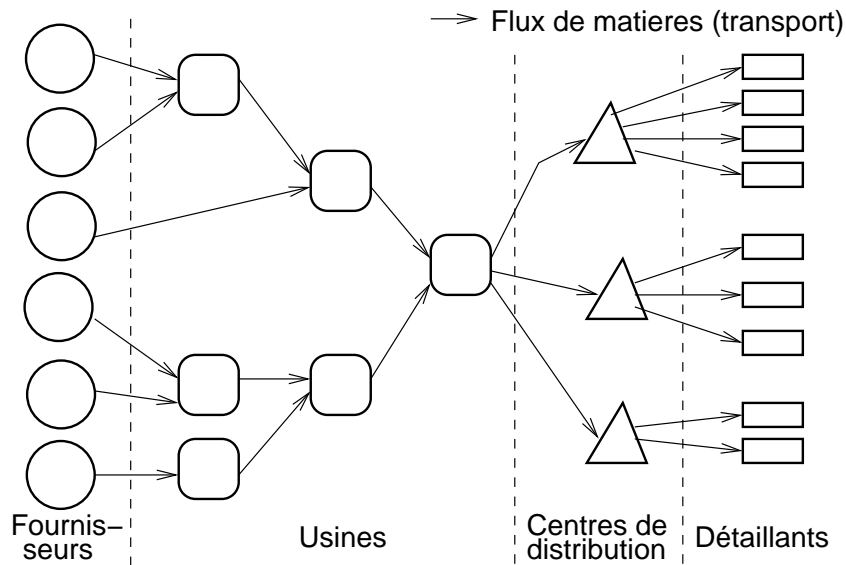


FIG. 1 – Exemple de chaîne logistique [Swaminathan et al., 1998].

Ces regroupements sont rarement constitués de plus qu’une entreprise centrale, ses fournisseurs et ses clients directs. Il semble qu’à l’avenir, la recherche d’un fonctionnement optimal des chaînes logistiques va s’opérer, ce qui va modifier la forme de ces chaînes, car elles devraient [Poirier and Reiter, 2001] :

1. s’étendre sur la plus grande distance possible entre le fournisseur de matières premières et le client final. Actuellement, l’entreprise cherche à optimiser les activités entre «le client de son client et le fournisseur de son fournisseur», c’est à dire sur deux niveaux de clients, sur elle-même et sur deux niveaux de fournisseur. A l’avenir, l’entreprise cherchera à faire de même entre l’acteur le plus en amont (par exemple la mine qui extrait les matières premières) et l’acteur le plus en aval (le point de vente), c’est à dire sur beaucoup plus de niveaux.
2. être composée de petites unités *spécialisées dans leur métier de base et externalisant* toutes leurs activités annexes. Par exemple, une unité de production se focalisera sur la partie technique de la production et fera faire à l’externe la conception des produits, la comptabilité, la gestion des approvisionnements, etc.

Le concept de chaîne logistique permet d’améliorer la position concurrentielle des entreprises qui y collaborent car il permet de créer des synergies entre les entreprises qui y participent [Poirier and Reiter, 2001]. Mais l’optimisation de telles chaînes pose un grand nombre de problèmes. Backx [Backx et al., 1998] note par exemple que la performance d’une entreprise peut être améliorée significativement par la connaissance de l’état, des buts et des politiques futurs de plusieurs partenaires de la chaîne logistique en les utilisant lors de l’optimisation de l’entreprise. Un tel mode de coopération dans la chaîne logistique devrait faire glisser le point de vue des dirigeants d’un centrage sur l’entreprise seule totalement découplée de la chaîne logistique, vers une « conscience » de la chaîne logistique globale. En effet, chaque installation

doit être perçue comme un morceau d'un système dynamique plus étendu, à savoir la chaîne logistique, ce morceau étant lui-même enchevêtré dans le marché et dans la société. A ce propos, il convient de noter que la fonction de directeur des achats va devenir plus importante par l'adaptation d'une perspective globale à l'approvisionnement. En effet, cette fonction a actuellement des responsabilités tactiques à l'impact limité, mais elle va évoluer vers un rôle stratégique pour l'ensemble de la chaîne logistique. En d'autres termes, il y aura de moins en moins de personnes employées à cette fonction, mais ces personnes seront beaucoup plus importantes pour le succès de leurs entreprises [Quinn et al., 2000]. Enfin, cette vision de chaîne logistique améliorée est parfois appelée « réseau de valeur » (*value net*). Un réseau de valeur est une chaîne logistique qui, en plus de simplement fournir des produits aux clients, crée de la valeur pour ses clients, l'entreprise et ses fournisseurs. Cette valeur créée satisfait les clients et rend profitable l'entreprise. Pour créer cette valeur, la chaîne logistique doit être un système numérique, rapide, flexible et dirigé par les choix des clients [Bovet and Martha, 2000]. Les recherches actuelles sur les chaînes logistiques visent à donner de telles caractéristiques aux chaînes logistiques. Les deux derniers paragraphes de cette sous-section donnent un aperçu des problèmes soulevés entreprise par entreprise, puis globalement pour l'ensemble des entreprises d'une chaîne logistique.

Au niveau d'une entreprise individuelle, les planifications de la production, de la distribution et des stocks sont faites indépendamment les unes des autres dans la majorité des organisations, alors que chacune dépend des deux autres. La raison à cela est que chaque planification est un problème difficile individuellement du fait des nombreuses contraintes à satisfaire (capacités de chaque élément du système, ordre de précedence des activités, obligations légales, etc.) [Mallya, 1999]. En effet, de plus en plus, l'établissement des programmes de production, la planification et les mécanismes de contrôle traditionnels centralisés et séquentiels se montrent insuffisamment flexibles pour répondre aux changements de mode de production ainsi qu'aux variations hautement dynamiques de la demande [Maturana et al., 1999]. Les principaux problèmes concernent la flexibilité qu'il faut atteindre en tenant compte des volumes et des catégories de produits, des temps et des coûts de transition entre ces produits (par exemple, le temps pour arrêter de produire l'item 1 et lancer la production de l'item 2 et le coût de ce temps improductif), de la prévisibilité de la production, de la reproductibilité des décisions et du contrôle serré de la qualité [Backx et al., 1998]. Une clé de l'adaptation efficace aux environnements de production dynamiques actuels est la capacité (i) de coordonner efficacement la production entre plusieurs installations, qu'elles soient internes ou externes à l'entreprise et (ii) d'évaluer rapidement et précisément les décisions de conception de nouveaux produits/sous-composants et les décisions stratégiques d'affaires (faire ou acheter, sélection des fournisseurs, etc.) [Sadeh et al., 1999]. Enfin, l'évolution constante des besoins des consommateurs et la concurrence globale due à la mondialisation obligent les systèmes de production du XXI^e siècle à développer un avantage concurrentiel durable et ce, en satisfaisant aux nécessités suivantes [Shen and Norrie, 1999] :

1. intégrer les différents secteurs de l'entreprise, c'est à dire faire fonctionner ensemble les différentes parties de l'entreprise ;
2. organiser l'entreprise de façon distribuée (par exemple en ne reposant pas sur une hiérarchie pyramidale) ;

3. évoluer dans des environnements hétérogènes (par exemple en tenant compte des différents types de consommateurs) ;
4. tenir compte de l'interopérabilité ;
5. avoir une structure d'entreprise ouverte et dynamique (par exemple pour s'adapter aux changements dans l'environnement) ;
6. coopérer avec les autres entreprises de l'environnement ;
7. intégrer les personnes aux matériels et aux logiciels ;
8. avoir un comportement agile (l'organisation doit avoir la capacité de prospérer dans un environnement d'affaires constamment changeant et imprévisible [Rigby et al., 2000]) ;
9. «vivre» avec une organisation à taille dynamique ;
10. être tolérant aux pannes.

Au niveau de la *gestion de la chaîne logistique*, on essaye de régler les problèmes de *planification de la production, de la distribution et des stocks dans chaque entreprise en tenant compte de ce que font les autres entreprises*. Plus précisément, la disponibilité de la matière, du personnel, des machines et des outils doit être planifiée de façon à exécuter les commandes des consommateurs. Bien que les planifications de la production, de la distribution et l'approvisionnement s'effectuent depuis plusieurs décennies, elles sont le plus souvent isolées les unes des autres et ont une portée limitée. *Coordonner des plans sur plusieurs sites et relativement à plusieurs organisations représente un nouveau défi* [Stadtler, 2000]. Les planifications de la production, de la distribution et de l'approvisionnement sont donc plus difficiles à résoudre : par exemple, les plans de production des fournisseurs, les décisions de commande des distributeurs et le réapprovisionnement des détaillants, quoiqu'interdépendants, sont faits de façon indépendante par chaque firme individuelle, chacune cherchant à maximiser ses propres opérations, ce qui peut résulter en des décisions globalement sous-optimales [Mallya, 1999]. De plus, d'autres problèmes spécifiques à la chaîne logistique et invisibles à une entreprise individuelle s'y ajoutent, comme l'effet coup de fouet qui est l'objet de notre travail de thèse. La gestion d'une chaîne logistique (*supply chain management*) a pour objectif la résolution de tous ces problèmes.

2.2 Problématique générale de l'effet coup de fouet

Lee et ses collègues [Lee et al., 1997a] rapportent que l'entreprise Procter & Gamble a constaté que les commandes en couches-culottes Pampers arrivaient de façon très aléatoire à ses usines (i.e. des périodes où les commandes sont très faibles alternent de façon imprévisible avec des périodes où les commandes sont très importantes). En regardant le problème de plus près, les responsables de Procter & Gamble ont constaté que les revendeurs (Wal-Mart, Zellers, IGA...), qui sont directement au contact des consommateurs, voient aussi des fluctuations aléatoires, mais avec une amplitude très faible. Par exemple, chaque revendeur Wal-Mart vend grosso modo le même nombre de couches Pampers tous les jours. Ensuite, si on s'intéresse aux entreprises qui sont entre l'usine de Procter & Gamble et le magasin Wal-Mart, on constate que ces fluctuations augmentent lorsque l'on s'éloigne de Wal-Mart.

C'est cette augmentation que l'on appelle l'effet coup de fouet¹. La figure 2 illustre cet effet.

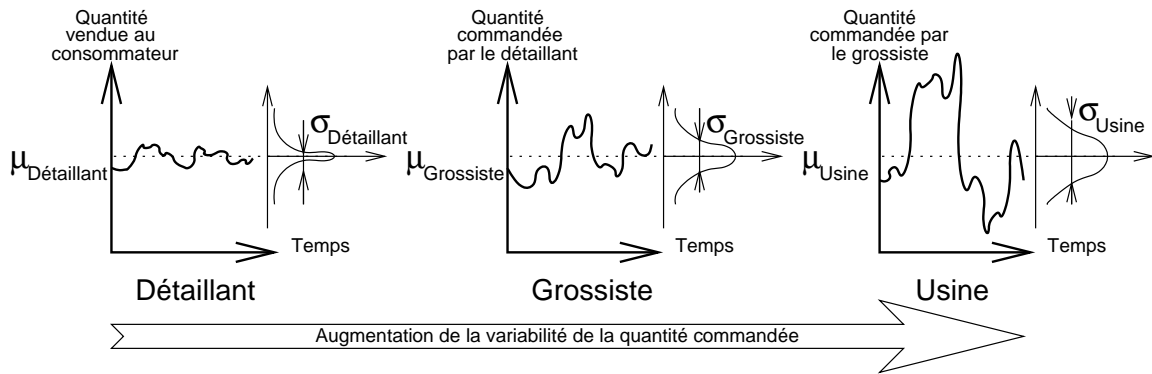


FIG. 2 – L'effet coup de fouet [Lee et al., 1997a].

A gauche, le détaillant vend à peu près le même nombre de couches tous les jours : la courbe est donc très proche d'une ligne droite horizontale. Mais ce détaillant se réapprovisionne en n'achetant pas à son grossiste tout à fait la même chose toutes les semaines : sur la figure 2, cela se traduit par une courbe du grossiste qui a de petites variations par rapport à une droite horizontale. Enfin, l'usine de Procter & Gamble (courbe de droite) reçoit des commandes qui ne sont jamais identiques : Procter & Gamble peut ne recevoir aucune commande pendant trois mois, puis recevoir brusquement une commande énorme. Sur la figure 2, cela se traduit sur le graphe de droite par une courbe d'allure totalement aléatoire. Les lettres grecques μ et σ permettent de décrire la demande dans la chaîne logistique. μ est la quantité moyenne commandée et σ est l'écart-type de cette demande. σ permet de quantifier l'effet coup de fouet [Balasubramanian et al., 2001, Fransoo and Wouters, 2000] ; nous reviendrons sur la définition d'une métrique de l'effet coup de fouet dans les sous-sections 5.2 et 5.2. La figure 2 permet d'expliquer l'origine du terme « coup de fouet » : comme sur un fouet, les petites fluctuations d'une extrémité de la chaîne logistique s'amplifient progressivement jusqu'à l'autre extrémité.

La principale conséquence de l'effet coup de fouet est une augmentation des stocks et une perte de réactivité pour satisfaire en juste-à-temps les demandes des clients. La raison pour laquelle l'effet coup de fouet induit une augmentation des stocks s'explique en deux temps : (i) Lors des périodes de sous-activité (i.e. avec un manque de commandes par rapport à la moyenne), l'entreprise stocke tout ce qu'elle produit. (ii) Lors des périodes de sur-activité, l'entreprise vend tout ce qu'elle produit puis consomme ses stocks. Une fois ses stocks vidés, elle se trouve en situation de rupture de stock. Ces ventes perdues lors d'une rupture de stock peuvent être évaluées financièrement pour être comptabilisées comme un coût d'arréage ; pour éviter cette situation, elle peut préférer surproduire par rapport à ses besoins du moment pendant les périodes de sous-activité pour pouvoir fournir ses clients pendant les périodes de suractivité. Cette augmentation des stocks induit ensuite des effets néfastes pour la chaîne logistique (coûts de ce stockage, immobilisation financière de la valeur des produits stockés, service au client réduit, augmentation des stocks de sécurité pour éviter les ruptures de stocks,

¹Le terme est du à Lee et ses collègues [Lee et al., 1997a] bien que l'amplification de la demande remonte à Forrester [Forrester, 1958]

ordonnancement de la production impossible à appliquer, etc.). L'effet coup de fouet est aussi la cause d'autres problèmes tels que des difficultés à ordonnancer, à gérer la main d'œuvre et à contrôler les stocks et les besoins en entrepôts qui en résultent, le service au client est faible (en particulier, en termes de retards des livraisons, de différence entre les quantités commandées et livrées et d'erreurs de facturation) et les efforts administratifs sont excessifs [Taylor, 2001, Carlsson and Fullér, 2001]. Enfin, des études ont montré que les coûts générés par l'effet coup de fouet en Finlande s'élèvent annuellement à 200 voir 300 MFIM (soit de 50 millions CAD à 70 millions CAD) pour une usine de papier de 300 kilotonnes [Carlsson and Fullér, 2001].

Selon Taylor [Taylor, 1999], l'effet coup de fouet peut aussi se manifester à l'intérieur d'une entreprise, mais nous supposons dans toute la suite de ce papier que la gestion des entreprises est efficace : chaque entreprise est vue comme un assemblage de trois composants : un stock de pièces (par exemple des billes de bois), un centre d'activité (par exemple une scie) et un stock de produits finis (par exemple des planches). Cette représentation est calquée sur le niveau 1 du modèle SCOR (*Supply Chain Operations Reference-model*) de la figure 3 développé et soutenu par le Supply Chain Council² [Supply Chain Council, 2001].

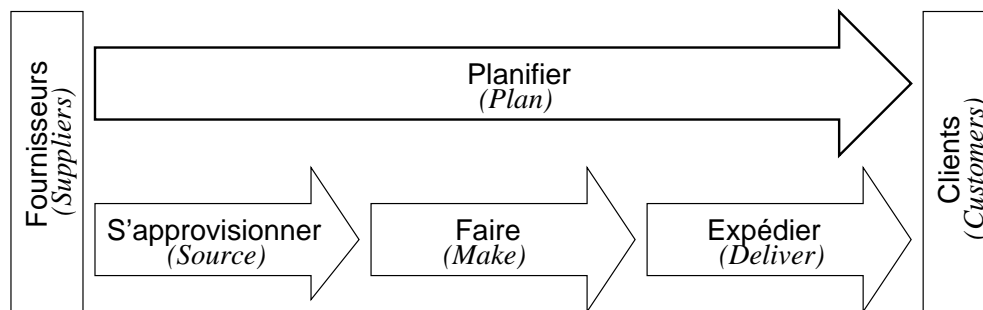


FIG. 3 – Niveau 1 du modèle SCOR [Supply Chain Council, 2001].

2.3 But et objectifs

Comme nous l'avons déjà précisé, le but de cette recherche est de réduire, voir d'annuler, l'effet coup de fouet en proposant des pratiques de gestion efficaces de la chaîne logistique. Autrement dit, notre but consiste à trouver un moyen pour que les entreprises commandent régulièrement à leurs fournisseurs des quantités constantes au cours du temps. Pour réaliser un tel but, nous comptons atteindre les objectifs suivants :

1. étudier l'effet coup de fouet en détails et montrer qu'il relève de la problématique des systèmes informatiques multiagents, particulièrement pour les aspects de coordination et de coopération ;
2. proposer des techniques originales multiagents pour atténuer, voire éliminer, le coup de fouet dans le cadre d'une coordination entre agents-entreprises-collaboratives ;

²Le Supply Chain Council est un organisme indépendant, mondial et à but non lucratif dont l'adhésion est ouverte à toutes les entreprises (présentement 700 entreprises en sont membres, dont Bayer, Hitachi, Intel et Siemens) et les organisations intéressées à l'application et à l'amélioration de l'état de l'art sur les systèmes et les pratiques de gestion d'une chaîne logistique.

3. analyser, spécifier et modéliser une chaîne logistique réelle (en l’occurrence la chaîne logistique forestière) et l’implémenter sur machine comme un système multiagent ;
4. opérationnaliser les techniques multiagents proposées en 2. et les appliquer au système multiagent proposé en 3. ;
5. analyser les résultats obtenus tout en mesurant l’efficacité des techniques multiagents proposées ;
6. proposer des solutions concrètes à mettre en place si les résultats obtenus sont probants ;

3 Éléments de base et revue de littérature

Nous venons donc de décrire en détail l’effet coup de fouet et le contexte dans lequel il se manifeste. Nous allons maintenant nous attacher à faire une revue de littérature. Pour cela, nous commençons par présenter les principales contributions à la connaissance de l’effet coup de fouet, ainsi que les solutions qui y ont été proposées (sous-section 3.1). Puis la revue de littérature se poursuit sur les techniques de gestion de gestion d’une chaîne logistique (sous-section 3.2). Le support technologique de ces techniques, c’est à dire les technologies de l’information et de communication est ensuite détaillé (sous-section 3.3). Ensuite les particularités de la chaîne logistique du domaine industriel dans lequel est validé notre recherche, à savoir l’industrie forestière (sous-section 3.4) est présenté en détails. La section se conclut finalement par le jeu de la bière (*Beer Game*) et ses variantes. Le but de ce jeu est que les joueurs découvrent de façon ludique ce qu’est l’effet coup de fouet (sous-section 3.5). L’une de ses variantes sert de base au modèle que nous utiliserons dans notre thèse.

3.1 Causes et conséquences du coup de fouet

Comme nous l’avons déjà dit, c’est Forrester [Forrester, 1958] le premier à avoir mis en évidence en 1958 « l’amplification de la demande ». Le terme « effet coup de fouet » (*bullwhip effect*) est apparu plus tard. Nous utiliserons par la suite « effet coup de fouet » plutôt qu’« amplification de la demande »³. Forrester introduisait le problème en notant « qu’il a souvent été observé qu’un système de distribution composé de stocks et de procédures de commandes en cascade semblait amplifier les petites perturbations qui se produisent au niveau de la vente de détail » [Forrester, 1961]. Il attribua cet effet principalement à la rationalité des décisions prises par les individus responsables de passer les commandes, cette rationalité les incitant à répondre excessivement en accroissement ou en réduisant la demande de leur client lorsqu’ils commandent à leur fournisseur.

Plus tard, Lee et ses collègues [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b] ont prolongé les idées de Forrester en améliorant la profondeur de notre compréhension de certaines des causes tout en liant la plupart des concepts relatifs au coup de fouet à l’environnement d’affaires moderne [Taylor, 1999]. Ces deux articles sont très souvent pris en référence lorsque l’on parle de l’effet coup de fouet. Les causes et solutions qui y sont citées se partagent en quatre catégories :

³La raison à ce choix est que nous généralisons l’effet coup de fouet aux systèmes distribués. Dans le cas général, les fluctuations qui se propagent dans un tel système n’affectent pas forcément la demande. L’avantage du terme « effet coup de fouet » est d’être plus neutre et donc de pouvoir être utilisé dans tous les systèmes qui subissent des fluctuations.

La qualité et la fréquence de mise à jour des prévisions de la demande :

Cause : excepté le détaillant, aucune entreprise ne connaît la demande du marché. Par conséquent, chaque entreprise passe des commandes à son fournisseur en se basant sur l'historique des commandes de son client immédiat. Le problème est que lorsqu'un client émet une commande à une entreprise, le responsable du réapprovisionnement de l'entreprise interprète le peu d'information contenue dans cette commande comme un signal de la demande future qu'il utilise pour mettre à jour ses prévisions de la demande. Le traitement du signal de la demande est la principale cause de l'effet coup de fouet. Ensuite, des stocks de sécurité sont constitués pour prendre en compte les erreurs de prévision : plus l'erreur de prévision est importante, plus le stock de sécurité est grand. Mais l'accroissement de la taille des stocks induit l'allongement des délais d'exécution (temps de production pour une unité de produit, temps de réglage des machines, durée des transports, etc.). Or, plus ces délais s'allongent et moins les entreprises peuvent réagir vite lorsqu'elles constatent que leurs prévisions sont erronées. La longueur des délais d'exécution aggrave donc les conséquences des erreurs de prévision.

Solution : Une solution à cette cause serait d'augmenter la visibilité des entreprises, c'est à dire d'augmenter la quantité d'information qu'elles peuvent percevoir. Par exemple chaque entreprise-client pourrait donner à son entreprise-fournisseur ses données brutes de la demande. Ainsi, chaque entreprise ferait sa prévision en se basant sur les mêmes données. Cette solution consiste donc à réduire l'incertain. Elle est presque identique à ce que l'on appelle la centralisation de l'information, et qui consiste à ce que le point de vente diffuse ses données brutes de la demande à tous les niveaux de la chaîne logistique (dans ce cas, les données sont donc diffusées à partir d'un centre, à savoir le point de vente, alors que dans [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b] ces mêmes données remontent un à un les échelons de la chaîne). Une approche plus radicale a été proposée récemment [John Taras CPIM, 2001] : elle consiste à ce que le fournisseur utilise l'information reçue dans l'approche précédente pour contrôler le réapprovisionnement de son client. Dans ce système, le client donne toute l'information dont il dispose sur ses ventes à son fournisseur et ne passe plus de commandes : au vue de l'information qu'il reçoit, le fournisseur décide quand réapprovisionner son client. De nos jours, selon l'industrie considérée, on appelle VMI (*Vendor-Managed Inventory*) ou CRP (*Continuous Replenishment Program*) de tels mécanismes établis entre un point de vente et son fournisseur direct.

La taille des lots et la fréquence des commandes :

Cause : les entreprises agrègent souvent les commandes de plusieurs clients et sur une longue période avant de passer une commande à leurs fournisseurs. Cette agrégation déforme l'information de la demande du client lorsqu'elle est transmise au fournisseur (la déformation de l'information est un autre nom de l'effet coup de fouet). Une raison de ce comportement est que les entreprises essayent de faire venir les produits par camions pleins plutôt que partiellement pleins. Pour la plupart des items, un camion plein représente la consommation d'un mois ou plus, ce qui mène à des temps de cycles excessivement longs (les temps de cycle longs aggravent la cause précédente). Une autre raison de ce comportement est que le prix de passage d'une commande est relativement élevé.

Solution : Pour résoudre ce problème, il faut casser les lots commandés, c'est à dire trouver un moyen pour que les lots (au niveau de la production, du transport...) contiennent moins de produits. Ainsi, les camions remplis d'un seul produit qui circulent rarement peuvent être remplacés par des camions contenant plusieurs produits et circulant plus souvent. Ensuite, le prix de passage d'une commande peut être réduit en utilisant des outils de commerce électronique tel que l'EDI (Echange de Données Electroniques ou *Electronic Data Interchange* en anglais).

Les risques de pénuries mènent à des achats préventifs :

Cause : lorsque la demande est plus importante que l'offre, un fournisseur rationne souvent ses clients. Il peut par exemple allouer ses produits proportionnellement à la quantité commandée. Ainsi, si le fournisseur ne peut fournir que 50% de la demande totale, chaque client ne recevra que 50% de ce qu'il a commandé. Sachant cela, les clients vont exagérer leurs commandes en espérant recevoir ainsi ce dont ils ont vraiment besoin. Plus tard, lorsque la pénurie s'estompe, les commandes disparaissent brusquement. Ce jeu de *pari* des clients fait que le fournisseur reçoit peu d'information sur la demande réelle du marché.

Solution : Pour éliminer ce comportement opportuniste des clients et ainsi résoudre ce problème, le fournisseur pourrait partager ses produits entre ces clients en fonction des ventes passées plutôt qu'en fonction de leurs commandes présentes. Les clients n'auraient alors plus intérêt à exagérer leurs commandes.

La fluctuation des prix induit des achats spéculatifs :

Cause : on estime que 80% des transactions entre producteurs et consommateurs de l'industrie alimentaire sont réalisées par anticipation, c'est à dire que ce sont des achats faits en avance par rapport aux besoins, généralement pour profiter d'un bon prix du producteur. Les achats anticipés résultent de la fluctuation des prix du marché. Lors d'une promotion, c'est à dire lors d'une fluctuation « vers le bas » du prix unitaire, le client achète en grosse quantité afin de stocker le produit pour les périodes à venir où le prix sera à nouveau à son niveau habituel. Lorsque le prix revient à son niveau nominal (fluctuation vers le haut), la consommation chute puisque les consommateurs se mettent à consommer ce qu'ils ont dans leurs stocks. Du point de vue du fournisseur, cela conduit à ce que le motif d'achat du client ne reflète pas son motif de consommation, ce qui correspond à une détérioration de l'information, c'est à dire à l'effet coup de fouet.

Solution : L'ironie est que cet effet qui gêne le fournisseur est causé par une variation de prix qu'il a lui-même créée. En effet, il lui suffirait de ne pas faire fluctuer le prix, en particulier de le diminuer lorsqu'il veut écouler ses stocks. Ce faisant, il suivrait alors une politique de bas prix quotidien (en anglais *EDLP* pour *Every Day Low Pricing*).

Chen, Drezner, Ryan et Simchi-Levi [Chen et al., 1994, Simchi-Levi et al., 2000] ont aussi contribué à la théorie de l'effet coup de fouet en proposant un modèle qui leur a permis de vérifier formellement l'impact de la centralisation de l'information (c'est à dire la diffusion de la demande du marché par les points de vente à toutes les autres entreprises de la chaîne logistique ; nous précisons ce qu'est la centralisation de l'information dans la partie 3.2.1) pour les deux méthodes les plus simples de prévision de la demande (moyenne mobile et lissage exponentiel). Ils ont alors vérifié formellement ce que beaucoup de personnes avaient prédit,

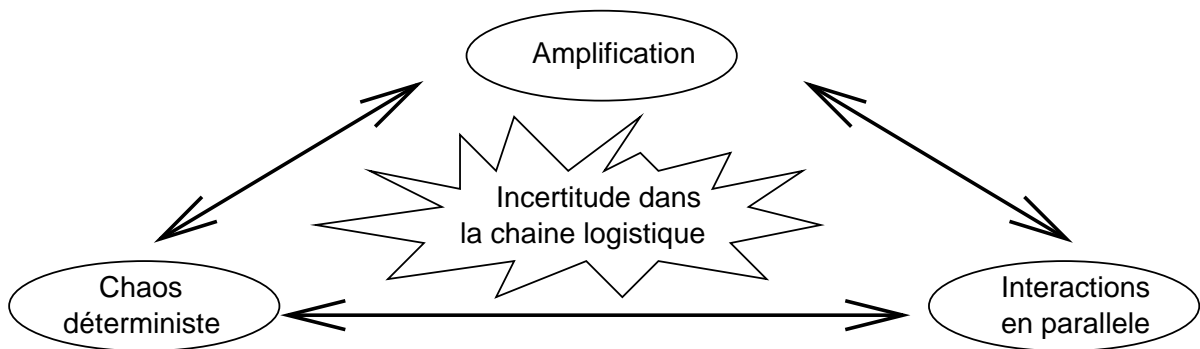


FIG. 4 – Triangle de complexité de la chaîne logistique [Wilding, 1998].

c'est à dire que la diffusion de l'information peut réduire significativement l'effet coup de fouet. Mais ils ont aussi noté les limites de la centralisation et vérifié que *l'effet coup de fouet n'est pas totalement éliminé même lorsque l'information du client est connue de toutes les entreprises de la chaîne logistique (information centralisée) et que le contrôle des inventaires est coordonné* entre les différents niveaux de la chaîne logistique. Quoique ce résultat n'ait pas été établi dans le cas général, il est important car il montre que réduire l'incertain en diffusant de l'information n'est pas suffisant pour éliminer l'effet coup de fouet.

De son côté, Wilding [Wilding, 1998] englobe conceptuellement l'effet coup de fouet avec deux autres problèmes pour expliquer d'où vient la complexité de la chaîne logistique. A cet effet, il part du constat que les incertitudes sur l'approvisionnement et la demande ont un impact majeur sur la performance de la production pour proposer le « triangle de complexité de la chaîne logistique » qui explique ce comportement éloigné de l'équilibre. L'effet coup de fouet est une des trois sources d'incertitude. Chacune de ces trois sources peut agir comme un stimulus pour l'une des deux autres. La figure 4 présente ces trois sources :

- *le chaos déterministe* est lié au comportement imprévisible qui apparaît dans le système qui, lui, suit des règles, c'est à dire qu'il est déterministe, donc prévisible.
- *l'amplification* concerne l'amplification de la demande, c'est à dire l'effet coup de fouet. Cet effet est créé par les interactions en série des échelons de la chaîne logistique.
- *les interactions en parallèle* se produisent dans un même échelon de la chaîne logistique : une entreprise peut être atteinte par un événement qui s'est produit dans une autre entreprise du même échelon, c'est à dire dans une entreprise pouvant avoir les mêmes clients ou les mêmes fournisseurs.

Selon Scholl [Scholl, 2001], deux écoles se sont attaquées à la réduction de l'effet coup de fouet. Ces deux écoles sont la dynamique des systèmes et la modélisation basée sur les agents. Selon lui, des études croisées de l'effet coup de fouet selon ces deux écoles promettent de donner d'excellents résultats en termes de validité des modèles et de robustesse des résultats. L'approche de chacune de ces écoles peut se décrire de la manière suivante :

- en dynamique des systèmes, le modelleur tente de capturer les relations causales entre les éléments du système en décrivant les structure de rétroaction avec une multitude de

boucles de retour positives et négatives. Les papiers [Forrester, 1958, Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b, Sterman, 1989] ont font partie.

- la modélisation basée sur les agents se concentre sur les interaction entre des agents autonomes basés sur des règles. Plutôt que d’essayer de calculer la solution de modèles, les modèles basés sur les agents laissent une solution émerger. Scholl ne cite que [Kimbrough et al., 2001] et nous n’en connaissons pas d’autres qui aient attaqué le problème lui-même, même si les projets de gestion de la chaîne logistique par des systèmes multi-agents (cf. partie 3.4.3) y contribuent indirectement.

Contrairement aux travaux théoriques précédents, Taylor [Taylor, 1999], [Taylor, 2000, Taylor, 2001] a étudié en pratique l’amplification de la demande sur trois échelons de l’amont de la chaîne logistique des composants automobiles. Ce travail a pour but de réduire concrètement l’effet coup de fouet dans cette chaîne et non de contribuer à la théorie des chaînes logistiques. C’est pourquoi les causes, les conséquences et les remèdes connus que nous venons de voir y sont instanciés au cas spécifique de l’industrie automobile. Enfin, Taylor fait des remarques sur les problèmes pratiques rencontrés, telle que la difficulté de collecter et d’agréger les données dans chaque entreprise. De façon très similaire, Hameri [Hameri, 1996] propose une méthode pour éviter l’effet coup de fouet dans la chaîne de distribution du papier. En particulier, il recommande d’intégrer l’usine aux grossistes en fixant un cycle d’échanges de l’information et de livraisons de papier.

Sterman [Sterman, 1989] a étudié lui-aussi expérimentalement l’effet coup de fouet, mais pas sur un cas réel. En effet, il a créé le jeu de la bière (*Beer Game*) pour étudier expérimentalement l’effet des erreurs de perception des rétroactions provenant de la chaîne logistique. Les rétroactions sont les conséquences que les joueurs reçoivent de l’environnement (ici les entreprises contrôlées par les autres joueurs) après avoir influé sur cet environnement en passant une commande à leur fournisseur. Puis des variantes à ce jeu ont été introduites : modification des règles du jeu [Chen and Samroengraja, 2000], modification de la chaîne logistique [Fjeld, 2001, Haartveit and Fjeld, 2002], implémentation informatique [Jacobs, 2000, Kimbrough et al., 2001]... Le jeu et toutes ces variantes sont présentés dans la sous-section 3.5.

De son côté, Blackburn [Blackburn, 1991] indique que les erreurs de prévisions peuvent être significativement réduites (ce qui a pour conséquence de réduire l’effet coup de fouet) quand les ventes sont améliorées par compression des délais entre chaque maillon de la chaîne logistique.

En informatique, outre l’approche à base d’algorithmes génétiques de l’équipe de Kimbrough [Kimbrough et al., 2001] dans laquelle des agents intelligents jouent au jeu de la bière (nous parlerons de ce travail dans la partie 3.3.5 et la sous-section 3.5), Carlsson et Fullér [Carlsson and Fullér, 2000, Carlsson and Fullér, 2001] ont utilisé des méthodes de calculs doux (*soft computing*) et intelligents. Ces travaux montrent que l’effet coup de fouet peut être significativement réduit si (i) les entreprises de la chaîne logistique partagent l’information grâce à une technologie intelligente et (ii) si elles se mettent d’accord sur des estimations des ventes futures floues et s’affinant au cours du temps. Carlsson et Fullér identifient trois approches possibles pour contrecarrer l’effet coup de fouet et précisent que le plus efficace et plus difficile sera de trouver une manière de combiner ces trois approches pour trouver des programmes synergétiques. Ces trois approches sont :

- partager l’information depuis les détaillants sur l’ensemble de la chaîne logistique : il s’agit de trouver les bonnes technologies de l’information pour réaliser ce partage.

- aligner les canaux en s’aidant d’une coordination de l’évaluation des prix, du transport, de la planification des inventaires et de la propriété des produits (quand les lois antitrust le permettent).
- améliorer l’efficacité opérationnelle en réduisant les coûts et en améliorant les délais d’exécution.

Dans une approche qui ne rentre pas dans la taxonomie dynamique de système/agent de Scholl [Scholl, 2001], Daganzo [Daganzo, 2001] se concentre sur les flux qui parcourent la chaîne logistique. Pour introduire son travail, il fait une analogie entre la chaîne logistique et le réseau routier : l’effet coup de fouet est alors considéré comme un embouteillage qui se propage sur une route. Selon Daganzo, une propriété importante des politiques/algorithmes de gestion des inventaires est le « gain » qui se mesure à l’état stable par le rapport entre d’une part, les changements marginaux dans le stock moyen et d’autre part, les petits changements dans la demande moyenne. Il montre que tous les algorithmes autonomes à gain positif sont instables lorsqu’ils n’utilisent pas d’information sur le futur. Cette instabilité se traduit par l’effet coup de fouet.

3.2 Gestion d’une chaîne logistique

Il y a différentes définitions et interprétation du terme « gestion d’une chaîne logistique » (*supply chain management*) [Muckstadt et al., 2001]. Ce terme relativement récent a été créé par deux consultants (Oliver et Webber [Oliver and Webber, 1992]) dès 1982. Il désigne des concepts de planification industrielle intégrée qui sont employés par les experts en logistique depuis les années 1950. De nos jours, la planification intégrée est finalement possible grâce aux progrès dans les technologies de l’information, mais la plupart des entreprises ont encore beaucoup à prendre sur l’implémentation des outils analytiques pour l’atteindre [Shapiro, 2000].

3.2.1 Centralisation de l’information, VMI/CRP et CPFR

Différents niveaux de collaboration des entreprises ont été mis en place dans l’industrie ces derniers temps. Ceux qui contribuent à la réduction de l’effet coup de fouet sont la centralisation de l’information, les stocks gérés par le vendeur (VMI/CRP - *Vendor Managed Inventory/Continuous Replenishment Program*) et la planification, la prévision et le réapprovisionnement collaboratifs (CPFR - *Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*). De façon simplifiée, le premier sert de base au deuxième qui sert lui-même de socle au troisième (cf. figure 5).

Chen, Drezner, Ryan et Simchi-Levi [Chen et al., 1994] ont montré formellement, pour deux méthodes de prévision de la demande du marché, que centraliser l’information de la demande dans la chaîne logistique permet de réduire l’effet coup de fouet. La centralisation de l’information consiste à ce que le point de vente fournisse à tous les niveaux de la chaîne logistique toute l’information de la demande du client. Il faut bien distinguer la centralisation de l’information et la coordination centralisée : la seconde suppose l’existence d’un « chef d’orchestre », alors que ce qui nous intéresse ici, c’est que les points de vente diffuse en temps réel leurs ventes. La centralisation de l’information réduit l’effet coup de fouet car chaque niveau de la chaîne peut utiliser les données réelles de la demande des clients pour faire des prévisions plus précises (moins aléatoires), au lieu de se baser sur les commandes venant du niveau

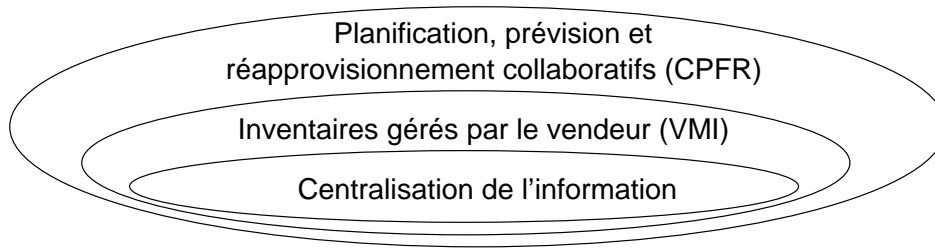


FIG. 5 – Imbrication de la centralisation de l'information, de VMI et de CPFR.

précédent qui peuvent être bien plus aléatoires que la demande réelle du client. On trouve dans ce même article [Chen et al., 1994] une étude formelle de l'impact de la centralisation de l'information sur l'effet coup de fouet qui montre qu'elle est très positive, mais qu'elle ne l'élimine pas totalement.

La gestion des inventaires par le vendeur (en anglais VMI pour *Vendor-Managed Inventory*) [John Taras CPIM, 2001] et le programme de réapprovisionnement en continu (en anglais CRP pour *Continuous Replenishment Program*) sont deux systèmes très similaires mais mis en place dans deux industries différentes. Ils utilisent une centralisation de l'information pour que le fournisseur puisse contrôler le réapprovisionnement de son client. C'est à dire que le fournisseur connaît en temps réel le niveau des stocks de son client, ce qui lui permet de réapprovisionner son client quand il le juge nécessaire, et ce sans que le client ne passe de commande. Le fournisseur est seul responsable du réapprovisionnement de son client. Ce dispositif est utilisé entre le point de vente et son fournisseur. Ce type de système a été popularisé à la fin des années 1980 par Wal-Mart et Procter & Gamble. Une des conséquences de sa mise en place est qu'en général, la fréquence de réapprovisionnement s'accroît de mensuel à hebdomadaire, voir quotidien [Waller et al., 1999].

Le CPFR [VICS Association, 2001] (*Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*) est la planification, la prévision et la planification collaboratives. Il s'agit d'un standard basé sur le Web qui améliore le VMI et le CRP en incorporant la prévision commune de la demande. Avec le CPFR, les entreprises s'échangent électroniquement une série de commentaires écrits et de données incluant la tendance des ventes passées, les promotions planifiées et les prévisions. Cela permet aux participants de coordonner ensemble leurs prévisions en se concentrant sur les différences qu'il y a entre leur prévision respective : les entreprises cherchent la cause de ces différences et en déduisent une vision commune et améliorée de la situation [Simchi-Levi et al., 2000].

3.2.2 Techniques décentralisées de gestion de chaînes logistiques

La plupart de la littérature sur la gestion des stocks dans une chaîne logistique suppose que cette gestion est régie par un décideur central qui optimise la performance de la chaîne. Selon Cachon et Zipkin [Cachon and Zipkin, 1999], trois politiques ne sont pas régies par un tel « chef d'orchestre », mais sont au contraire gérées de façon décentralisée : ce sont les systèmes proposés dans [Lee and Whang, 1999], [Chen, 1999] et [Porteus, 2000]. Il semble que l'amélioration de la performance globale de la chaîne logistique passe par un alignement des motivations de ses différents dirigeants et que cette motivation soit à chercher du côté des trans-

ferts financiers basés sur les niveaux de stocks et d'arrérages entre les entreprises de la chaîne logistique. Chen [Chen, 1999] propose des transferts financiers proportionnels aux niveaux des stocks et d'arrérages au résultat d'une comptabilité spéciale appliquée aux niveaux de stocks et d'arrérages. Un schéma de gestion décentralisée implicite dans [Clark and Scarf, 1960] est opérationnalisé dans [Lee and Whang, 1999] par des transferts financiers non proportionnels. Enfin, Porteus [Porteus, 2000] se base sur ces travaux et propose d'utiliser des jetons de responsabilité. L'intérêt de ce dispositif par rapport à celui de Lee et Whang est de faciliter encore l'opérationnalisation. Ainsi, les jetons de responsabilité sont un outil destiné à être mis en place physiquement.

L'idée est de baser le remboursement sur les conséquences réelles d'un traitement/livraison/expédition moins important que nécessaire, plutôt que sur une prédiction de telles conséquences. Les jetons de responsabilité implémentent un dispositif de remboursement empirique plutôt que théorique. L'idée qui sous-tend le système est de motiver financièrement les acteurs à livrer au mieux leurs clients. L'installation d'un tel dispositif suppose qu'un système de gestion de l'information, vraisemblablement électronique, soit établi pour surveiller les inventaires et les quantités expédiées, ainsi que pour exécuter les paiements entre les partenaires de la chaîne logistique. Dans les faits, ce dispositif fonctionne de la manière suivante : à chaque fois qu'un fournisseur F ne peut satisfaire à la commande émise par son client C , il substitue des jetons de responsabilité à la place des unités manquantes. Le client C traite ces jetons comme des unités physiques tant qu'il possède suffisamment d'unités physiques : en effet, il peut compléter des expéditions avec ces jetons s'il n'a pas suffisamment d'unités physiques pour compléter une commande. Lorsqu'il vient à manquer d'unités physiques et de jetons, il peut lui-même créer de nouveaux jetons de responsabilité pour compléter ses expéditions. Lorsqu'une entreprise vient à manquer d'unités physiques, elle peut adresser une pénalité financière à l'entreprise qui a émis les jetons qui remplacent les unités physiques manquantes. Porteus [Porteus, 2000] montre par des exemples que la différence entre deux variantes de ce mécanisme (soit un mécanisme à jetons de valeurs uniquement positives mais à durée de vie limitée, soit un mécanisme à jetons positifs ou négatifs mais à durée de vie illimitée) est la suivante : les jetons positifs fournissent un mécanisme de correction des sur-commandes, alors que les jetons négatifs offrent l'opportunité de faire de même pour les sous-commandes.

3.3 Technologies de l'information pour la gestion des chaînes logistiques

Bien entendu, la gestion des chaînes logistiques peut grandement être facilitée par les technologies de l'information et plus particulièrement depuis l'avènement de l'internet. Cette solution utilisant des agents intelligents, elle appartient aux technologies de l'information. Selon Hicks [Hicks, 1999], les vendeurs de technologies aptes à améliorer le fonctionnement d'une chaîne logistique ne parlent pas tous la même langue : il y aurait deux camps. Le camp le plus important est celui des technologies de l'information, l'autre camp est constitué des gens de la logistique. Notre recherche s'inscrit dans le premier camp. Hicks [Hicks, 1999] conclut cette opposition en notant que ces deux camps ont, tous les deux, beaucoup de choses à apporter à l'entreprise moderne. Par conséquent, le camp des technologies de l'information, qui est développé dans la suite de ce document, posera de plus en plus de questions sur les chaînes logistiques auxquelles des approches de logistique répondront.

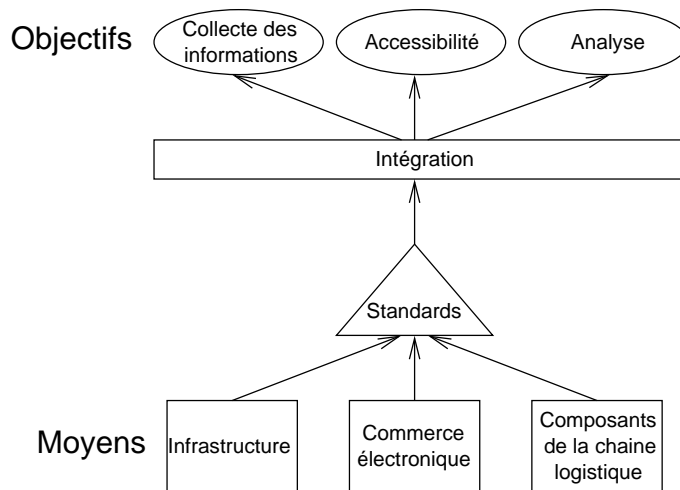


FIG. 6 – Objectifs et moyens de gestion de la chaîne logistique [Simchi-Levi et al., 2000].

3.3.1 Objectifs des technologies de l'information

Selon Simchi-Levi et ses collègues [Simchi-Levi et al., 2000], les technologies de l'information constituent un élément important de la gestion efficace d'une chaîne logistique. L'intérêt présent pour la gestion des chaînes logistiques est principalement motivé par les possibilités introduites par l'abondance de données et les économies induites par l'analyse sophistiquée de ces données. Les opportunités innovantes provenant des avancées dans le commerce électronique, en particulier à travers l'internet, ont aussi accru l'intérêt pour les technologies de l'information. De plus, pour être utilisable, l'information poursuit trois objectifs qui n'ont pas à être réalisés obligatoirement en même temps. Ces trois objectifs sont que l'information (i) doit être collectée sur chaque produit depuis la production jusqu'à la livraison, (ii) doit être accessible de n'importe où (*single-point-of-contact*) et (iii) doit être analysée pour planifier les activités en faisant des compromis basés sur des informations issues de l'ensemble de la chaîne logistique. La figure 6 montre les moyens à mettre en oeuvre pour atteindre ces objectifs [Simchi-Levi et al., 2000] :

- Les informations sont collectées directement au niveau des activités par le système d'information ;
- L'accessibilité des données consiste à rendre toute l'information disponible à chaque point de contact du système informatique ;
- Les données brutes sont analysées pour faire ressortir les éléments pertinents qui aideront les humains à prendre des décisions.
- Les problèmes dus à l'intégration des différents composants de technologies de l'information ;
- La standardisation est tout ce qui permet aux systèmes de fonctionner ensemble (cf. partie 3.3.2) ;

- L’infrastructure des technologies de l’information repose sur quatre composants (cf. partie 3.3.2) : le matériel d’interface/présentation, les communications, les bases de données, et l’architecture du système ;
- Le commerce électronique remplace les méthodes classiques de commercer en permettant de collecter une grande quantité d’informations (cf. partie 3.3.3) ;
- Les composants de la chaîne logistique sont typiquement les systèmes d’aide à la décision à court et à long terme (cf. partie 3.3.3) ;

3.3.2 Mise en œuvre des technologies de l’information dans la chaîne logistique

L’implantation de nouveaux outils de gestion de la chaîne logistique soulève un certain nombre de problèmes techniques. Ces problèmes peuvent se regrouper en trois catégories : le besoin de suivre des standards, le choix du type d’infrastructure technologique à installer et les technologies d’analyse des données mises en œuvre dans cette infrastructure.

Standardisation

Il est difficile de prédire l’avenir des technologies de l’information, car elles évoluent sans cesse. Néanmoins, la chose dont on est sûr est que ce secteur se cherche des standards pour (i) interconnecter ensemble ses systèmes différents, (ii) réduire les coûts d’acquisition, de développement et de déploiement des logiciels et (iii) réaliser des économies d’échelles (les standards réduisent les prix des composants, de développement, d’intégration et de maintenance) [Simchi-Levi et al., 2000].

On distingue deux types de standard : les standards propriétaires, c’est à dire imposés par une entreprise seule ou un regroupement d’entreprises, et les standards libres, c’est à dire proposés par des comités indépendants. Ces deux familles ont leurs inconvénients respectifs : les standards propriétaires ne cherchent pas à être toujours les meilleurs (une grande entreprise peut imposer un mauvais standard à de plus petites entreprises) et limitent ainsi la compétition et l’évolution des produits, alors que les standards libres ont beaucoup de difficultés à évoluer pour s’adapter aux changements.

En outre, les technologies de l’information pour la chaîne logistique manquent d’une terminologie commune. C’est ce trou que cherche à combler le consortium industriel Rosetta-Net [Consortium Rosetta Net, 2001] composé de grandes entreprises de technologies de l’information, de composants électroniques et de semi-conducteurs par le développement d’un dictionnaire de langage électronique pour les affaires qui sera commun à tous les processus de la chaîne logistique. Actuellement, cette standardisation s’accélère du fait du développement de l’accès à l’internet. Les croissances actuelles du nombre de fournisseurs d’accès au Réseau et du nombre de prestataires de services pour ses technologies connexes permet simultanément de rendre presque gratuites et accessibles depuis n’importe quel endroit d’Amérique du Nord les solutions basées sur l’internet [Greenstein, 2000], ainsi que de diffuser les technologies liées à l’internet. En effet, ces technologies sont exploitées dans l’internet, dans les intranets et dans les extranets, la différence entre ces trois types de réseau ne se situant que dans les privilèges accordés aux différents types d’utilisateurs [Simchi-Levi et al., 2000].

Le protocole EDI (Echange de Données Electronique, en anglais *Electronic Data Interchange*) est un standard développé afin de faciliter l’interopérabilité des informations entre les acteurs, évitant ainsi de se servir de traducteurs de formats de données. Bien qu’étant considéré

comme un succès, l'EDI n'a jamais été accepté par la majorité des communautés du monde des affaires comme un moyen de commercer électroniquement. En effet, il demeure trop cher et les logiciels développés ne le rendent pas pratique pour des réalisations importantes réunissant plusieurs partenaires [Cingil and Dogac, 2001]. C'est la raison pour laquelle de nouveaux standards émergent actuellement. En particulier, il semble que les standards du futur reposeront tous sur XML (eXtended Markup Language) qui est une forme restreinte de SGML, le langage de balisage généralisé normalisé ISO 8879 [World Wide Web Consortium, 2001]. XML est de plus en plus utilisé pour transmettre des informations sur internet. L'intérêt de son balisage est de permettre aux données de s'auto-décrire, ou en d'autres termes, les fichiers XML ne renferment pas que des données brutes, elles contiennent aussi des informations, c'est à dire du contenu ayant du sens [Schreiber et al., 1999]. Mais XML est trop générique pour permettre de faciliter l'interopérabilité des informations entre les acteurs. C'est pourquoi diverses propositions de standards se sont basées dessus, telles que RDF (Resource Description Framework) [World Wide Web Consortium, 1999], [World Wide Web Consortium, 2000] pour définir un vocabulaire commun lors de la description des ressources (par exemple pour fixer que l'on utilise le terme voiture, mais jamais les termes automobile ou auto), CBL (Common Business Library) [OASIS, 2001] pour la descriptions des documents (bons de commande, catalogues, etc.), DAML (DARPA Agent Markup Language) [DARPA, 2001] pour donner une sémantique aux pages Web, etc.

Infrastructure

Dans une chaîne logistique, l'infrastructure des technologies de l'information repose sur quatre composants : le matériel d'interface/présentation, les communications, les bases de données, et l'architecture du système [Simchi-Levi et al., 2000] :

1. *Matériel d'interface* : Il existe différentes interfaces comme les ordinateurs personnels, le courrier vocal, les terminaux, les outils d'internet, les lecteurs de code-barres, les assistants personnels PDA, etc. Deux standards s'affrontent actuellement, à savoir d'un côté Wintel (l'interface Windows sur des ordinateurs à base de puces Intel), et de l'autre côté les navigateurs Web et Java. Rien ne permet de prédire lequel va prévaloir, ni si de nouveaux matériels vont créer d'autres standards.
2. *Communications* : Les communications peuvent se décomposer entre les communications sans fil et celles avec fil. Différentes applications s'appuient dessus : e-mail, EDI, groupware, suivi du cheminement des camions dont la position est donnée par GPS (*Global Positioning System*), etc.
3. *Bases de données* : Pour être exploitables, les données ont besoin d'être organisées dans des bases de données. Il existe différents types de bases de données : les bases de données à héritage, les bases de données relationnelles, les bases de données à objets, les entrepôts de données, etc.
4. *Architecture du système* : Les deux manières de configurer le système sont soit en architecture composée d'ordinateurs plus ou moins gros sur lesquels sont reliés des terminaux, soit en architecture client/serveur composée de micro-ordinateurs inter-reliés.

Selon Shapiro [Shapiro, 2000], un principe de base pour utiliser efficacement les technologies de l'information lors de la gestion d'une chaîne logistique est de faire la distinction

entre les technologies de l'information transactionnelles et les technologies de l'information analytiques. Les caractéristiques de ces deux types de technologies de l'information sont les suivantes [Shapiro, 2000] :

1. Les technologies de l'information transactionnelles concernent l'acquisition, le traitement et la communication de données brutes à propos de la chaîne logistique d'une entreprise et avec la compilation et la dissémination de comptes-rendus résumant ces données. Les données peuvent provenir de sources internes ou externes telles que les commandes transitant pas internet ou les cadences de camionnage d'un transporteur commun accessibles par EDI. Les technologies de l'information transactionnelles correspondent aux PGI (Progiciels de Gestion Intégrées, en anglais *ERP* pour *Enterprise Resource Planning*) et au commerce électronique que nous verrons dans le paragraphe 3.3.3.
2. Les technologies de l'information analytiques correspondent aux outils d'aide à la décision que nous verrons dans le paragraphe 3.3.3. Elles impliquent l'implémentation et l'application de deux types de modèles mathématiques :
 - Les modèles descriptifs permettent d'améliorer la compréhension des relations entre les entreprises ; ces modèles sont les modèles de prévisions, les modèles de simulation et les modèles permettant d'établir des relations entre les coûts et des relations sur l'utilisation des différentes ressources ;
 - Les modèles normatifs aident les dirigeants à prendre de meilleures décisions ; le terme normatif se réfère aux processus d'identification de normes que l'entreprise devrait tenter d'atteindre. D'après Shapiro, les modèles normatifs, les modèles d'optimisation et les modèles de programmation mathématique sont des synonymes.

Nous présentons maintenant les disciplines à la base des technologies mises en œuvre dans les technologies de l'information analytiques.

Technologies d'analyse

Les méthodes d'analyse sont très diverses. Une combinaison de ces technologies est presque toujours utilisée. Le choix des outils à utiliser conjointement dépend du problème considéré. Ces méthodes sont issues de différentes disciplines, à savoir [Simchi-Levi et al., 2000] :

1. *les calculs de coûts comptables* peuvent se décomposer entre comptabilité de gestion et comptabilité financière. La comptabilité de gestion est « le processus d'identification, de mesure, de compte-rendu et d'analyse de l'information à propos des événements économiques des organisations » [Atkinson et al., 1997]. Elle a pour but d'aider les dirigeants à prendre de meilleures décisions et à fournir des retours et du contrôle sur les performances actuelles. Au contraire, la comptabilité financière est responsable du compte-rendu des résultats de la performance historique des constituants externes de l'entreprise, qui incluent les actionnaires, les créanciers et les autorités de taxes. L'implémentation de méthodes de comptabilité de gestion requiert aussi les technologies de l'information qui ont été rendues disponibles récemment [Shapiro, 2000].
2. *les statistiques* permettent de dégager des tendances et des motifs dans les données. En effet, les techniques de prévision des demandes sont d'abord des méthodes statistiques. Les analystes les appliquent pour projeter les demandes futures en se basant sur les données

historiques des ventes passées et sur les autres données de l'entreprise, de son industrie, de l'économie nationale et de l'économie mondiale. L'analyse de séries temporelles est une classe importante de méthodes pour développer les prévisions exclusivement à partir des bases de données historiques. La technique bien connue de lissage exponentiel est un type simple de modèle de séries temporelles. En construisant un modèle de séries temporelles, le pratiquant tente de trouver un motif dans les données historiques, tels que les effets saisonniers ou les tendances, qui produisent une bonne concordance avec les données mesurées par la variance de la prévision [Shapiro, 2000].

3. *les outils d'analyse en ligne (OLAP - OnLine Analytical Processing)* agrègent les données par rapport aux dimensions de l'entreprise pour permettre aux utilisateurs d'y naviguer intuitivement dans une hiérarchie ;
4. *la Recherche Opérationnelle (RO)* a été développée pour faire face à l'énorme défi logistique rencontré par les forces armées. Elle met en œuvre des algorithmes exacts ainsi que des heuristiques pour résoudre des problèmes formulés mathématiquement. Des outils informatiques de résolution de ces problèmes sont commercialisés : le Solveur d'Excel, CPLEX, XPRESS-MP, Frontline Systems, etc. [Martel, 2001]. La Recherche Opérationnelle naquit au début de la révolution de l'information au milieu des années 1940 avec le besoin de calcul numérique dans les opérations militaires de la seconde guerre mondiale. Les modèles et les méthodes de recherche opérationnelle ont démontré leur pertinence dans une large gamme d'applications. Cette généralité crée des opportunités et des défis. Une opportunité majeure réside dans le fait que plusieurs problèmes de la chaîne logistique peuvent être analysés en utilisant des modèles d'optimisation et des algorithmes pris d'une bibliothèque et adaptés rapidement. Mais comme les détails d'un problème donné ont de l'importance, définir précisément un modèle approprié constitue un défi majeur. La recherche opérationnelle a été appelée la science et la technologie de la prise de décision, c'est à dire qu'elle a une composante scientifique et une composante technologique. La composante scientifique concerne les idées et les processus d'articulation et de modélisation des problèmes de la décision en déterminant les objectifs des preneurs de décisions et les contraintes sous lesquels il ou elle doit, ou désire, opérer. Cette composante concerne aussi les méthodes mathématiques, appelés algorithmes, pour optimiser les systèmes numériques qui résultent des données utilisées pour peupler les modèles. La composante technologique concerne les outils logiciels et matériels de collecte et de communication des données, d'organisation de ces données, de leur utilisation pour générer et optimiser les modèles, et de compte-rendu des résultats [Shapiro, 2000].
5. *la simulation* permet de prendre en compte facilement les éléments aléatoires des processus d'affaires ;
6. *l'Intelligence Artificielle (IA)* est composée de différentes branches, telles que :
 - (a) Les entrepôts de données permettent de donner des réponses précises à des questions du type « combien de produits P vend-on dans la région R pendant la période de Noël ? », puis en analysant les données avec des outils sophistiqués. En particulier, l'un de ces outils, la fouille de données (*data-mining*), cherche les motifs « cachés », les tendances et les relations dans les données ;

- (b) Les systèmes experts capturent la connaissance d'un expert dans une base de règles. Les problèmes sont résolus en les décrivant sous formes de faits, puis en faisant se déclencher les règles sur ces faits ;
- (c) Les agents intelligents sont des logiciels autonomes qui interagissent ensemble et avec les humains. Comme chaque agent est proche de son environnement, un système composé d'agents est adaptés aux prises de décision en temps-réel ;

A l'intérieur d'une chaîne logistique, les décisions se prennent avec l'aide de divers programmes informatiques, mais ce sont les humains qui prennent ces décisions (Progiciels de Gestion Intégrée, commerce électronique, systèmes d'aide à la décision, etc.) [Dodd and Kumara, 2001, Simchi-Levi et al., 2000]. Nous présentons maintenant les applications des technologies de l'information de la chaîne logistique.

3.3.3 Application des technologies de l'information dans la chaîne logistique

Il existe diverses applications des technologies de l'information dans le cadre de la chaîne logistique. Nous développons les trois principales : (1) les Progiciels de Gestion Intégrée (en anglais *ERP* pour *Enterprise Resource Planning*) qui permettent de collecter l'information, (2) le commerce électronique et (3) les systèmes d'aide à la décision qui assistent les dirigeants (DSS en anglais pour *Decision Support System*). Les deux premiers sont des technologies de l'information transactionnelles au sens de Shapiro [Shapiro, 2000] (cf. infrastructure dans la partie 3.3.2) et le dernier est une technologie analytique.

PGI (Progiciel de Gestion Intégrée, en anglais ERP)

Les PGI (Progiciel de Gestion Intégrée, venant de l'anglais *ERP* pour *Enterprise Resource Planning*) sont des logiciels permettant l'organisation et la gestion des entreprises. De plus en plus, ces logiciels sont accouplés à une couche réseau permettant le transfert de données entre entreprises et à des moteurs d'optimisation de la chaîne logistique [Garé, 2000]. Un système PGI inclut des logiciels et du matériel qui facilite l'écoulement au sein d'une entreprise du flux des données transactionnelles de la production, de la logistique, de la finance, des ventes et des ressources humaines (intégration de l'entreprise). En principe, toutes les applications d'affaires de l'entreprise sont intégrées dans un système à l'environnement uniforme et qui accède à une base de données résidant sur une plate-forme commune. Des champs de données communs et compatibles sont utilisés à travers toute l'entreprise. De plus, les données sont entrées une seule fois, assurant ainsi que toutes les applications font usage de ces données [Shapiro, 2000].

Les éditeurs de logiciels PGI étendent actuellement leurs offres pour inclure des systèmes de modélisation pour tous les niveaux de planification, soit en développant de tels systèmes, soit en acquérant des entreprises avec des systèmes de modélisation. Les entreprises vendant des systèmes PGI ont ajouté des modules de modélisation à leurs offres pour aider les clients à déterminer les plans de chaînes logistiques efficaces basés sur les données transactionnelles collectées et gérées par leur système. SAP AG. [SAP AG., 2001] complète l'implémentation d'un add-on appelé APO, qui est composé de plusieurs modules pour la modélisation de chaînes logistiques. En achetant CAPS Logistics, Baan [Baan AG, 2001] a ajouté des modules d'optimisation de réseau logistique et de routage de véhicules à sa suite de logiciels. J. D. Edwards [J. D. Edwards & Co., 2001] a acquis Numetrix [Numetrix, 2001] pour des raisons similaires [Shapiro, 2000].

Systèmes d'aide à la décision

Un système d'aide à la décision ne prend pas de décision : il laisse les humains le faire, mais les aide dans cette démarche. De tels systèmes appartiennent aux technologies de l'information analytiques au sens de Shapiro [Shapiro, 2000]. Ces systèmes sont construits sur trois composants [Simchi-Levi et al., 2000] :

1. des bases de données d'entrée de n'importe quel type (relationnelle, à objets, etc.) et des paramètres ;
2. des outils analytiques (cf. partie 3.3.2) ;
3. un mécanisme de présentation.

Dans le cas des bases de données d'entrée, il convient de noter que pendant longtemps la collecte de données était un problème en soi et qu'il a été résolu par les PGI, les codes-barres, le commerce électronique, etc. Dans le cas des outils analytiques, diverses technologies d'analyse peuvent être mises en oeuvre pour analyser l'information (algorithmes et heuristiques de recherche opérationnelle et d'intelligence artificielle, calculs de coûts, simulation, etc.). Il est important que les preneurs de décision comprennent comment se fait cette analyse. Finalement, pour le mécanisme de présentation, il existe une multitude de techniques de visualisation, telles que les GIS (*Geographical Information System*), les diagrammes de GANTT, etc.

Dans le domaine de la chaîne logistique, les systèmes d'aide à la décision (en anglais *DSS* pour *Decision Support System*) prennent le nom d'APS (*Advanced Planning and Scheduling*). Ces systèmes prennent en charge la planification de la demande, la planification de l'approvisionnement et la planification et l'ordonnancement de la production [Simchi-Levi et al., 2000].

Commerce électronique

Le commerce électronique (e-commerce) se réfère au remplacement des processus physiques par des processus électroniques et à la création de nouveaux modèles de collaboration entre clients et fournisseurs. Le commerce électronique existe depuis plusieurs années, mais l'utilisation des standards d'internet a accéléré son adoption. Les avantages du commerce électronique sont nombreux, particulièrement dans la chaîne logistique [Simchi-Levi et al., 2000] :

1. Les entreprises et les éditeurs ont une présence globale et le consommateur peut choisir des produits provenant de toute la planète puisqu'il a un accès facile à l'information.
2. Les entreprises peuvent accroître leur compétitivité et leur qualité de service en donnant accès à leurs services n'importe où et n'importe quand. Les entreprises peuvent aussi observer électroniquement les choix et requêtes de leur clients.
3. Les entreprises peuvent analyser l'intérêt pour les différents produits en se basant sur le nombre de recherches et de lectures d'informations faites par les clients.
4. Les entreprises peuvent collecter des informations détaillées à propos des préférences des clients, ce qui permet la *personnalisation* de masse des produits. Un exemple est l'achat de PC par le Web où l'acheteur spécifie sa configuration personnelle.

5. Les temps de réponse de la chaîne logistique peuvent être réduits. L'impact est le plus important pour les produits qui peuvent être commandés directement par le Web (par exemple des publications en papier ou des logiciels).
6. Les rôles des intermédiaires et parfois du détaillant ou du fournisseur de services traditionnel sont réduits ou éliminés entièrement. Ce processus réduit les coûts et propose des options d'achat alternatives.
7. Des économies de coûts et des baisses substantielles de prix liées à la réduction des coûts de transaction peuvent être réalisées. Les entreprises fournissant le passage de commandes et le support technique via le Web peuvent économiser des coûts en personnel significatifs.
8. Le commerce électronique permet de créer des entreprises virtuelles ne distribuant que sur le Web, réduisant ainsi leurs coûts. Amazon.com et d'autres vendeurs sur le réseau peuvent se permettre de vendre à un prix inférieur car ils n'ont pas besoin de maintenir des magasins de détails et, dans beaucoup de cas, de l'espace d'entreposage.
9. Le terrain de jeu est nivelé entre les grandes et les petites entreprises ne disposant que de peu de ressources pour investir dans l'infrastructure et le marketing.

La figure 7 met en avant la tendance vers une large utilisation de l'internet pour les achats entre entreprises (B2B ou *business to business*). A cet égard, les achats électroniques (*e-procurement*) constituent des outils des plus puissants jamais mis à la disposition des acheteurs, mais il faudra veiller à ce que de tels systèmes créent vraiment de la valeur dans la chaîne logistique [Quinn et al., 2000]. L'achat électronique (*e-procurement*) est constitué en fait d'une automatisation basée sur internet des procédures d'achats, ce qui réduit les coûts administratifs et permet de réaliser des économies d'échelle par la négociation de tarifs avantageux sur de gros volumes [Ben-Ameur et al., 2002]. Il est proposé par des sociétés spécialisées dans le domaine des places de marché électroniques (*marketplace*), comme Ariba [Ariba, Inc., 2001] ou Commerce One [Commerce One Inc., 2001], qui vont entrer en concurrence ou s'associer avec les éditeurs de PGI tels que SAP AG. [SAP AG., 2001], Baan Co. [Baan AG, 2001] ou QAD Inc. [QAD Inc., 2001] : par exemple, i2 Technologies (ERP) [i2 Technologies, 2001], IBM [IBM Corporation, 2001], et Ariba (achat électronique) [Ariba, Inc., 2001] ont signé une alliance stratégique [Alliance IBM, i2 et Ariba, 2001]. L'achat électronique présente l'intérêt de centraliser l'ensemble des achats courants, commerciaux et industriels. Il se partage actuellement entre les achats hors production (pièces détachées, maintenance et réparation) et les achats de production (biens d'équipements, matières premières) [Price, 2000].

Bien que les investisseurs soient très attirés par le commerce électronique inter-entreprises, son impact potentiel sur la gestion de chaînes logistiques est bien plus important. En principe, les systèmes d'achats entre entreprises (*B2B*) peuvent fournir une communication inter-entreprises efficace des données et des plans de production et de distribution à travers des chaînes logistiques dans beaucoup d'industries. Cela devrait permettre aux entreprises de déplacer le travail au-delà des frontières de l'entreprise, de réduire les temps de cycle grâce à des interconnexions directes, et de développer des prévisions collaboratives. Mais avant ça, beaucoup de barrières doivent être franchies pour réaliser la promesse des chaînes logistiques virtuelles [Shapiro, 2000].

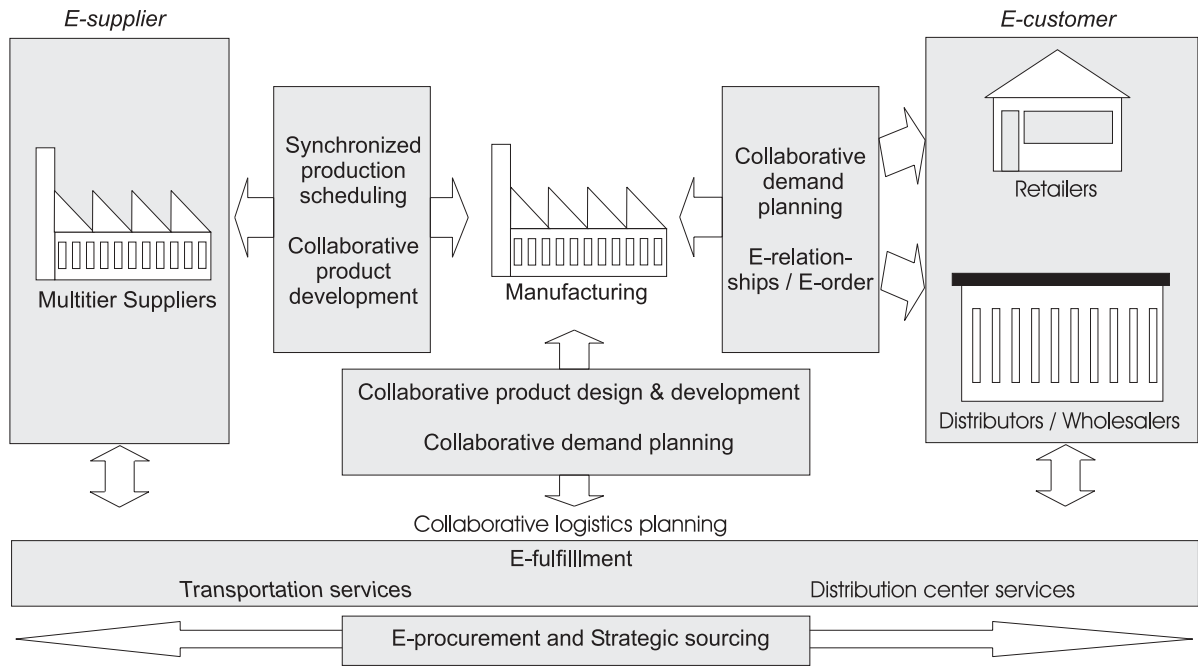


FIG. 7 – Support d’une chaîne logistique par les technologies de l’information (d’après [Quinn et al., 2000] et [Berger, 2000]).

3.3.4 Vers des solutions avancées pour les chaînes logistiques

Berger [Berger, 2000] pense que pour les entreprises, la vraie valeur de la révolution internet est à trouver dans la chaîne logistique [Berger, 2000]. Par exemple, au niveau de sa gestion, les technologies de l’information permettent de développer des solutions avancées. La figure 7 illustre l’implantation dans la chaîne logistique de nouveaux concepts [Anderson, 2000] :

- *La synchronisation* entre les partenaires est améliorée en planifiant l’approvisionnement, la production et la distribution en tenant compte des contraintes des partenaires de la chaîne logistique (capacités, etc.), permettant ainsi au réseau d’agir comme une seule entreprise.
- *La planification collaborative* avec les partenaires d’affaires est obtenue par la synchronisation entre ces partenaires de leurs plans respectifs afin d’obtenir une planification globale *optimale*. Différentes technologies internet permettent cela : les prévisions basées sur le consensus, le CPFR (*collaborative planning and forecasting replenishment*) proposé par l’association *Voluntary Interindustry Commerce Standards* [VICS Association, 2001] et le VMI (*vendor-managed inventory*) [John Taras CPIM, 2001]. De façon similaire, Mallya [Mallya, 1999] propose un modèle mathématique combinant les décisions de production, de stockage et de distribution, ainsi qu’un outil pour optimiser ce modèle.
- *La visibilité* à travers les réseaux de collaboration permet aux différents planificateurs de voir les plans logistiques de leurs partenaires d’affaires. Les données sur les promotions

et sur les inventaires, les plans de production et de distribution, ainsi que d'autres choses peuvent être partagées à travers le réseau.

- *La réactivité* est le fait que chaque entreprise réagit en temps réel aux problèmes survenant à un autre niveau de la chaîne logistique.
- *Le commerce collaboratif* regroupe les entreprises en réseaux collaboratifs dynamiques grâce à l'utilisation des navigateurs Web comme moyen de collaboration.

Dans le même esprit, le livre de Michael Porter [Porter, 1986] stipule que pour être compétitive, la firme peut et doit utiliser les données, les modèles et les systèmes de modélisation (i.e. les technologies de l'information) pour optimiser et coordonner sa chaîne de valeur. C'est pourquoi, il épouse le concept de *chaîne de valeur* qu'il décrit de la manière suivante : « Chaque firme est une collection d'activités qui sont exécutées pour concevoir, produire, commercialiser, livrer et maintenir ses produits. La chaîne de valeur d'une firme et la manière qu'elle exécute chaque activité sont le reflet de son histoire, de sa stratégie, de son approche pour implémenter sa stratégie et les économies sous-jacentes des activités elles-mêmes ». La chaîne logistique est un cas particulier de la chaîne de valeur pour les entreprises qui produisent ou distribuent des biens physiques. La chaîne de valeur a aussi été appelée la chaîne de valeur *ajoutée* pour attirer l'attention sur le but ultime d'une firme, à savoir ajouter de la valeur à ses produits ou services à chaque niveau de la chaîne [Shapiro, 2000]. De plus, selon Bovet et Martha [Bovet and Martha, 2000], l'ancienne chaîne logistique ne fournissait pas les bases pour une vraie différenciation sur la place de marché, alors que les réseaux de valeur permettent à une entreprise de prendre de l'avance en la rendant rapide, digne de confiance, et hautement flexible. Essentiellement, les cinq caractéristiques d'une chaîne de valeur de doivent d'être :

- *alignées sur les consommateurs* : c'est le consommateur qui devrait tirer le flux du réseau selon ses désirs au lieu de se contenter d'acheter les produits qui lui sont proposés à la sortie de la chaîne logistique. En effet, chaque consommateur devrait recevoir un produit personnalisé selon ses propres goûts. Par rapport aux figures 1 et 7, cela signifie que le flux de produits serait tiré par les clients, au lieu d'être poussé en fonction d'estimations des vœux des clients réalisées par les membres de la chaîne logistique. Selon cette vision, on pourrait également mettre de l'avant des politiques d'achats groupés pour imposer de produit tel que le veut le consommateurs [Asselin and Chaib-draa, 2002, Asselin, 2002].
- *collaboratives et systémiques* : les entreprises devraient se regrouper en un réseau unique dont le but serait de créer de la valeur. A cet effet, chaque activité serait confiée à l'entreprise qui est la plus efficace pour la réaliser, en particulier à des entreprise spécialisées dans certains métiers de base. Le réseau entier fournirait alors des résultats parfaits grâce à une gestion des communications et des informations qui serait collaborative et étendue à l'ensemble du système.
- *agiles et extensibles* : la chaîne devrait réagir aux changements du marché (changements de la demande, lancements de nouveaux produits, croissance rapide, etc.) ou reconcevoir sa partie réseau de fournisseurs grâce à une production, une conception des flux d'informations et une distribution flexibles. Les contraintes seraient réduites ou supprimées. Le capital financier nécessaire au travail serait réduit. Les délais d'exécution seraient diminués. Tout dans le réseau de valeur, physique ou virtuel, serait extensible.

- à *flux rapides* : les cycles de commande-livraison seraient rapides et compressés. Les livraisons seraient fiables et accommodantes, c'est à dire complètes et ponctuelles. Le temps serait compté en heures ou en jours, pas en semaines ou en mois. Cela induirait en même temps un abaissement du niveau des stocks.
- *numériques* : le commerce électronique serait un élément clé. Mais au-delà d'internet, c'est la conception des flux d'informations et son utilisation intelligente qui se trouverait au coeur du réseau de valeur. Les nouvelles autoroutes numériques relieraient et coordonneraient les activités de l'entreprise, de ses clients et de ses fournisseurs. Les outils à base de règles et dirigés par les événements prendraient les rennes de nombres de décisions opérationnelles. L'analyse en temps réel et distribuée permettrait les prises de décision exécutives rapides.

Présentement, diverses méthodologies associées à des outils informatiques sont disponibles. Par exemple, iSCOR (*Supply Chain Operations Reference*) est une méthodologie de Promatis Corporation [Promatis Corp., 2001] pour aider les petites et les grandes entreprises à identifier les opportunités qui sont les mieux en accord avec leur vision et leurs objectifs ; cette méthodologie recommande de se servir du e-Business Suite de Oracle [Oracle Corp., 2001].

Enfin, il semble que les systèmes d'agents logiciels [Chaib-draa et al., 2001] constituent une nouvelle avenue pour les technologies de l'information des chaînes logistiques. La section suivante détaille comment ils permettront peut-être à l'avenir d'implémenter des technologies de l'information décentralisées, adaptatives et concurrentes en tenant compte de l'hétérogénéité et de l'autonomie des sous-systèmes de productions.

3.3.5 Les systèmes multi-agents dans la chaîne logistique

Dans cette partie, nous présentons une nouvelle technologie pour les chaînes logistiques qui pourrait être utilisé en complément ou en remplacement d'autres technologies dans les PGI, dans les systèmes d'aide à la décision, dans le commerce électronique, etc. Nous focalisons cette présentation sur les systèmes d'aide à la décision permettant de gérer une chaîne logistique. Ces systèmes sont basés sur les systèmes multi-agents. Nous commençons par présenter le concept d'agent suivi de celui des systèmes multiagents, puis nous motivons l'utilisation de ces systèmes dans la chaîne logistique et enfin nous passons en revue différents travaux pour illustrer une telle utilisation. Excepté [Kimbrough et al., 2001], aucun de ces travaux ne s'est attaqué à la réduction de l'effet coup de fouet avec des agents.

Présentation du concept d'agent

Il n'existe pas une définition unique de ce que sont un agent et un système multi-agent : plusieurs définitions cohabitent. C'est la raison pour laquelle le terme agent est utilisé de façon assez vague [Ferber, 1995]. Par exemple, Wooldridge et Jennings [Wooldridge and Jennings, 1995] proposent cette définition qui est couramment retenue :

Le terme *agent* caractérise un système informatique matériel ou (plus souvent) logiciel qui comporte les caractéristiques suivantes :

- *Autonomie* : l'agent agit sans l'intervention d'humains ou d'autres intervenants, et a un certain contrôle sur ses actions et ses états internes.

- *Capacités sociales* : l’agent interagit avec d’autres agents (pouvant être des êtres humains) à l’aide d’un langage de communication d’agent.
- *Réactivité* : l’agent perçoit son environnement (qui peut être un monde physique, un utilisateur via une interface graphique, un ensemble d’autres agents, internet, ou encore tous ces éléments combinés), et répond de manière opportuniste aux changements qui y surviennent.
- *Pro-activité* : l’agent n’agit pas simplement aux stimuli de son environnement, il est aussi capable de démontrer des comportements dirigés par des buts en prenant des initiatives.

Les agents intelligents sont un nouveau paradigme de développement d’applications informatiques. Ils sont utilisés dans une variété large et croissante d’applications [Chaib-draa, 1995]. Les applications industrielles des agents, telles que le contrôle de processus, la production, la gestion de l’information ou le commerce électronique, ont été parmi les premières à être développées [Jennings and Wooldridge, 1998].

La raison pour laquelle nous parlons ici de systèmes multi-agents est que l’effet coup de fouet semble être un problème de coordination entre les entreprises et que l’autonomie de chaque entreprise force cette coordination à être décentralisée. En utilisant le paradigme des agents pour modéliser ce problème, l’une des trois formes de coordination utilisées dans les systèmes multi-agents pourrait peut-être être utilisée. Ces trois formes de coordination sont la coordination par contrats et conventions, la coordination basée sur l’apprentissage et la coordination par la communication. Nous présentons maintenant de façon plus détaillée comment l’utilisation de systèmes multi-agents dans la chaîne logistique a été motivée.

Motivation

D’après Dodd et Kumara, ce serait Mark Fox qui aurait proposé le premier d’organiser la chaîne logistique comme un réseau d’agents intelligents [Dodd and Kumara, 2001]. En effet, ces chaînes sont composées de sous-systèmes de production hétérogènes qui se regroupent en vastes coalitions dynamiques et virtuelles. Des systèmes intelligents distribués tels que les systèmes multi-agents permettent la représentation de la croissance de l’autonomie de chaque membre de ce réseau d’entreprises manufacturières. Chaque partenaire (ou sous-système) de production poursuit ses buts individuels tandis qu’il satisfait à la fois à ses contraintes locales et externes [Maturana et al., 1999]. Un (ou plusieurs) agent permet donc de représenter un acteur de la chaîne logistique (entreprise, atelier, etc.). Le paradigme des agents est une métaphore naturelle avec les organisations en réseau depuis que les unités de production distribuées possèdent les mêmes caractéristiques que les agents [Cloutier et al., 2001] (basé sur la définition d’un agent de [Wooldridge and Jennings, 1995] citée précédemment) :

- *autonomie* : une entreprise exécute des tâches d’elle-même sans intervention extérieure ;
- *capacités sociales* : un acteur de la chaîne logistique peut communiquer avec un autre acteur pour, par exemple, lui passer une commande de produits ou de services ;
- *réactivité* : une firme modifie son comportement si le marché ou la concurrence évolue ;
- *pro-activité* : une entreprise peut initier d’elle-même de nouvelles activités, comme par exemple décider de lancer un nouveau produit sur le marché ;

Problématique		Agents Autonomes	Technologie Conventionnelle
	Modèle	Economique, Biologique	Militaire
	<i>Problématiques favorisant les systèmes conventionnels</i>		
1	Optimum théorique ?	Non	Oui
2	Niveau de prédiction	Agregé	Individuel
3	Stabilité sur un ordinateur	Basse	Elevée
	<i>Problématiques favorisant les SMA</i>		
4	Ressemblance avec la réalité	Elevée	Basse
5	Nécessité de centraliser les informations ?	Non	Oui
6	Réponse aux changements	Robuste	Fragile
7	Reconfigurabilité du système	Facile	Difficile
8	Nature des logiciels	Court, Simple	Long, Complexe
9	Temps pour créer une planification	Temps Réel	Lent

FIG. 8 – Approche orientée-agent contre technologies conventionnelles [Parunak, 1996].

De plus, les systèmes multi-agents permettent d'élaborer des systèmes de production *décentralisés* plutôt que centralisés, *négociables* plutôt que planifiés, et *concurrents* plutôt que séquentiels : de ce fait, ils permettent de diminuer les contraintes induites par un contrôle centralisé, planifié et séquentiel [Parunak, 1996].

Malheureusement, l'approche basée sur les agents n'est pas la panacée pour les logiciels industriels. Comme les autres technologies, cette approche a certaines capacités et elle doit être utilisée pour les problèmes dont les caractéristiques nécessitent plutôt ses capacités. Cinq caractéristiques sont particulièrement cruciales : les agents sont notablement adaptés pour les applications *modulaires, décentralisées, changeantes, mal structurées et complexes* [Parunak, 1998]. Pour juger de la pertinence des systèmes multi-agents dans le domaine des chaînes logistiques, Parunak [Parunak, 1996] oppose l'approche basée sur les agents et les technologies conventionnelles (cf. figure 8), mettant ainsi en évidence les lacunes et les points forts de chacune des deux approches. A cet effet, les systèmes multi-agents sont identifiés aux modèles biologiques (écosystèmes) et économiques (marchés), alors que les approches traditionnelles sont comparées au standard militaire d'organisation hiérarchique. Comme le montre la figure 8, les principaux inconvénients des systèmes multi-agents sont que :

1. l'optimum théorique ne peut pas être garanti ;
2. les prédictions ne peuvent en général qu'être faites à un niveau agregé ;
3. en principe, l'implémentation d'un système multiagent peut devenir instable, puisque d'après la systémique, tout système est potentiellement instable.

Mais de l'autre côté, l'approche basée sur les agents possède des avantages sur les systèmes conventionnels :

4. du fait du contact très proche de chaque agent avec la réalité, l'estimation du système suit de près l'état du monde réel et...

5. ... cela sans recours à une base de données centralisée ;
6. du fait que le comportement global du système émerge de décisions locales, le système se réajuste automatiquement aux bruits de l'environnement et...
7. ... à la suppression et à l'addition d'agents ;
8. le logiciel de chaque agent est plus court et plus simple que celui d'une approche centralisée, ce qui fait que ce logiciel est plus facile à écrire, à déboguer et à maintenir ;
9. du fait que le système se planifie en s'exécutant, il n'y a pas de phase de planification séparée des opérations et il n'y a ainsi pas besoin d'attendre la fin de cette planification. De plus, les optima calculés par les systèmes conventionnels peuvent ne pas être réalisables en pratique et leurs prédictions, quoique plus détaillées, être inutilisables dans la réalité.

Toutes les raisons qui viennent d'être citées montrent la pertinence d'utiliser une approche basée sur les agents dans le domaine des chaînes logistiques. Grâce à leur adaptabilité, à leur autonomie et à leur capacité sociale, les systèmes à base d'agents sont une technologie viable pour l'implémentation de prise de décision et de communication en temps réel. Chaque agent représenterait une part du processus de prise de décision. Par conséquent, cela créerait un réseau agile de preneurs de décision qui réagissent au client en temps réel, par opposition au flot de processus actuel qui est décidé avant que le client ne passe une commande [Dodd and Kumara, 2001].

Illustrations

Nous illustrons maintenant l'utilisation des agents dans la chaîne logistique en présentant différents projets. Ces projets se confrontent à des problèmes différents de la chaîne logistique dont la conception et la gestion d'une chaîne sont deux grandes catégories de problématiques. De plus, la manière de résoudre ces problèmes diffère aussi en fonction des projets : par exemple, le nombre et le rôle des agents varient considérablement. Pour mettre en évidence ces différences, la figure 9 résume plusieurs projets :

1. DragonChain de Kimbrough, Wu et Zhong à l'université de Pennsylvanie (Philadelphie, PA, USA) a été implémenté pour automatiser la gestion de la chaîne logistique, et plus particulièrement pour réduire l'effet coup de fouet. Pour cela, ils se sont basés sur le modèle du jeu de la bière (à savoir les variantes *MIT Beer Game* et *Columbia Beer Game*) et ont utilisé des agents utilisant des algorithmes génétiques pour déterminer la meilleure politique de réapprovisionnement [Kimbrough et al., 2001]. Nous donnerons plus de détails dans la sous-section 3.5 sur ce travail qui est à notre connaissance le seul à mettre en œuvre des systèmes multiagents pour lutter contre l'effet coup de fouet.
2. l'Agent Building Shell de l'université de Toronto (Ontario, Canada) est une bibliothèque logicielle de classes supportant des outils d'implémentation d'agents. L'architecture de ces agents est réalisée selon quatre couches : (i) la couche de gestion de la connaissance, (ii) la couche d'ontologie, (iii) la couche de la coopération et des conflits et (iv) la couche de communication et de coordination (cette quatrième couche est supportée par le langage COOL pour *COOrdination Language*). Plusieurs chercheurs ont travaillé sur ce projet, en particulier Fox et Barbuceanu [Barbuceanu and Fox, 1996, Barbuceanu and Fox, 1995, Teigen and Barbuceanu, 1996, Beck and Fox, 1994].

	Projet	Niveau du probleme traité	Probleme traité	Méthode utilisée	Role et nombre d'agents
1	DragonChain	Gestion de la chaine logistique	Effet coup de fouet	Algorithmes génétiques pour trouver la meilleure politique de passage de commandes	1 agent / entreprise
2	Agent Building Shell	Gestion de la chaine logistique	Coordination	Langage de coordination COOL	1 agent / entreprise
3	MetaMorph 1 & 2	Gestion de la chaine logistique	Coordination	Utilisation d'agents-médiateurs	1 agent / entreprise + agents-médiateurs
4	NetMan	Gestion de la chaine logistique	Gestion des opérations intra- et interentreprises	Coordination par contrats et conventions selon le formalisme CAT	1 agent / secteur de chaque entreprise
5	BPMAT & SCL	Description de la chaine logistique	Quels sont les éléments communs a toute chaine log. ?	Comparaison de trois chaines logistiques tres differentes	BPMAT modélise les entreprises et SCL les flux entre elles
6	MASCOT	Gestion de la chaine logistique	Augmentation de l'agilité	Comparaison de plusieurs politiques de coordination	1 agent / entreprise
7	DASCh	Gestion de la chaine logistique	Exploration des techniques de modélisation des chaine log	Prise en compte des délais et incertitudes sur les flux par des agents	2 agents / entreprise + 1 agent / flux
8	Réseau de dépendance des taches	Conception et gestion de la chaine logistique	Sélection des partenaires	Comparaison de protocoles d'enchères	1 agent / entreprise
9	MASC	Conception de la chaine logistique	Sélection des partenaires	Protocole de coordination basé sur les enchères avec des contraintes	1 agent / entreprise + 2 agents annuaires
10	OCEAN	Gestion de la chaine logistique	Émergence de coopération globale a partir de compétitions entre les entreprises	Systeme de négociation dans un réseau de contrats multiagent	1 agent / entreprise (1 agent = systeme de 6 agents)

FIG. 9 – Exemples d'utilisation d'agents dans la chaîne logistique.

- MetaMorph II est une amélioration d'un premier projet appelé MetaMorph. Les agents y forment une fédération centrée sur des médiateurs qui ont deux rôles : permettre aux agents de se trouver et coordonner ces agents. Ces deux projets ont été développés à l'université de Calgary (Alberta, Canada) par Shen, Norrie, Ulieru, Maturana et d'autres [Maturana et al., 1999].
- NetMan* (*NETworked MANufacturing*) formalise les organisations et les opérations de production en réseau afin d'obtenir des réseaux manufacturiers agiles dans un environnement dynamique. Chaque entreprise est découpée en centres NetMan, c'est à dire en unités d'affaires indépendantes qui collaborent. Les centres NetMan de l'entreprise se coordonnent ensemble et avec les centres NetMan des clients et fournisseurs de l'entreprise en se basant sur des contrats et des conventions. Ces contrats et conventions sont formalisés selon le modèle CAT (*Convention, Agreement, Transaction*) [Cloutier et al., 2001, Lyonnais and Montreuil, 2001].
- BPMAT est une librairie logicielle développée par IBM [IBM Research, 2001] pour modéliser les activités d'une entreprise. SCL est un ajout à cette bibliothèque qui permet de modéliser les flux entre les entreprises. Ces outils s'appuient sur les travaux de l'équipe de Swaminathan [Swaminathan et al., 1998] de l'université Carnegie Mellon (Pittsburgh,

PA, USA) qui a cherché les éléments communs à toute chaîne logistique en comparant trois chaînes qui interviennent dans des secteurs bien distincts.

6. MASCOT (Multi-Agent Supply Chain cOordination Tool) est une architecture reconfigurable, à niveaux et basée sur les agents pour la planification et la coordination qui vise à améliorer l'agilité d'un réseau logistique. Précisément, ce système coordonne la production à travers les multiples installations (internes ou externes) de l'entreprise, et évalue les décisions de conception de nouveaux produits/sous-composants et les décisions d'affaires stratégiques [Sadeh et al., 1999]. Comme le précédent, ce travail a aussi été réalisé à l'université Carnegie Mellon (Pittsburgh, PA, USA).
7. DASCh a été développé dans ERIM (Ann Arbor, MI, USA) par l'équipe de Parunak [Parunak and VanderBok, 1998, Baumgaertel et al., 2001] pour explorer les techniques de modélisation des réseaux de fournisseurs et des fournisseurs de leurs fournisseurs. En particulier, les flux de produits et d'informations sont agentifiés afin de modéliser le fait qu'ils ne soient pas parfaits.
8. Le Réseau de Dépendance des Tâches est un protocole de marché asynchrone et décentralisé (enchères) qui permet d'allouer et de planifier des tâches parmi des agents en concurrence pour l'utilisation de ressources rares [Walsh and Wellman, 1998, Walsh, 2001]. Ce protocole est étendu dans [Walsh and Wellman, 1999] à la modélisation multi-agent de la conception de chaînes logistiques. Il s'agit d'un travail de thèse soutenu en 2001 à l'université du Michigan (Ann Arbor, MI, USA). D'autres travaux utilisent des mécanismes de marché pour coordonner une chaîne logistique, tel que [Eymann, 2001].
9. MASC étudie les modes de coordination des acteurs de la chaîne logistique. Ces modes de coordination sont des appels d'offre à des soumissionnaires qui répondent selon leur capacité et leur charge de production respectifs. Les acteurs qui remportent ces appels d'offre forment ainsi la chaîne logistique permettant d'amener un produit au consommateur [Labarthe, 2000]. Ce travail a été réalisé à l'université d'Aix-Marseille 3 (Marseille, France).
10. OCEAN (Organization and Control Emergence with an Agent Network) est un système de pilotage à architecture ouverte, décentralisée et basée sur des contraintes (distribution des ressources de production, distribution des données techniques, adaptabilité pour répondre à la dynamique de l'environnement). Le but de ce système est de montrer que des coopérations au niveau global peuvent apparaître à partir des compétitions au niveau individuel [Bournez and Gutknecht, 2001]. Ce travail a été réalisé à l'INSA de Lyon (France) et à l'université Montpellier 2 (France).

3.4 La chaîne logistique de l'industrie forestière comme exemple de chaîne logistique

Comme nous comptons valider nos solutions à l'effet coup de fouet dans l'industrie forestière, il convient de dire quelques mots de cette industrie. L'industrie des produits forestiers représente plus de 10% du produit national brut du Canada et ses exportations s'élevaient à 44,2 milliards de dollars canadiens en 1999. Ce secteur emploie directement plus de 352 000

Canadiens [Ressources naturelles Canada, 2002]. Depuis la fin des années 1990, l'énergie produite par la forêt est une préoccupation importante dans le monde industrialisé. Ceci est dû à des facteurs tels que l'augmentation du prix des énergies fossiles et des considérations environnementales concernant les émissions de CO₂. De nos jours, l'énergie basée sur la biomasse forestière est vue comme l'un des plus importants moyens potentiels pour la production d'énergie renouvelable [Asikainen, 2001]. Concernant l'industrie du papier, les principes de management actuels ne fournissent pas le moyen pour produire de façon efficace et agile. L'approche qui prévaut est de produire le plus possible afin de réduire les coûts de production unitaires grâce aux économies d'échelles. Jusqu'à présent, cette approche a donné de bons résultats dans les usines produisant de gros volumes et une petite gamme de produits [Hameri, 1994], mais elle génère des inflexibilités dans la réactivité aux fluctuations du marché [Hameri, 1996]. Au lieu de cette approche, la stratégie pourrait être de trouver un compromis entre d'une part les changements de produits fabriqués (réactivité aux fluctuations du marché) et d'autre part les coûts de production et de stockage [Bredström et al., 2001]. Concernant les planches, les scieries évoluent pour faire face au changement de leur environnement d'affaires. En effet, de nouveaux produits sont entrés sur le marché de la construction de bâtiments. Ainsi, l'acier, l'aluminium et le béton prennent des parts de marché de plus en plus importants, alors que les polymères et les matériaux composites sont de plus en plus présents dans les couches de protection contre les intempéries, dans les portes et dans les revêtements des fenêtres [Beauregard et al., 1994, Beauregard et al., 1997].

En termes de logistique et de théorie de la chaîne logistique, le secteur forestier représente un cas inhabituel à cause de son flux de matière divergent, c'est à dire que peu de matières premières (bois) permettent de créer une grande variété de produits (papiers, planches, maisons...) [Fjeld, 2001]. Le jeu du bois (*Wood Supply Game*) est l'adaptation par ajout de la divergence du flux de matière du jeu de la bière à l'industrie forestière. Il a été montré expérimentalement (en faisant jouer des personnes aux deux jeux) que l'effet coup de fouet est plus important dans le jeu du bois que dans le jeu de la bière d'un facteur voisin de cinq [Haartveit and Fjeld, 2002]. L'une des raisons de ce résultat est le comportement opportuniste des joueurs, qui est l'une des causes de l'effet coup de fouet : par exemple, les entreprises commandent plus que ce qu'elles ont réellement besoin pour profiter des promotions ou lorsqu'elles savent que leur fournisseur est en rupture de stocks [Lee et al., 1997a]. Le fait que le bois soit un matériau biologique variable est une autre particularité du secteur forestier. En effet, il peut être difficile de prédire la proportion des différentes essences de bois qui sont livrées à une entreprise [Beauregard et al., 1995]. Il est à noter enfin que le prix de ce matériau augmente régulièrement à cause de la pénurie provoquée par des coupes excessives et des problèmes environnementaux qui apparaissent dans les pays occidentaux [Beauregard et al., 1994].

Carlsson et Fullér [Carlsson and Fullér, 2001] apportent des précisions aux causes de l'effet coup de fouet dans la chaîne logistiques des papiers fins. La première est à trouver dans la structure du marché qui fait que le producteur de papier ne reçoit ni des informations précises ni des informations à jour de la demande réelle du client à cause des intermédiaires de la chaîne logistique. La deuxième est que les consommateurs anticipent les fluctuations des prix et agissent en conséquence. Il est donc difficile de trouver une relation de cause à effet des mécanismes de marché générant l'effet coup de fouet. La troisième précision concerne la forme spéciale des commandes par lots qui obligent les transports à se faire exclusivement par camions pleins. Selon Hameri [Hameri and Lehtonen, 2001], l'effet coup de fouet est répandu dans les industries de procédé (comme la foresterie) ayant de longues chaînes logistiques. La foresterie

est donc un secteur intéressant pour étudier la réduction de cet effet sur un cas réel. C'est la raison pour laquelle nous nous en inspirons, et plus particulièrement du jeu du bois, pour valider le mécanisme que nous proposons dans la sous-section 5.3. Le jeu du bois est un dérivé du jeu de la bière que nous présentons dans la sous-section suivante.

3.5 Le jeu de la bière (*Beer Game*)

Le jeu de la bière (*Beer Game*) a été proposé par Sterman dans [Sterman, 1989] pour faire prendre conscience aux étudiants et aux industriels de la dynamique d'une chaîne logistique. Il a permis de faire connaître le problème de l'effet coup de fouet à beaucoup plus de monde [Scholl, 2001]. Il s'agit d'une représentation extrêmement simplifiée d'une chaîne logistique, mais qui contient toutefois suffisamment d'éléments pour illustrer l'effet coup de fouet. Ce jeu se présente sous la forme d'un jeu de plateau comme le Monopoly où, à chaque tour, quatre personnes jouent l'une après l'autre (cf. figure 10). Chaque participant contrôle une entreprise de la chaîne de distribution de la bière (chaîne linéaire). Les quatre entreprises sont : (i) le détaillant qui vend la bière au client final (la demande du client final est représentée par un jeu de cartes sur lesquelles figurent la quantité de bière achetée pendant le tour), (ii) le grossiste qui vend des caisses de bières au détaillant, (iii) le centre de distribution qui vend au grossiste et (iv) l'usine qui réapprovisionne le centre de distribution. Le but de chaque joueur est de minimiser le total de ses coûts de stockage et d'arrérage (un arrérage est un retard de livraison d'une commande dû à une rupture de stock). Une partie se déroule de la façon suivante : à chaque tour, le joueur tenant le rôle du détaillant tire une carte qui lui indique le nombre de caisses de bière achetées par le client final. Selon cette consommation du client et le niveau de ses stocks, le détaillant passe ensuite une commande au grossiste. Vient ensuite le tour du grossiste de jouer : connaissant ce que le détaillant vient juste de lui commander et le niveau de ses stocks, il passe une commande au centre de distribution. Puis le centre de distribution et l'usine font la même chose : le centre de distribution passe une commande à l'usine et l'usine demande de la bière à un fournisseur fictif (i.e. l'usine prend de la bière dans un réservoir de taille infinie qui n'est joué par personne). Chaque joueur recevra deux tours plus tard ce qu'il vient de commander afin de représenter le temps de transport. Les entreprises n'ont pas de capacité maximale, c'est à dire qu'elles peuvent contenir (et produire pour l'usine) une quantité infinie de caisses de bière à chaque tour. On voit donc que le flux de la chaîne logistique représentée dans ce jeu est tiré par la demande des clients, et non poussé par l'usine vers le marché en fonction de prévisions du marché. Selon Sterman [Sterman, 1989], l'environnement simulé dans ce jeu est riche et contient plusieurs acteurs, rétroactions et retards temporels. L'interaction des décisions individuelles avec la structure de la firme simulée produits une agrégation de dynamiques qui diverge significativement du comportement optimal. Les joueurs sont victimes de plusieurs mauvaises perceptions des rétroactions. Plus spécifiquement, les participants ont du mal à prendre en compte les actions qui ont été initiées (passage d'une commande) mais dont les effets ne se sont pas encore produits (réception des produits commandés).

Il existe au moins trois versions informatisées de ce jeu. La première, qui permet de jouer à ce jeu sur l'internet, est de Jacobs [Jacobs, 2000]. Ses avantages par rapport au jeu de plateau original sont d'être plus rapide à installer, que les parties se déroulent plus vite et que l'analyse des résultats à la fin de la partie prend moins de temps. La deuxième approche est un programme de Philip Kaminisky et David Simchi-Levi dans lequel un joueur joue tout

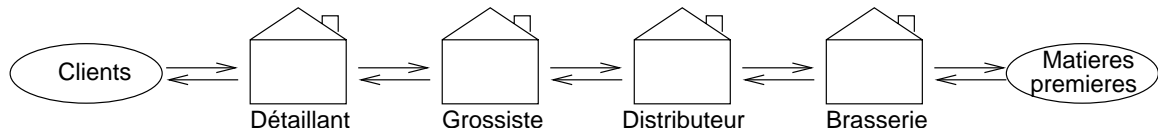


FIG. 10 – Structure du jeu de la bière (*Beer Game*) [Haartveit and Fjeld, 2002].

seul. Le joueur prend le rôle d’une entreprise, et les trois autres entreprises sont gérées automatiquement. Différentes options sont offertes (politique de gestion des stocks de chaque entreprise, longueur des retards de transport, distribution de la demande du marché...). La version 1.10, réalisée en 1999, est distribuée avec le livre [Simchi-Levi et al., 2000]. Enfin, la troisième approche est de Kimbrough et ses collègues.

Kimbrough et ses collègues [Kimbrough et al., 2001] ont eux-aussi programmé ce jeu, mais pour que des agents intelligents y jouent sans intervention humaine. Le but des agents est de minimiser le total des coûts pour l’ensemble de la chaîne logistique en utilisant un algorithme génétique. Le total des coûts est défini comme la somme sur tous les acteurs de la chaîne de leurs coûts de stockage et de pénurie. L’algorithme génétique cherche pour chacune des quatre entreprises du jeu (détaillant, grossiste, centre de distribution et usine) la meilleure stratégie de commande. Une stratégie de commande est une règle du type « Si mon client me commande X , alors je demande $X + Y$ à mon fournisseur » : l’algorithme génétique de chaque agent détermine la valeur optimale de Y , c’est à dire la valeur de Y qui obtient un total minimum des coûts de stockage et d’arréage pour l’ensemble des quatre entreprises de la chaîne. Les résultats expérimentaux des agents sont meilleurs que ceux obtenus par des joueurs humains et par la règle 1-1 (règle un pour un : chacun des agents demande à son fournisseur la même quantité que son client vient de lui demander, ce qui correspond à prendre $Y = 0$ pour la règle des quatre agents). Lors des différentes expérimentations, des paramètres ont été changés pour passer progressivement du jeu original de Serman [Serman, 1989] à la variante *Columbia Beer Game* [Chen and Samroengraja, 2000] que nous présentons à la suite. Ces paramètres modifiés sont le type de distribution de la demande du marché (déterministe ou stochastique) et les retards dans les transferts des caisses de bière (constant ou stochastique). Dans les cas où un ensemble de règles a été démontré optimal, les agents ont retrouvé ces règles. Dans les autres cas, les agents trouvent de meilleurs règles que celles qui étaient reconnues les meilleurs jusque-là.

Chen et Samroengraja [Chen and Samroengraja, 2000] ont introduit une variante au jeu de la bière du MIT. La nouvelle version a été conçue à l’université Columbia et a été baptisée jeu de la bière stationnaire (*Stationary Beer Game*) par ses géniteurs, mais on la trouve aussi sous le nom de jeu de la bière de Columbia (*Columbia Beer Game*). Les différences entre les deux jeux (MIT et Columbia) sont résumées sur la figure 11 [Kimbrough et al., 2001]. Ainsi, la demande du client peut être déterministe (4 caisses de bière pendant les 4 premières semaines, puis 8 jusqu’à la fin de la partie) ou stochastique, le temps de transfert de l’information peut être identique ou varier selon les joueurs, les pénalités d’arréage peuvent être identiques pour chacun des joueurs ou propres au seul détaillant. Par défaut, le terme *Beer Game* fait référence dans ce papier à la version de base, c’est à dire celle qui a été développée au MIT par Serman.

Fjeld et Haartveit [Fjeld, 2001, Haartveit and Fjeld, 2002] ont dérivé du jeu de la bière

	<i>Jeu de la bière du MIT</i>	<i>Jeu de la bière de Columbia</i>
Demande des clients	Déterministe	Stochastique
Retard de l'information	Identique pour tous les joueurs	Varie selon les joueurs
Retard physique	Constante positive	Constante positive
Pénalités d'arréage	Identique pour tous les joueurs	Seul le détaillant a des pénalités
Coûts de possession	Identique pour tous les joueurs	Décroissant du côté des fournisseurs
Information de la demande	Aucun joueur ne connaît la distribution de la demande	Tous les joueurs connaissent la distribution de la demande

FIG. 11 – Comparaison des jeux de la bière du MIT et de Columbia [Kimbrough et al., 2001].

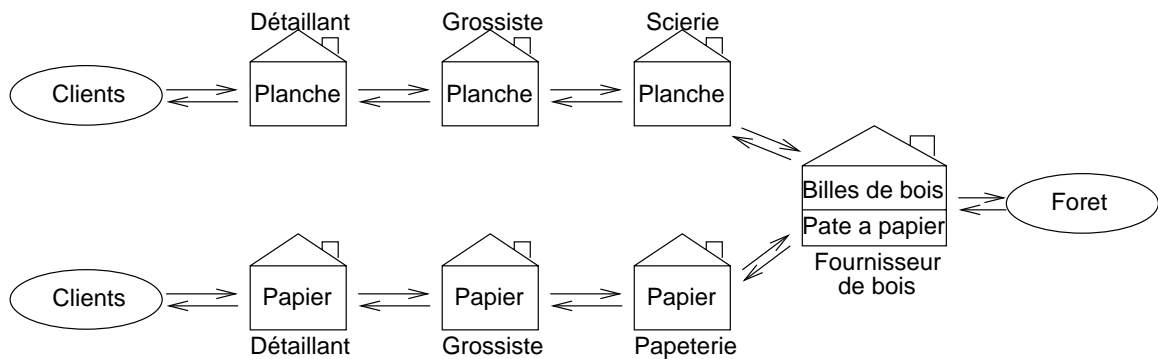


FIG. 12 – Structure du jeu du bois divergent [Haartveit and Fjeld, 2002].

classique deux autres variantes calquées sur l'industrie forestière. Ces deux variantes sont le jeu du bois divergent (*divergent wood supply game*) et le jeu du bois intégré (*integrated wood supply game*). Par rapport à l'original, la différence réside dans le fait que le flux de matière est divergent (figure 12) ou divergent avec un flux possible entre les deux sous-chaînes logistiques (figure 13). Le flux de matière entre la scierie et la papeterie du jeu intégré fait que l'effet coup de fouet est bien plus important que dans la version divergente. En effet, la variance du taux de demande du fournisseur dans le jeu du bois divergent est cinq fois celle de la brasserie dans le jeu de la bière (le fournisseur de bois et la brasserie sont au quatrième niveau de leur chaîne logistique respective), alors que la variance du taux de demande de ce même fournisseur mais dans le jeu intégré est neuf fois celle de la brasserie. En outre, en faisant jouer des étudiants au *Beer Game* et au *Wood Supply Game* et en comparant les résultats, deux hypothèses ont été dégagées [Fjeld, 2001] :

1. dans un système à flux tiré, un flux divergent accroît les coûts de chaîne logistique nécessaires pour maintenir le même niveau de service aux clients ;
2. en comparant le flux divergent du jeu du bois avec le flux linéaire du jeu de la bière, l'accroissement des coûts d'inventaires pour le joueur en amont sont plus importants pour le flux divergent.

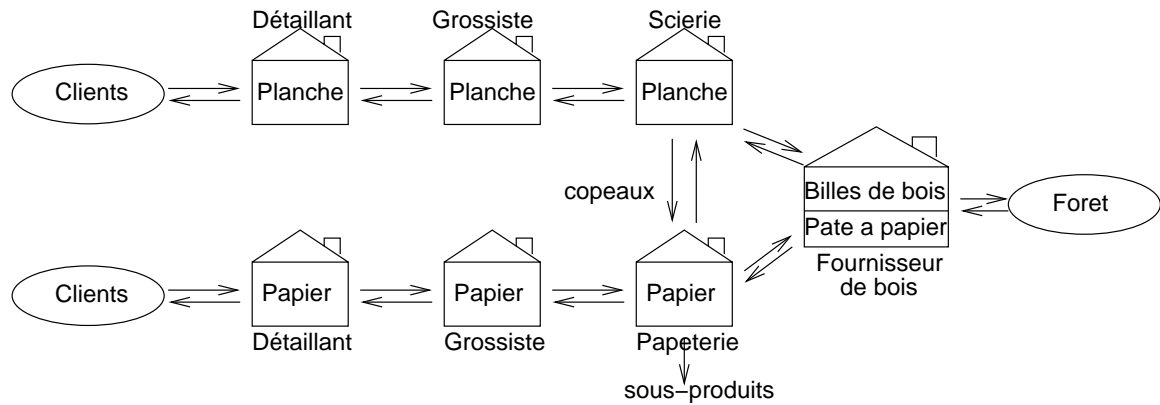


FIG. 13 – Structure du jeu du bois intégré [Haartveit and Fjeld, 2002].

3.6 Discussion

Comme le rappelle Taylor [Taylor, 2001], cela fait maintenant plus de quarante ans que Forrester a identifié et expliqué l'effet coup de fouet et malgré plusieurs papiers académiques publiés entre-temps, l'effet se produit encore dans beaucoup de chaînes logistiques. Il faut donc combler le fossé entre la théorie et la pratique. Pour cela, la solution proposée doit reposer sur des concepts clairs et faciles à mettre en œuvre, plutôt que théoriques. En particulier, il faudrait fournir des solutions pour réduire le coup de fouet qui soient prêtes à l'emploi.

De plus, Forrester [Forrester, 1958] et Lee et ses collègues [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b] ont proposé des méthodes pour réduire chacune de ces causes. Il nous semble que toutes ces solutions sont efficaces pour réduire l'effet coup de fouet, sauf celles touchant à la taille des lots. En effet, supposons qu'un client C commande 5 produits à une entreprise E qui ne produit que par lots de 10. Dans ce cas, E passe une commande de 10 unités à son fournisseur F et ce fournisseur F doit impérativement fournir 10 unités à E même s'il sait (grâce à la centralisation de l'information) qu'il y a une augmentation de la demande par rapport à ce que désire C . Il semble que la taille des lots soit une limite de la réduction du coup de fouet sous laquelle on ne peut pas descendre avec des outils de gestion de la chaîne logistique (c'est à dire comme nous le faisons). En effet, les solutions proposées pour « casser les lots » consistaient à étaient d'utiliser le commerce électronique, mais cette solution ne permet pas d'éviter que la production ou le transport se fassent préférentiellement par lots.

En outre, s'il existe une cause non encore identifiée de l'effet coup de fouet, traiter le problème cause par cause laissera de côté cette cause. Si on pouvait trouver un procédé pour traiter l'effet coup de fouet de façon globale plutôt que cause par cause, les conséquences de cette cause pourraient être atténuées, alors même que personne n'a conscience de sa présence.

Ensuite, les systèmes multiagents sont une nouvelle technologie pour la chaîne logistique ; selon les cas, elle peut être la solution idéale (cf. [Parunak, 1996] pour connaître les types de problèmes où les agents sont les mieux adaptés). Beaucoup de projets visent à les utiliser pour gérer en général la chaîne logistique, mais un seul de ces projets [Kimbrough et al., 2001] cherche à gérer la chaîne logistique de façon à réduire l'effet coup de fouet. Cette approche est basée sur les algorithmes génétiques pour déterminer la meilleure politique de commande ; or le fonctionnement par essai/erreur de ces algorithmes est incompatible avec une utilisation

industrielle. En effet, la mise en place d'agents dans une chaîne logistique réelle requiert que la solution ainsi implémentée soit utilisable instantanément.

Enfin, réduire l'effet coup de fouet est un problème de gestion de la chaîne logistique, mais cette information n'est pas suffisamment précise pour aider pas à sa résolution. Plus précisément, l'effet coup de fouet semble plus être un problème de coordination⁴ des activités des entreprises qu'un problème d'optimisation, de satisfaction de contraintes, etc. Cette coordination devrait être décentralisée afin de préserver l'autonomie des entreprises, ce qui motive l'utilisation des systèmes multiagents. La mise en œuvre de cette coordination devrait se faire dans les systèmes d'aide à la décision spécialisés dans les chaînes logistiques (APS) : *la solution proposée ressemblera finalement à un agent logiciel conseillant le gestionnaire en lui disant quand et combien il devrait commander s'il veut réduire l'effet coup de fouet, cet agent étant au contact avec les autres agents aidant leur gestionnaire respectif dans les autres entreprises de la chaîne logistique.*

4 Généralisation de l'effet coup de fouet

Dans cette section, l'effet coup de fouet est généralisé comme un problème commun à l'ensemble des systèmes distribués (sous-section 4.1), puis des solutions applicables à ces systèmes sont proposées (sous-section 4.2).

4.1 Une vision de l'effet coup de fouet élargie aux systèmes distribués

Dans la revue de littérature, nous nous sommes restreints au cas simplifié du coup de fouet dans une chaîne logistique, c'est à dire au cas d'un réseau linéaire sans cycle. En réalité, l'ensemble des entreprises s'échangent des produits et des services au sein d'un *réseau* logistique, ce qui amplifie l'effet coup de fouet [Haartveit and Fjeld, 2002]. Nous pourrions donc essayer de généraliser l'effet coup de fouet à tous les types de réseaux, mais nous pouvons être encore plus large en considérant plutôt les *systèmes distribués traversés par un flux*. Les systèmes distribués semblent être ici le concept le plus général à considérer lorsque l'on s'intéresse au milieu de propagation de l'effet coup de fouet. En effet, vu de cette manière, l'effet coup de fouet peut être mis en évidence dans d'autres domaines que la chaîne logistique. En particulier,

- *les différents types de réseaux* : les réseaux informatiques (routage des informations d'un point à un autre du réseau et affectation des tâches entre les différentes machines participant au même flux de tâches (*workflow*)), le réseau routier d'une ville (aiguillage des automobiles d'un point à un autre de la carte), etc. Par exemple, nous avons vu dans la revue de littérature (sous-section 3.1) une étude de l'effet coup de fouet basée sur la mécanique des fluides introduite en faisant un parallèle entre les réseaux logistique et routier [Daganzo, 2001] : les fluctuations « vers le haut » de l'effet coup de fouet correspondent à un embouteillage sur la route, alors que les fluctuations « vers le bas » de l'effet coup de fouet correspondent à des routes vides. Au niveau du réseau routier d'une ville, la réduction de l'effet coup de fouet revient alors à homogénéiser le trafic routier sur l'ensemble de la journée et sur l'ensemble des avenues, boulevards et rues.

⁴Dans notre esprit, la coordination inclut la synchronisation, voir par exemple [Lizotte and Chaib-draa, 1997].

- *la macro-économie* : l'économie est un système distribué, car son comportement global est le résultat du comportement individuel d'un grand nombre d'entités en interrelation. Les fluctuations « vers le haut » de l'effet coup de fouet correspondent ici à une période de croissance économique, alors que les fluctuations « vers le bas » correspondent à une récession. Traditionnellement, l'économie mondiale (le système le plus global que l'on puisse considérer ici) fonctionnait par cycle de 25 années de croissance suivies de 25 années de récession. Ce fonctionnement cyclique semble de moins en moins vrai de nos jours, car la durée des cycles est bien plus courte et les croissances et les crises sont moins marquées que par le passé. Cela est dû, au moins en partie, aux actions des États (certaines entités du système distribué précédent) qui ont appris⁵ avec le temps à manipuler certains leviers (impôts, subventions, taux d'intérêts, grands travaux...) : ils tentent d'accélérer ainsi leur économie nationale lors des crises en consommant des réserves et on peut supposer qu'ils reconstituent ensuite, en prévision de la prochaine crise, les ressources qu'ils viennent de dépenser et que cette reconstitution se fasse en freinant l'économie lorsqu'elle s'emballe. Par exemple, l'économie canadienne va présentement trop bien. Pour éviter l'inflation (l'inflation est un phénomène économique qui se traduit par une hausse des prix généralisée, dû, selon certains économistes, à une circulation monétaire excessive, ou, selon d'autres, à un déséquilibre entre l'offre et la demande globale des biens et des services disponibles sur le marché [Hachette, 2002]), la Banque du Canada augmente ses taux directeurs au détriment de la croissance économique : les banques du pays réagissent en effet à cette augmentation en augmentant leurs taux d'intérêt, ce qui rend les investissements bancaires plus intéressants par rapport à la consommation, ce qui finalement ralentit l'économie du pays en favorisant la mise en réserve de l'argent plutôt que son investissement.
- *les organisations humaines* : les organisations humaines sont des systèmes distribués dont les entités sont des personnes qui peuvent être reliées par des liens hiérarchiques, des liens de communication, etc. L'effet coup de fouet peut se manifester par exemple lors de l'affectation de tâches entre les différentes personnes participant au même ensemble de tâches à exécuter en série (*workflow*), lors de la gestion du progrès dans une entreprise, etc. Par exemple, on peut comparer la gestion du progrès dans une entreprise et l'arrivée d'une commande dans une entreprise de la chaîne logistique, car la fréquence des améliorations est généralement très irrégulière : c'est à dire que ces améliorations sont mises en œuvre n'importe quand et ont une portée allant d'insignifiante à révolutionnaire. Les Japonais ont constaté qu'il était plus efficace sur le long terme d'avoir une suite continue de petites améliorations (ce qu'ils appellent *Kaizen* pour « amélioration continue »), plutôt que quelques grandes améliorations entrecoupées de longues périodes d'attente. L'un des avantages de faire de la sorte est de laisser le temps à chaque employé de s'adapter à l'amélioration. Ainsi, réduire l'effet coup de fouet dans la mise en place du progrès dans une entreprise permet à cette entreprise de s'améliorer plus vite.
- *les circuits électroniques* : de tels circuits peuvent aussi être vus comme des systèmes distribués, puisqu'ils sont constitués de composants électroniques (résistances électriques, condensateurs, bobines, transistors, etc.) reliés les uns aux autres par des fils. L'effet

⁵La réduction de l'effet coup de fouet dans un système distribué se fait-elle toujours par un mécanisme d'apprentissage? Est-il possible de savoir instantanément comment agir sur les « leviers » qui sont à notre disposition?

coup de fouet peut prendre la forme d'oscillations de la tension qui font « griller » des composants lors de surtensions. Les circuits électroniques sont utilisés par exemple dans les systèmes d'asservissement en automatique pour contrôler la vitesse d'un moteur électrique, la position d'un bras de robot, etc. Dans ce cas, les oscillations sont gênantes par elles-mêmes : la vitesse d'un moteur électrique doit être constante si on veut l'utiliser sur une locomotive, la position du bras d'un robot doit être stable si l'on veut l'utiliser pour assembler des automobiles. De façon générale, les oscillations qui peuvent apparaître dans les circuits électroniques sont toujours causées par la mauvaise prise en compte des rétroactions. Ces oscillations n'ont donc qu'une cause, alors que les chaînes logistiques ont non seulement cette cause (cf. la mauvaise perception des rétroactions [Sterman, 1989]), mais aussi des causes qui leur sont propres (cf. les causes proposées par Forrester [Forrester, 1958] et Lee et ses collègues [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b]). Par conséquent, les oscillations dans un système asservi sont un cas particulier de l'effet coup de fouet qui est très simple.

Ces exemples montrent que l'on peut voir l'effet coup de fouet ailleurs que dans une chaîne logistique. Il pourrait être intéressant de comparer les ressemblances entre les causes de l'effet dans les domaines cités. Par exemple, les erreurs d'appréciation des conséquences de passer telle ou telle commande dans la chaîne logistique (cause mise en avant dans [Sterman, 1989]) ressemblent aux erreurs d'appréciation de l'impact sur le débit global d'une route causé par la conduite plus ou moins agressive et plus ou moins rapide d'un automobiliste par rapport à celle des autres véhicules : dans les deux cas, il s'agit d'une erreur de perception par un humain des conséquences de ses actions sur l'ensemble du système. Faire de tels parallèles entre les causes des fluctuations de différents systèmes distribués permettrait peut-être de mettre en évidence de nouvelles causes de l'effet coup de fouet dans la chaîne logistique.

4.2 Réduction de l'effet coup de fouet dans le cas général

Quelque soit le système distribué considéré, il semble que ce sont les excès (dans le sens trop grand bien sûr, mais aussi trop petit) par rapport à la normale qui soient néfastes. Il faudrait donc lisser la grandeur qui subit l'effet coup de fouet. La notion d'*équilibre* permet ce lissage. L'équilibre rappelle le principe du *Ying* et du *Yang* des Orientaux selon lequel la meilleure voie à emprunter est celle du milieu, car si l'on préfère une extrême plutôt qu'une autre, on va regretter de ne pas bénéficier des avantages générés par l'extrême qui n'a pas été choisie. Au contraire, en préférant la voie médiane, d'une part, on bénéficie en même temps (mais pas dans leur totalité) des avantages générés par les différentes extrêmes, et d'autre part, on évite que la dynamique du système provoque des va-et-vients continus (coup de fouet) entre ces extrêmes.

De façon plus pragmatique, lutter contre l'effet coup de fouet dans n'importe quel système distribué revient à éviter les phénomènes de saturation (les fluctuations « vers le haut » de l'effet coup de fouet) et de pénurie (les fluctuations « vers le bas ») sur les liens reliant les entités du système distribué. Cette méthode de réduction⁶ revient à stabiliser une quantité qui fluctue entre les entités du système. Selon le domaine étudié, cette quantité externe aux

⁶Une autre façon de gérer les conséquences de l'effet coup de fouet est d'augmenter le débit des goulots d'étranglement du réseau, car le débit global du flux parcourant le système est égal au débit de l'entité de plus petite capacité. Cette solution revient plus à ignorer le problème qu'à le résoudre vraiment, puisqu'on gère ses conséquences sans s'attaquer à ses causes.

entités mesure un volume d'information ou de travail dans un réseau informatique, un volume de travail dans une organisation humaine ou encore une densité de véhicules dans un réseau routier. La stabilisation de cette quantité externe est obtenue par *suppression des écarts de cette quantité externe avec le niveau normal moyen (normal) de cette quantité* sur tout le système, c'est à dire par *homogénéisation spatiale et/ou temporelle* du niveau de cette quantité. Plus précisément, ces deux types d'homogénéisation peuvent se décrire comme suit :

- L'*homogénéisation temporelle* consiste à utiliser une autre quantité, celle-là interne aux entités du système, qui fluctue inversement à la quantité externe que l'on veut stabiliser : la grandeur interne fluctue pour éviter que la grandeur externe ne change. Lorsque la quantité externe essaye d'augmenter, le surplus de cette quantité externe (mesuré par rapport à son niveau moyen) est convertie en quantité interne. Réciproquement, la quantité interne qui vient d'être stockée est consommée plus tard pour soutenir la quantité externe lorsqu'elle essaye de diminuer. Comme l'illustre la figure 14, on a donc une équation du type : (niveau de la quantité interne à l'entrée) + (niveau de la quantité externe stockée) = (niveau de la quantité externe à la sortie) = constante. Cette équation est simplifiée, car selon les cas, des coefficients de proportionnalité peuvent s'y ajouter et surtout les grandeurs internes et externes n'ont pas forcément la même unité de mesure. Dans ce mécanisme, le rôle de l'entité est de stocker la quantité externe ; ce stockage peut se faire selon les cas, soit directement, soit après avoir converti la grandeur extérieure en une grandeur interne adaptée au stockage. Grâce à ce mécanisme, la quantité externe ressort de l'entité « nettoyée » de ses fluctuations. Il s'agit d'un déplacement temporel : la quantité qui doit transiter par l'entité E transite plus tôt ou plus tard que normalement. La quantité externe est ici ce qui est transmis d'une entité à l'autre et la quantité interne est cette même quantité stockée dans l'entité. Ce stockage peut se faire à l'entrée et/ou à la sortie de l'entité. Enfin, le principe de l'homogénéisation temporelle est de déplacer le problème : la quantité interne qui varie doit donc être choisie de façon à ce que sa fluctuation ne soit pas gênante.

Par exemple, la grandeur externe peut être des paquets d'information sur un réseau informatique et la grandeur interne être ces mêmes paquets qui sont stockés dans une file d'attente. Ou encore, si l'on reprend l'exemple du trafic routier, cela revient à inciter les gens à ne pas quitter leur travail tous en même temps, mais plutôt à ce que certains partent plus tôt et d'autres plus tard. Dans une chaîne logistique (resp. entreprise manufacturière), l'ordonnancement de la production peut être lissée de la même manière en faisant des tâches plus tôt que requis (quitte à stocker la production) afin d'éviter la surcharge de l'entreprise (resp. poste de travail) concernée.

- L'*homogénéisation spatiale* consiste à distribuer de façon homogène la charge (de travail, de produits, de véhicule, d'informations, etc.) de tous les liens inter-entités⁷ de façon à obtenir un lissage sur l'ensemble du système (en particulier, un lissage réparti sur les entités proches de l'entité dont le lien est saturé). Ces liens alternatifs doivent respecter certaines caractéristiques qui dépendent du cas considéré. Cette homogénéisation spatiale peut aussi se voir comme un déplacement spatial : la quantité extérieure qui devait transiter par le lien L transitera plutôt par le lien disponible équivalent L' (ou encore se partagera entre L et L' , ou entre L , L' et L'' , etc.).

⁷À priori, on ne s'intéresse pas ici à la charge des entités elles-mêmes : l'effet coup de fouet semble ne concerner que la charge des liens inter-entités.

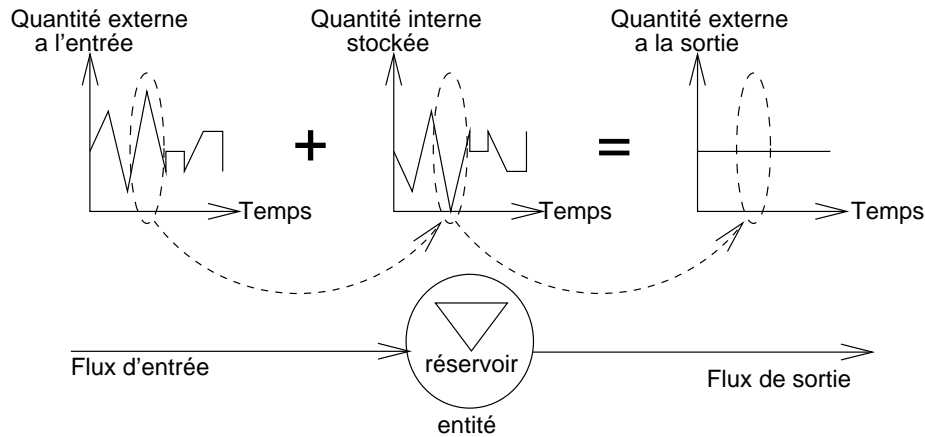


FIG. 14 – Lutte contre l'effet coup de fouet par homogénéisation temporelle.

Par exemple, on peut éviter la saturation d'une branche d'un réseau informatique en routant les paquets d'information par une autre branche. Lutter contre les embouteillages dans une ville peut se faire en incitant les automobilistes à ne pas tous se ruer sur les mêmes routes grâce à des panneaux d'information annonçant la fluidité du trafic⁸. Enfin, éviter l'effet coup de fouet dans un réseau logistique (et non dans une chaîne logistique) peut se faire en faisant transiter à l'instant t les produits par une entreprise momentanément sous-utilisée à t plutôt que par l'entreprise habituelle, car celle-ci est saturée à l'instant t .

Que ce soit lors d'une homogénéisation temporelle ou lors d'une homogénéisation spatiale, les solutions que nous proposons à l'effet coup de fouet impliquent de faire *subir des changements physiques ou comportementaux aux entités du système*. *A priori*, la mise en œuvre de ces changements est plus simple si aucune entité n'est contrôlée par un humain. En effet, il ne faut alors leur donner que les moyens matériels de retirer l'effet coup de fouet en ajoutant des réservoirs dans lesquels le niveau de la grandeur interne peut fluctuer pour faire de l'homogénéisation temporelle (changement physique) ; faire de l'homogénéisation spatiale suppose juste de savoir comment la faire, c'est à dire comment ne pas surcharger plus une entité déjà saturée tout en sollicitant à la place une entité sous-utilisée (changement comportemental). Au contraire, si des entités sont contrôlées par des humains, des résistances aux changements risquent d'apparaître. Il s'agit alors de trouver comment aligner les motivations de ces personnes pour que toutes acceptent de participer à l'élimination de l'effet coup de fouet. Cet alignement des motivations individuelles de chaque humain responsable d'une entité peut se réaliser de deux façons très proches. Ces deux manières d'aligner les motivations sont proches, car elles reposent sur des transferts de biens (argent, etc.) et la seule chose qui les distingue réside dans la manière de présenter les choses :

- on pourrait par exemple expliquer à chacun qu'il aurait tout à y gagner s'il faisait partie

⁸Cela peut aussi se faire en construisant des routes parallèles aux routes habituellement embouteillées. La caractéristique que ces nouvelles routes doivent avoir est de relier des zones géographiques attirant les gens qui utilisent les routes présentement embouteillées. Mais cette méthode permet juste de gérer les conséquences de l'effet coup de fouet.

d'un système qui fonctionne mieux (situation gagnant-gagnant). C'est à dire que, si l'entité E retire le coup de fouet dans la grandeur externe qu'elle envoie à E' , alors E' doit donner pour cela une gratification à E . En effet, c'est l'entité destinataire E' qui est directement bénéficiaire du retrait du coup de fouet, alors que c'est l'entité E qui a fait l'effort de le retirer (même si l'entité E y gagne aussi indirectement du fait qu'elle appartient à un système qui fonctionne mieux).

- on pourrait également forcer les entités (donc les humains qui les contrôlent) à participer à l'élimination du coup de fouet. C'est aussi une situation gagnant-gagnant, sauf que cette fois-ci l'on ne demande pas leur avis aux participants du système. Pour ce faire, un « chef d'orchestre » (par exemple l'État) impose à toutes les entités de faire ce nettoyage sous peine de pénalités. Ces pénalités peuvent ensuite être reversées aux entités qui ont du mal à faire le changement nécessaire à l'élimination du coup de fouet.

5 Propositions pour réduire l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique

Nous venons de généraliser l'effet coup de fouet à des domaines autres que la chaîne logistique. A partir de cette vision générale de l'effet coup de fouet, nous avons proposé deux méthodes pour réduire l'effet coup de fouet, à savoir les homogénéisations spatiale et temporelle. Dans cette section, nous commençons par caractériser le type de solution à mettre en place dans une chaîne logistique : en particulier, nous ne pourrions utiliser que l'homogénéisation temporelle. En effet, utiliser l'homogénéisation spatiale ne peut se faire que dans un réseau logistique, ce qui impliquerait d'élargir le problème aux réseaux : pour simplifier le problème, nous allons en rester à la chaîne logistique (sous-section 5.1). Après avoir caractérisé la solution recherchée dans la chaîne logistique, nous proposerons une mesure instantanée de l'effet coup de fouet (sous-section 5.2). Cette façon de mesurer l'effet coup de fouet est ensuite utilisée pour mettre en œuvre l'homogénéisation temporelle dans la chaîne logistique. Cette homogénéisation temporelle est implémentée sous la forme d'un mécanisme de coordination décentralisé utilisant un système de jetons (sous-section 5.3). Ce mécanisme de coordination décentralisé sera validé expérimentalement grâce à un système multi-agent lors de la simulation d'une chaîne logistique. Enfin, les contributions de cette recherche (le mécanisme de coordination à base de jetons, la modélisation et la simulation d'une chaîne logistique par un système multi-agent...) seront présentées (sous-section 5.4).

5.1 Caractérisation de la solution attendue dans une chaîne logistique

Tout d'abord, les entreprises doivent savoir si leur manière de commander génère ou réduit l'effet coup de fouet. Pour cela, elles doivent utiliser une mesure instantanée ou à très court terme de cet effet, plutôt qu'une mesure sur le long terme basée sur un écart-type. En effet, la première étape vers une bonne technique de réduction de l'effet coup de fouet est la quantification la plus précise possible de cet effet : la mesure instantanée permet de « rectifier le tir » rapidement après avoir fait une erreur générant le coup de fouet et elle permet surtout d'éviter de faire de telles erreurs en aidant à bien passer les commandes. Ainsi, les entreprises savent en temps réel si la commande qu'elles passent va être perçue ou non comme une fluctuation

de la demande par les fournisseurs. *A priori*, la solution attendue devrait reposer ou s'aider de cette mesure instantanée.

La quantification instantanée de l'effet coup de fouet est un problème en soi. La solution de réduction de l'effet coup de fouet recherchée doit inciter chaque entreprise E à ne pas créer de fluctuations dans la demande lorsqu'elle la fait transiter de son client vers son fournisseur. Plus précisément, pour annuler l'effet coup de fouet, il faut qu'à chaque instant le débit de produits demandé à E par le client de E soit égal au débit que E demande à son fournisseur. Or les débits se mesurent en nombre de produits par unité de temps. Par conséquent, la technique proposée doit inciter l'entreprise E à passer des commandes dont le rapport du nombre d'items commandés sur le temps séparant chaque passage de commande (ce rapport est un débit) soit le même que celui de son client. Le rapport du nombre d'items commandés sur le temps séparant chaque passage de commande, c'est à dire le débit de produits, est une quantification possible de l'effet coup de fouet. Nous y reviendrons plus en détail dans la sous-section 5.2.

Il convient également de préciser que les bénéficiaires directs de la réduction de l'effet coup de fouet ne sont pas ceux qui ont mené des actions contre cet effet. C'est à dire que si l'entreprise E reçoit des commandes qui fluctuent beaucoup, mais qu'elle commande de manière stable, alors E supporte les éventuels coûts et inconvénients d'avoir réduit l'effet coup de fouet. Par contre, ce sont les fournisseurs de E qui vont bénéficier de cette réduction de l'effet coup de fouet. En fait, E peut gagner indirectement en facilitant la vie à ses fournisseurs, car si ses fournisseurs sont plus efficaces, il seront plus enclin à l'avenir à lui « faire une fleur », par exemple en baissant les prix... mais cela n'est pas sûr du tout ! En fait, celui qui mène une action contre l'effet coup de fouet et celui qui en bénéficie directement sont deux entreprises différentes, ce qui veut dire qu'il doit y avoir une entente entre ces deux entreprises pour partager les coûts et les bénéfices de réduire l'effet coup de fouet. En effet, convaincre une entreprise individuelle de devenir un maillon d'une chaîne logistique nécessite une situation de gagnant-gagnant pour chaque participant sur le long terme, même si ce n'est généralement pas le cas sur le court terme [Stadtler, 2000]. Par conséquent, si la technique proposée est contraignante ou coûteuse pour les entreprises, un système de compensation doit en faire partie si l'on veut atteindre l'objectif précédent, car les bénéficiaires de la réduction du coup de fouet ne sont pas ceux qui font un effort pour le réduire.

De plus, les entreprises doivent préserver au maximum leur autonomie, ce qui sous-entend que l'approche devra plutôt être décentralisée.

Toutefois, comme Chen et ses collègues [Chen et al., 1994] l'ont montré, la centralisation de l'information permet de réduire notablement l'effet coup de fouet. En effet, la centralisation de l'information permet de réduire l'incertain dans l'information dont disposent les entreprises pour prendre leurs décisions. Cette réduction de l'incertain est une importante contribution à la réduction de l'effet coup de fouet [Balasubramanian et al., 2001, Fransoo and Wouters, 2000]. Par conséquent, *la centralisation de l'information est une base sur laquelle nous pouvons appuyer de nouvelles techniques de réduction de l'effet coup de fouet.*

Enfin, il semble qu'il ne soit pas possible d'éliminer totalement l'effet coup de fouet généré par chaque entreprise car la taille des lots impose obligatoirement de réduire ou d'augmenter la taille des commandes adressées par une entreprise à son fournisseur. Par contre, il pourrait être intéressant de voir si l'effet coup de fouet généré par la taille des lots à un endroit de la chaîne logistique peut ensuite être « rattrapé » plus loin dans la chaîne. Cela semble tout à fait possible : par exemple, s'il y a une centralisation de l'information, une entreprise qui reçoit une commande excessivement petite ou grande sait qu'elle n'a pas affaire à une baisse ou à une

hausse du marché, mais à un effet généré par les tailles de lot. Elle sait alors qu'elle ne doit pas réagir à cette fluctuation, car plus tard une fluctuation inverse viendra la compenser ; c'est à dire que l'entreprise doit planifier son activité comme si on lui avait demandé une commande ayant la taille de la demande moyenne du marché et laisser ses stocks amortir cette fluctuation passagère, même si cela l'oblige à consommer ses stocks de sécurité.

5.2 Mesure instantanée de l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique

Pour être capable de lutter contre l'effet coup de fouet, il faut pouvoir l'identifier lorsqu'il apparaît. Cette identification nécessite la définition d'une métrique. Comme l'effet coup de fouet est une variation dans la demande adressée à une entreprise, différents auteurs [Balasubramanian et al., 2001, Fransoo and Wouters, 2000] utilisent l'*écart-type* μ pour le quantifier sur une longue période. L'écart-type μ est la moyenne des écarts entre la demande à un moment donné et le niveau moyen de cette demande. Sur la figure 2, l'écart-type est presque nul sur le graphe du détaillant (à gauche). Cela signifie que toutes les commandes ont à peu près la même taille. Par exemple, les consommateurs achètent tous les mois autour de 10 000 unités de produit au détaillant, avec très peu de produits en plus ou en moins. Par conséquent, la moyenne vaut $\mu_{detaillant} = 10\ 000$ et l'écart-type $\sigma_{detaillant} \approx 0$. Ensuite, toujours sur la figure 2, l'écart-type est assez important sur le graphe de l'usine (à droite). Cela signifie que les commandes ne se ressemblent pas. Si on poursuit l'exemple précédent, le grossiste de la figure 2 demande mensuellement environ 10 000 produits à l'usine, mais avec de grandes fluctuations autour de cette moyenne. Par exemple, il peut y avoir une demande de 12 000 items les mois pairs et de 8 000 unités les mois impairs (cela ne correspond pas du tout au graphe de droite de la figure 2) : dans ce cas, la demande moyenne pour l'usine $\mu_{usine} = 10\ 000$ est identique au $\mu_{detaillant}$, mais avec un écart-type $\sigma_{usine} = 2\ 000$ supérieur à $\sigma_{detaillant} \approx 0$. Cette croissance de l'écart-type entre le détaillant et l'usine caractérise l'effet coup de fouet. Sur cet exemple très simple, on a l'égalité $demande = \mu \pm \sigma$ à tous les échelons de la chaîne logistique, mais cette relation n'est pas vraie dans le cas général. Dans la réalité, la mesure de la contribution d'une entreprise à l'effet coup de fouet est bien plus compliquée que ce que nous venons d'expliquer. En effet, la collecte et l'analyse des données requiert un effort important. À cet égard, Fransoo et Wouters [Fransoo and Wouters, 2000] notent que la mesure de l'effet coup de fouet soulève certains problèmes liés à :

1. *l'agrégation des données* : les mêmes données de base peuvent mener à des mesures différentes de l'effet coup de fouet selon la séquence d'agrégations suivie lors de l'analyse. L'agrégation des données consiste à regrouper dans une même catégorie les données concernant des produits différents afin de réduire le volume de ces données (par exemple, on peut regrouper les produits de couleur verte avec les produits de couleur jaune pour n'avoir qu'un seul ensemble de données à considérer, plutôt qu'un pour les produits verts et un pour les jaunes). Lors d'une démarche de réduction de l'effet coup de fouet, l'agrégation des données à collecter peut être considérée selon quatre niveaux d'agrégation : (i) en fonction du produit et de l'entreprise (c'est le plus détaillé puisque pour chaque entreprise on mesure l'effet coup de fouet pour chaque produit), (ii) en fonction du produit (pour chaque produit, on mesure l'effet coup de fouet sur l'ensemble de la chaîne, c'est à dire entre le fournisseur le plus en amont et le détaillant qui est en contact avec le client final), (iii) en fonction de l'entreprise (en agrégeant tous les produits) et (iv) en fonction du niveau dans la chaîne logistique (en agrégeant tous les produits pour,

par exemple, tous les grossistes). Si on a besoin d'une unique mesure de l'effet coup de fouet, une moyenne pondérée de toutes les mesures peut être calculées, mais selon le niveau d'agrégation retenu, des différences considérables peuvent apparaître dans le résultat obtenu.

2. *l'incomplétude des données* : il semble très difficile de collecter des données électroniques fiables et exploitables dans les points de vente, car les données sont parfois incomplètes ou disponibles à un niveau hautement agrégé. Cela mène alors à une inconsistance entre la demande reçue et la demande émise par une entreprise : ces données ne sont pas comparables, c'est à dire qu'on ne peut pas calculer le ratio de l'une pour la comparer à une autre.
3. *l'isolement des données sur la demande pour des chaînes d'approvisionnement appartenant à un réseau logistique plus important* : la chaîne logistique étudiée peut ne pas être totalement séparables du reste du réseau, car chaque entreprise appartient en fait à un réseau d'approvisionnement et possède donc des fournisseurs et des clients hors de la chaîne étudiée.

Utiliser l'écart-type pour mesurer l'effet coup de fouet suppose que cet effet est évalué sur une longue période L (année). Lorsque l'on cherche à mettre en place un mécanisme de réduction de cet effet, il peut être plus intéressant d'avoir une quantification instantanée de cet effet, c'est à dire une évaluation pour chaque instant de ce qui se passerait au niveau du coup de fouet si une commande pour telle ou telle quantité était passée. L'écart-type se définit comme la moyenne des écarts avec la moyenne sur la période L : l'idée pour obtenir une évaluation instantanée de l'effet est de ne calculer que les écarts avec la moyenne, sans ensuite les agréger en calculant la moyenne de ces écarts.

Notre *quantification instantanée de l'effet coup de fouet se base sur le débit de produits à l'entrée de l'entreprise mesurée* (ici, l'entrée de l'entreprise est l'endroit où entrent les produits arrivant du fournisseur) *comparé au débit $m(t)$ demandé par le marché* à l'instant t ($m(t)$ est mesuré en produits par unité de temps)⁹. Pour simplifier l'explication, nous supposons dans un premier temps que $m(t)$ est constant au cours du temps. Pour que l'effet coup de fouet soit nul, il faut que le débit des commandes soit le même que le débit demandé par le marché. Si l'un est supérieur à l'autre à un moment donné, alors il sera ou il a été inférieur à un autre moment : des fluctuations apparaissent, c'est à dire qu'on a affaire à l'effet coup de fouet. Comme un débit est une quantité de produits divisée par un temps, le débit au niveau de l'entreprise se calcule par le rapport de la quantité commandée sur le temps séparant chaque passage de commande. Notons $Q_f(n)$ la quantité demandée au fournisseur à la commande n et $T_f(n)$ le moment de la commande n . Ainsi, le débit de l'entreprise entre les commandes $n - 1$ et n vaut $Q_f(n)/\Delta T_f(n)$, où $\Delta T_f(n) = T_f(n - 1) - T_f(n)$ est le temps séparant ces deux commandes. Si ce rapport est supérieur (resp. inférieur) à $m(T_f(n))$, la commande n que l'on veut passer à l'instant $T_f(n)$ sera perçue comme une hausse (resp. baisse) de la demande. La taille de la commande idéale pour annuler l'effet coup de fouet doit donc satisfaire à la condition $Q_f(n)/\Delta T_f(n) = m(T_f(n))$. La quantité $[Q_f(n)/\Delta T_f(n) - m(T_f(n))]$ permet donc de mesurer de façon instantanée l'effet coup de fouet entre l'entrée de l'entreprise considérée et le marché ; en fait, c'est la mesure la plus instantanée que l'on puisse obtenir puisque les commandes sont discrètes. Obtenir une mesure entre l'entrée et la sortie de l'entreprise semble

⁹Les notations utilisées sont résumées dans l'annexe.

plus difficile, car il faudrait comparer cette quantité pour l'entreprise considérée et pour son client direct : comme la fréquence des commandes de chaque entreprise est différente, cette comparaison est difficile. En outre, on peut retrouver l'écart-type σ sur la période L dont on parlait plus haut. Comme l'écart-type σ est la moyenne des écarts avec la moyenne sur la période L , on a l'égalité¹⁰ :

$$\sigma = Moyenne_{0 \leq t \leq L} \left(\frac{Q_f(t)}{T_f(t)} - m(t) \right) \quad (1)$$

Donnons une illustration de l'utilisation de cette mesure de l'effet coup de fouet. Supposons que (i) l'on ne considère qu'un seul type de produit, (ii) la taille des commandes est imposée par la taille des lots produits et par le volume transportable dans un camion (afin de réduire au maximum les coûts unitaires) et (iii) la demande du marché vaut $m = 4$ unités par période en moyenne avec des fluctuations négligeables autour de cette moyenne. Alors (ii) impose que $Q_f(n)$ ne peut prendre que les valeurs discrètes 3, 5 et 7 ($Q_f(n) \in \{3; 5, 7\}$) et (iii) nous oblige à avoir pour la commande n : $Q_f(n)/\Delta T_f(n) = m(T_f(n)) = m$. Comme $Q_f(n)$ est à peu près fixé par son ensemble de définition discret, la question est de trouver la valeur de $T_f(n)$ qui satisfasse $Q_f(n)/\Delta T_f(n) = m$. Finalement, notre entreprise passera une commande soit pour $Q_f(n) = 3$ produits à l'instant $T_f(n) = 3/6 = 1/2$, soit pour $Q_f(n) = 5$ produits à l'instant $T_f(n) = 5/6$, soit enfin pour $Q_f(n) = 7$ produits à l'instant $T_f(n) = 7/6$. Cette commande aura l'index n (par exemple, c'est la n -ème commande depuis la création de l'entreprise).

Enfin, nous avons supposé jusqu'à présent que le débit $m(t)$ du marché à l'instant t était constant. Cette hypothèse nous a permis de présenter plus simplement notre mesure instantanée de l'effet coup de fouet, mais elle n'est vraie que dans le cas très particulier du marché strictement constant. Si l'on retire cette hypothèse, on peut déduire du résultat précédent une condition de l'annulation de l'effet coup de fouet qui est valable quelque soit la forme de la demande du marché. Lorsqu'une entreprise passe une commande, elle ne cherche pas à ce que le débit du flux de produits qui la traverse soit égal au débit que veut le marché au même moment : elle veut plutôt que *le débit du flux qui la traverse soit égal au débit que le marché voudra quand ces produits arriveront sur le marché*. Notons d le temps moyen pour qu'un produit aille de l'entrée de l'entreprise considérée (avant toute opération) jusqu'au point de vente. On veut que le débit $Q_f(n)/\Delta T_f(n)$ lorsque l'on passe la commande n soit égal à la demande $m(T_f(n) + d)$ que voudra le marché dans un temps d plus tard. Pour connaître $m(T_f(n) + d)$, il est nécessaire de faire des *prévisions* (par exemple, avec une moyenne mobile sur les derniers $m(t)$ connus, un lissage exponentiel, etc.). Finalement, la relation générale qui caractérise une commande ne générant pas de coup de fouet est donnée par l'équation 2 :

$$\boxed{\frac{Q_f(n)}{\Delta T_f(n)} = m(T_f(n) + d)} \quad (2)$$

La quantification $CF(n)$ de l'effet coup de fouet généré par la commande n passée à l'instant $T_f(n)$ s'en déduit directement ; elle est donnée par l'équation 3 :

$$CF(n) = \frac{Q_f(n)}{\Delta T_f(n)} - m(T_f(n) + d) \quad (3)$$

¹⁰Ce résultat intuitif devra être démontré formellement.

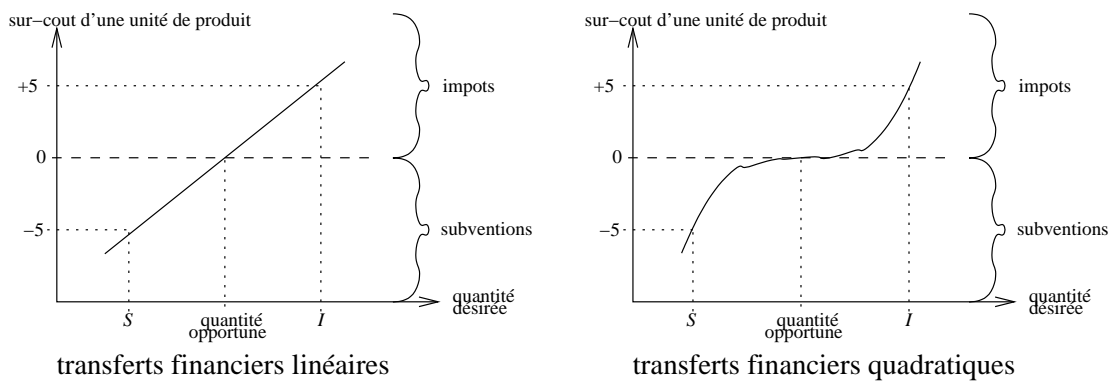
5.3 Réduction de l'effet coup de fouet dans une chaîne logistique par coordination décentralisée

Notre but est d'aider et d'inciter les entreprises à commander avec le même débit que ce que demandera le marché lorsque leurs produits arriveront sur le marché. Nous avons vu que la centralisation de l'information réduit l'effet coup de fouet. Nous supposons que la centralisation de l'information ou une technique plus puissante l'utilisant tels que la gestion des inventaires par le vendeur (VMI) ou la planification, la prévision et le réapprovisionnement collaboratifs (CPFR), est déjà utilisée dans la chaîne logistique. Grâce à cette hypothèse, toutes les entreprises de la chaîne logistique connaissent au moins le débit du marché $m(t)$ et au mieux des prévisions sur $m(t)$. Aucune hypothèse n'est faite sur ce débit. Nous rappelons enfin que nous ne considérons que le cas d'une chaîne logistique et non d'un réseau, ce qui implique que, par rapport aux solutions générales proposées, nous n'utiliserons que l'homogénéisation temporelle.

L'homogénéisation temporelle va se faire de la façon suivante. Nous rappelons que pour y parvenir, la fluctuation de la quantité de produits (la « quantité externe ») va être amortie dans un réservoir interne à l'entreprise. Dans les chaînes logistiques actuelles, ce réservoir était constitué d'un stock dans lequel on mettait directement les produits. Au lieu de cela, nous proposons que ce réservoir soit constitué par un compte en banque, ce qui suppose de convertir les produits en argent. Pour mettre en place cette conversion, l'entreprise qui est dans une période de forte demande va payer une *amende* pour chaque unité qu'elle commande en plus par rapport à la demande moyenne du marché. Puis lors des périodes creuses, cette entreprise recevra une *subvention* pour accroître ses commandes au niveau de la demande moyenne du marché. Ce système d'impôts/subventions doit s'établir entre le client et son fournisseur. Ainsi, si le client ne passe pas assez (resp. trop) de commandes, il reçoit de son fournisseur des subventions (resp. impôts) pour l'inciter à commander plus (resp. moins). Vu du fournisseur, il s'agit donc pour lui d'une sortie (resp. entrée) d'argent.

La figure 15 illustre le fonctionnement de façon simplifiée de ce que pourraient être ces deux variantes du mécanisme d'impôts/subventions selon deux scénarii. Nous avons représenté deux courbes par scénario, mais en fait les courbes (a) et (b) peuvent se représenter sur un même graphe à trois dimensions {quantité désirée, temps, sur-coût}. Les deux variantes du mécanisme sont les transferts financiers linéaires (les subventions et impôts sont proportionnels à la quantité commandée qui est en trop ou qui manque par rapport à ce qu'il faudrait commander pour réduire l'effet coup de fouet) ou quadratiques (comme le cas linéaire, sauf qu'il apparaît un carré dans la relation de proportionnalité, c'est à dire que les subventions et impôts sont proportionnels au carré de la quantité commandée qui est en trop ou qui manque par rapport à ce qu'il faudrait commander). Les deux scénarii proposés sont les commandes périodiques, par exemple à tous les lundi (cas a) et les commandes de taille constante, par exemple par camions pleins (cas b). Dans le scénario dans lequel les commandes sont passées périodiquement (cas a), pour les deux variantes, si l'entreprise a besoin de S produits, elle va avoir un sur-coût de -5\$ par produit (subvention de 5\$) qu'elle commandera en plus de ce qu'elle a besoin. C'est à dire que si elle commande $S + 1$ produits, les S premiers produits seront au tarif unitaire de base et l'unité en plus lui coûtera 5\$ de moins que ce tarif de base. Comme cette commande va lui coûter moins cher, elle sera incitée à commander plus que ce qu'elle a vraiment besoin, c'est à dire qu'elle va se rapprocher de la quantité opportune (cette quantité opportune pour éliminer l'effet coup de fouet est déterminée par l'équation 2, à savoir $Q_f(n)/\Delta T_f(n) = m(T_f(n) + d)$). Au contraire, si l'entreprise a besoin de I produits, elle va

(a) Cas des commandes périodiques



(b) Cas des commandes de taille constante

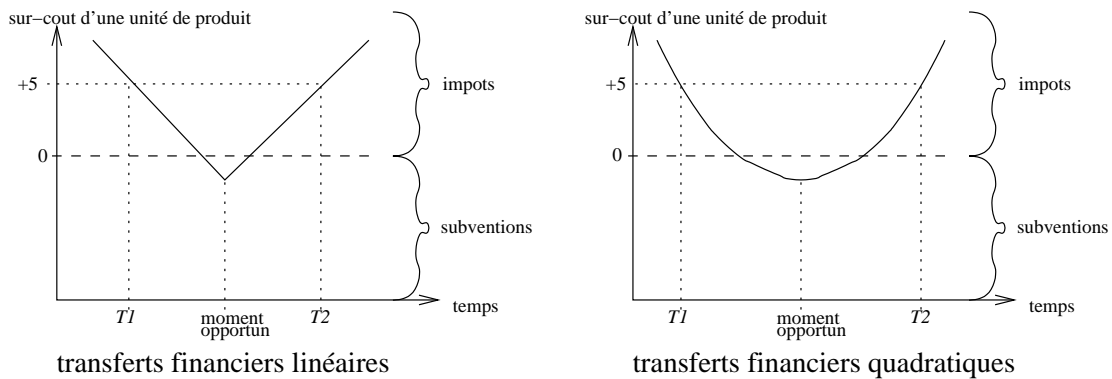


FIG. 15 – Mécanisme d'impôts et de subventions.

avoir un sur-coût de 5\$, c'est à dire que les produits de la quantité opportune lui coûteront le tarif de base et que les $(I - \text{quantité opportune})$ produits en plus auront un coût unitaire de 5\$ supérieur au tarif de base. Dans le scénario où les commandes ont tous la même taille (cas b), les entreprises sont incitées à ne commander ni trop tôt, ni trop tard. En effet, si une entreprise veut commander au temps $T1$, elle va avoir un sur-coût de 5\$ par produit. Pour éviter de payer cela, elle va attendre le moment opportune déterminé par la relation 2, ce qui va au contraire lui permettre de recevoir un peu d'argent. Par contre, si elle attend trop et qu'elle se trouve au temps $T2$, elle va être incitée à commander le plus tôt possible pour éviter que le sur-coût de 5\$ qu'elle doit déjà payer n'augmente plus.

L'installation de ce mécanisme soulève déjà quelques questions et commentaires sur son fonctionnement :

- Les deux paires de courbes de la figure 15 peuvent être représentées par une surface dans un espace à trois dimensions {quantité désirée, temps, sur-coût}. Après avoir déterminé l'équation de cette surface, il faudra la mettre en relation avec la relation 2 (c'est à dire

$Q_f(n)/T_f(n) = m(T_f(n) + d)$ de la sous-section 5.2.

- Vaut-il mieux un système linéaire ou un système quadratique ? Le second donne un peu plus de liberté pour commander autour du moment opportun tout en pénalisant ceux qui dévient beaucoup de ce moment : il semble donc meilleur. Dans ce cas, pourquoi ne pas remplacer le carré qui apparaît dans la relation quadratique par un cube (ou une puissance encore supérieure) dans la relation de proportionnalité ?
- Quel tarif doit-on appliquer aux impôts et aux subventions ? Normalement, ce tarif devrait être le plus élevé possible (qui voudrait commander une unité de trop si celle-ci coûte pas mal d'argent et qui refuserait de commander une unité de plus si cette commande peut lui ramener aussi beaucoup d'argent ?) et ce seraient les dirigeants des entreprises qui chercheraient à modérer ces sommes afin d'éviter de mobiliser trop d'argent au fonctionnement de ce mécanisme.
- On peut reprocher au mécanisme proposé de faire exactement la même chose que l'une des causes de l'effet coup de fouet, à savoir provoquer une variation des prix. En effet, une subvention perçue (resp. un impôt payé) lors d'un passage de commande ressemble à une baisse (resp. une hausse) du prix du produit. Par conséquent, ce mécanisme, comme la fluctuation des prix, devrait encourager les entreprises à sur-commander lors des promotions, puis d'arrêter de commander lors du retour au prix nominal. La suite démontre en deux étapes que ce n'est pas le cas. En premier lieu, les promotions déformaient la demande, alors que dans le mécanisme proposé, la demande du marché est supposée connue de tous grâce à la centralisation de la demande. L'effet coup de fouet compris comme une déformation de l'information et provoqué par la fluctuation des prix n'est plus applicable grâce à la seule centralisation de l'information. Par contre, les comportements opportunistes générés par la fluctuation des prix restent valables si on ne tient compte que de la centralisation de la demande. En second lieu, les promotions dont parle Lee [Lee et al., 1997a, Lee et al., 1997b] se faisaient par rapport aux besoins du fournisseur. Dans le mécanisme proposé, on essaye de bien quantifier cette promotion par rapport à l'intérêt de l'ensemble de la chaîne logistique plutôt qu'en fonction de l'intérêt de celui qui fait la promotion : le client ne peut plus avoir de comportement opportuniste, car la subvention qu'il reçoit lorsqu'il « commande bien » se transforme en impôt lorsqu'il essaye d'abuser du système, car la promotion et l'impôt ne s'appliquent qu'à la différence entre le niveau normal (moyen) de ses commandes et ce qu'il est sensé avoir besoin pour répondre à la demande du marché. Vu comme cela, le mécanisme constitue soit une promotion pour le client qui achète de façon à réduire l'effet coup de fouet, soit une hausse de prix dans les autres cas.
- Le mécanisme proposé incite à réduire la variabilité des commandes en faisant fluctuer la quantité d'argent dans le compte en banque des entreprises : on peut reprocher à ce mécanisme de se contenter de déplacer le problème puisqu'il y a toujours une grandeur qui fluctue dans le système, mais il semble *à priori* qu'il vaille mieux immobiliser de l'argent sur un compte (qui peut être rémunéré) que d'immobiliser des produits dans un stock (ce qui ne peut que coûter de l'argent).
- Ce système suppose que toutes les entreprises de la chaîne logistique connaissent au moins la demande du marché (ce qui suppose d'avoir une centralisation de l'information) et de

connaître au mieux les prévisions de la demande du marché.

- Ce principe de la lutte contre l’effet coup de fouet est directement déduit de la méthode de sa quantification instantanée (cf. sous-section 5.2) : si on sait que ce que l’on va faire génère du coup de fouet, alors on est tenté d’apporter des changements. Ces changements sont suivis de compensations ou de pénalités.
- Les termes « impôt » et « subvention » ne sont peut-être pas très bien choisis, car ils font penser à « cadeau » et à « punition ». En fait, il s’agit de grains de sable qui calment le système lorsqu’il s’emballe et d’huile que l’on met pour le secouer quand il est trop mou.
- Le client ne devrait pas avoir la possibilité de mentir sur ses besoins réels pour obtenir de son fournisseur plus de subventions que nécessaire, car ce système se base sur la demande réelle du marché : le fournisseur est donc capable de comparer la quantité annuelle commandée par son client et la quantité consommée annuellement par le marché (ces deux quantités sont égales si le client n’a pas abusé du système).
- À priori, si le taux d’imposition par unité et le taux de subvention par unité sont les mêmes, alors le montant total des impôts égale le montant total des subventions . Mais étant donné que c’est le fournisseur qui a le plus intérêt à réduire le coup de fouet, il semble normal qu’il contribue le plus à l’effort de mise en œuvre de ce système que son client ; cela pourrait se faire en prenant un taux de subvention supérieur au taux d’imposition.
- Les jetons qui circulent dans la chaîne logistique ont une durée de vie illimitée.
- Si toutes les entreprises font les mêmes prévisions de $m(t + d)$ (avec respectivement m la demande du marché, t l’instant présent, et d le temps que devrait prendre le produit pour se rendre sur le marché), l’effet coup de fouet devrait être éliminé même si ces prévisions sont fausses. En effet, trop de produits devraient alors arriver au point de vente, mais il n’y a plus d’amplification de la demande, ce qui était le but recherché. Par contre, il est encore nécessaire de voir comment les mises à jour des prévisions peuvent gêner l’écoulement du flux de produits dans la chaîne logistique : en effet, si un lot L est à l’usine à l’instant t_1 , il transitera vers le distributeur pour satisfaire une demande $m(t_1 + d_{distributeur})$. Plus tard, au temps t_2 , ce même lot L transitera du grossiste vers le détaillant de façon à satisfaire $m(t_2 + d_{detaillant})$. Finalement, le produit arrivera sur le marché au temps t_3 . On a alors l’égalité $t_3 = t_2 + d_{detaillant} = t_1 + d_{distributeur}$. Par contre, on a aussi l’inégalité $m(t_3) \neq m(t_2 + d_{detaillant}) \neq m(t_1 + d_{distributeur})$ et c’est ce qui pourrait être gênant. Cette inégalité reflète le fait que les prédictions évoluent au cours du temps.

Pour opérationnaliser ce système d’impôts/subventions, les jetons de responsabilité de Porteus pourraient être adaptés. L’intérêt d’un tel système est que le système d’impôts/subventions ne se fait plus par paire client/fournisseur, mais se fait sur l’ensemble de la chaîne logistique. Par rapport aux jetons de responsabilité de Porteus [Porteus, 2000], le présent mécanisme, tout comme le système d’impôt/subvention sur lequel il est basé, oblige à centraliser l’information (c’est à dire qu’il oblige les détaillants à fournir à tous les étages de la chaîne logistique l’information complète sur la demande des clients) afin de donner un point de référence aux

commandes. Ce point de référence est $m(t + d)$ où t est l'instant présent et d le temps que devrait prendre le produire pour se rendre sur le marché. Le fonctionnement est le suivant : une entreprise doit toujours commander de façon à satisfaire la relation 2. Cette relation détermine la quantité que l'entreprise devrait commander pour annuler l'effet coup de fouet. Si l'entreprise ne veut pas commander cette quantité, elle émet des jetons de façon à ce que le total des unités commandées et des jetons soit égal à la quantité recommandée par la relation 2. La quantité de jetons émis correspond donc à la différence entre la quantité de produits commandés par l'entreprise et la quantité qu'elle devrait commander pour annuler l'effet coup de fouet : par définition, il y a donc des jetons positifs et des jetons négatifs. Les jetons positifs sont émis lors d'un creux dans la demande et correspondent à une subvention, alors que les jetons négatifs sont émis lors de pics dans la demande. Une entreprise qui reçoit des jetons positifs peut soit annuler autant de jetons négatifs qu'elle voulait émettre, soit les transmettre à son client si elle voulait elle-même en émettre. Une fois qu'elle a passé sa commande, l'entreprise transforme en argent les jetons qu'elle a en sa possession : soit elle doit donner de l'argent (jetons positifs), soit en recevoir de chaque entreprise qui a émis des jetons négatifs. En fonctionnement normal, il ne devrait y avoir aucune raison de convertir les jetons en argent¹¹, sauf si le système est réglé de façon à ce que les bénéficiaires de la réduction de l'effet coup de fouet (les entreprises en amont de la chaîne logistique) récompensent les entreprises qui font l'effort de réduire l'effet coup de fouet. On pourrait facilement voir tous les avantages qu'on a à utiliser un tel mécanisme (facilité d'emploi, facilité de mise en œuvre, facilité au niveau de la compréhension, etc.). Il offre en particulier l'avantage de ne requérir qu'à la diffusion des ventes du détaillant et l'acceptation par toutes les entreprises de la chaîne logistique d'un ensemble de règles du jeu.

Enfin, il serait intéressant de comparer ce mécanisme de coordination basé sur des jetons avec d'autres mécanismes du même type utilisé en gestion de la production afin de voir lesquels minimisent le mieux l'effet coup de fouet ou gèrent le mieux une chaîne logistique selon d'autres critères (coûts de fonctionnement minimaux, flux des produits le plus rapide, stocks les plus bas, service au client le plus élevé...). Parmi ces mécanismes, il y a bien sûr les jetons de responsabilité [Porteus, 2000] dont nous nous sommes inspirés pour proposer notre propre mécanisme. Mais il existe aussi des systèmes de gestion intra-entreprises tels que le système PAC [Buzacott and Shanthikumar, 1992] et les Kanbans de base, généralisés et étendus [Liberopoulos and Dallery, 2000] qui eux-aussi n'ont pas de coordonnateur central et utilisent à la place des jeux d'étiquettes circulant entre les unités de production. Selon Liberopoulos et Dallery [Liberopoulos and Dallery, 2000], on peut emboîter plusieurs de ces systèmes pour en créer de nouveaux : comme notre mécanisme de suppression de l'effet coup de fouet ressemble à ces systèmes de gestion intra-entreprise (ce sont tous des mécanismes basés sur des jetons), il pourrait donc être combiné avec l'un d'eux. Cette combinaison se ferait en utilisant le même système pour coordonner toutes les unités de production d'une même chaîne logistique (on regarderait alors l'intérieur de chacune des entreprises de la chaîne logistique).

Afin d'illustrer comment fonctionnent ces systèmes intra-entreprises, nous décrivons maintenant la système PAC (*Production Authorization Cards*) [Buzacott and Shanthikumar, 1992]. Les cellules de production y sont séparées par des stocks comme dans le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference-model) [Supply Chain Council, 2001] représenté sur la figure 3. La

¹¹En effet, sur le long terme, les entreprises devraient avoir autant de jetons positifs que négatifs (car par définition de la moyenne, il y a autant de fluctuations de la demande au-dessous de la moyenne qu'il y en a au-dessus) ce qui revient à un transfert financier nul sur un temps infini.

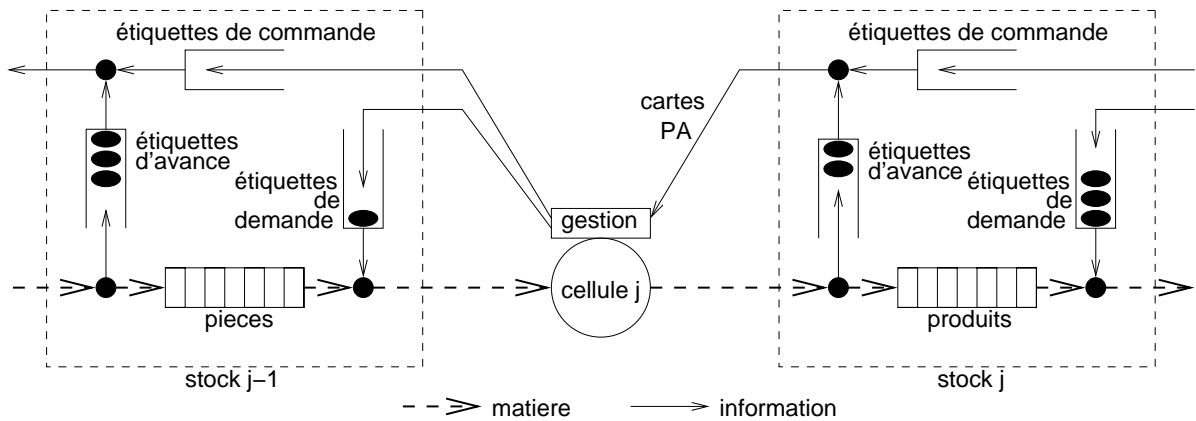


FIG. 16 – Système de gestion de la production PAC [Buzacott and Shanthikumar, 1992].

figure 16 présente la cellule de production j au centre, son stock j dans le cadre en pointillés de droite et le stock de la cellule $j - 1$ dans le cadre en pointillés de gauche. Le rôle de chaque jeu d'étiquettes est le suivant :

- Les étiquettes de demande contrôlent le mouvement des pièces physiques des stocks vers les cellules : lorsque l'unité de gestion de la cellule j envoie une de ces étiquettes au stock $j - 1$, une pièce est envoyée du stock $j - 1$ vers la cellule j dès qu'une de ces étiquettes peut être matchées avec un pièce. S'il n'y a pas de pièces en stock, le nombre d'étiquettes de demande représente l'arréage de demandes qu'il faudra pourvoir dès que possible. Une étiquette de demande est une commande que le stock doit expédier au plus tôt ; le stock a été prévenu plus tôt de l'arrivée d'une telle étiquette par une étiquette de commande.
- Les étiquettes de commande sont envoyées de la cellule j vers le stock $j - 1$. Elles indiquent au stock qu'il y aura dans le futur une étiquette de demande. En se propageant dans le système de production, ces étiquettes permettent la planification à long terme de la production.
- Une étiquette d'avance est créée par l'envoi d'une pièce de la cellule j vers son stock j . Si aucune étiquette de commande qui lui correspond n'est disponible, l'étiquette d'avance attend. Elle est matchée avec une étiquette de commande dès que possible ; une carte d'autorisation de la production PA (*Production Authorization*) est alors expédiée à l'unité de gestion de la cellule j .
- L'arrivée d'une carte PA à la cellule j autorise cette cellule à produire une pièce. Les cartes PA peuvent être envoyées à la cellule j par lots par le stock j . Cette carte PA fait émettre des étiquettes de demande et de commande par la cellule j afin qu'elle se réapprovisionne en pièces.

Ces étiquettes permettent le fonctionnement minimum du système PAC. D'autres types d'étiquettes permettent de prendre en compte l'annulation de commande, la convergence de flux (pour les cellules assemblant ayant plusieurs flux d'entrée et un seul de sortie) et la divergence de flux. Enfin, en jouant sur les paramètres de ce système (en particulier, le niveau initial

des stocks, le nombre maximum de cartes PA actives à chaque cellule et le délai à la cellule j entre la transmission de l'étiquette de commande et l'émission de l'étiquette de demande correspondante), on peut émuler l'ensemble des autres systèmes de gestion de la production connus tels que MRP (*Material Requirements Planning*), Kanban (système de cartes japonais) et OPT (*Optimized Production Technology*). On trouve cependant une critique à cette universalité du système PAC dans [Liberopoulous and Dallery, 2000] qui note que l'ensemble des autres systèmes ne peut pas être émulé et que voir les autres systèmes comme des cas particuliers de PAC n'est pas toujours la meilleure façon d'expliquer leur fonctionnement.

5.4 Contributions pour les systèmes multiagents

La recherche que nous menons vise à contribuer à la modélisation et à la simulation à base d'agents de la chaîne logistique ainsi qu'à la coordination décentralisée d'un système multiagent. Au niveau de la modélisation basée sur les agents d'une chaîne logistique, plusieurs modèles ont été proposés (cf. partie 3.3.5), mais le seul à prendre en compte explicitement l'effet coup de fouet est celui de [Kimbrough et al., 2001]. Ce modèle est directement déduit des jeux de la bière du MIT [Sterman, 1989] et de Columbia [Chen and Samroengraja, 2000]. Pour notre part, nous proposons un modèle basé sur le jeu du bois [Fjeld, 2001], c'est à dire ayant un flux de matière divergent, ce qui augmente le comportement opportuniste (en particulier lors de pénuries au point de divergence des flux). Contrairement à [Kimbrough et al., 2001], nous pouvons en effet implémenter explicitement des comportements opportunistes des entreprises de la chaîne logistique. En effet, Kimbrough et ses collègues se sont contentés d'agents réactifs plus orientés vers l'optimisation que d'agents rationnels capables de raisonner en prenant les décisions qui s'imposent. Notre recherche se situera plutôt dans ce dernier volet et visera à simuler le comportement d'agents rationnels opportunistes contre un « bien-être » global qui pourrait arranger tout le monde. Le modèle qu'on vise à développer sera ensuite simulé, ce qui soulèvera un certain nombre de questions techniques concernant l'implémentation du simulateur (protocoles d'échange, de mise à jour et de gestion de l'information, implémentation du comportement des entreprises, etc.).

Au niveau de la coordination décentralisée d'un système multiagent, nous proposons un mécanisme à base de jetons. Ce mécanisme devrait être utile à d'autres systèmes multiagents que ceux qui simulent une chaîne logistique. En effet, une population d'agents s'échangeant des données pour que chacun y fasse une action devrait aussi avoir un problème de coup de fouet. Par exemple, si l'agent A demande régulièrement un service à l'agent B (par exemple, d'imprimer un fichier PDF à toutes les minutes), puis que cet agent B demande lui-aussi un service à l'agent C pour pouvoir faire ce service (par exemple, B ne sait pas lire les PDF, alors il demande à C de les lui convertir en PS), alors il y a des chances que l'agent C ne reçoive pas régulièrement ses demandes de service (coup de fouet). Il faudrait vérifier que cette supposition est vraie et qu'elle peut devenir gênante dans certaines conditions. La différence entre ces deux exemples est que dans le premier, le coup de fouet apparaît dans le système multiagent lui-même, alors que dans le second le système multiagent est utilisé pour réduire cet effet dans un autre système. De la même façon, sur la route, si chaque feu de la circulation est un agent, alors ces feux s'envoient les uns aux autres des véhicules. Le but du système multiagent (ici l'ensemble des feux de la circulation) est de fluidifier au maximum le trafic routier, c'est à dire d'éliminer l'effet coup de fouet. Dans ces deux exemples, notre mécanisme de coordination à jetons permettrait alors d'aligner les motivations des agents pour améliorer

le fonctionnement global du système.

6 Mise en œuvre dans l'industrie forestière

Comme nous l'avons dit dans la sous-section 2.3, le but de cette recherche est de réduire l'effet coup de fouet en proposant des pratiques de gestion efficaces de la chaîne logistique. Toutes les propositions de solution présentées ici seront validées expérimentalement par simulation sur le cas d'une chaîne logistique de l'industrie forestière. Pour atteindre notre but, nous comptons atteindre les objectifs suivants :

1. étudier l'effet coup de fouet en détails et montrer qu'il relève de la problématique des systèmes informatiques multiagents, particulièrement pour les aspects de coordination et de coopération : ce travail est achevé et présenté dans la revue de littérature (principalement dans les sous-sections 3.1 et 3.5).
2. proposer des techniques originales multiagents pour atténuer, voire éliminer, le coup de fouet dans le cadre d'une coordination entre agents-entreprises-collaboratives : un mécanisme de coordination décentralisé basé sur un système de jetons (sous-section 5.3) et sur une mesure instantanée de l'effet coup de fouet (sous-section 5.2) a été proposé. Sa mise au point reste à faire (tarif d'un impôt, tarif d'une subvention, quand convertir les jetons en argent ?, peut-on induire des comportements différents en jouant sur les paramètres précédents ?, etc.).
3. analyser, spécifier et modéliser une chaîne logistique réelle (en l'occurrence la chaîne logistique forestière) et l'implémenter sur machine comme un système multiagent : la modélisation de la chaîne logistique forestière a été commencée à la session d'hiver 2002. L'implémentation d'un simulateur multiagent basé sur ce modèle a été amorcée à l'hiver 2002. L'état actuel du modèle est présenté dans la sous-section 6.1 et celui du simulateur dans la sous-section 6.2
4. opérationnaliser les techniques multiagents proposées en 2 et les appliquer au système multiagent proposé en 3 : lorsque le simulateur sera implémenté, l'effet coup de fouet devrait s'y manifester. Nous pourrions alors « greffer » sur les agents le mécanisme de coordination multiagent à jetons.
5. analyser les résultats obtenus tout en mesurant l'efficacité des techniques multiagents proposées : il s'agira de collecter des données expérimentales sur le simulateur avant et après avoir installé le mécanisme de coordination proposé, soit avant et après l'étape (objectif 4). Nous pourrions ainsi mesurer l'efficacité de notre technique multiagent et affiner sa mise au point dont nous parlions dans l'objectif 2. Selon le temps disponible, nous pourrions ensuite comparer expérimentalement notre mécanisme à d'autres approches (coordination centralisée par un chef d'orchestre, coordination décentralisée par les Kanbans généralisés ou par le système PAC (cf paragraphe 5.3), etc.).
6. proposer des solutions concrètes à mettre en place si les résultats obtenus sont probants : des pistes sont présentées dans la sous-section 3.3. Si le mécanisme de coordination à jetons se montre efficace, ces pistes de solutions concrètes seront développées.

6.1 Modélisation d'une chaîne logistique de l'industrie forestière

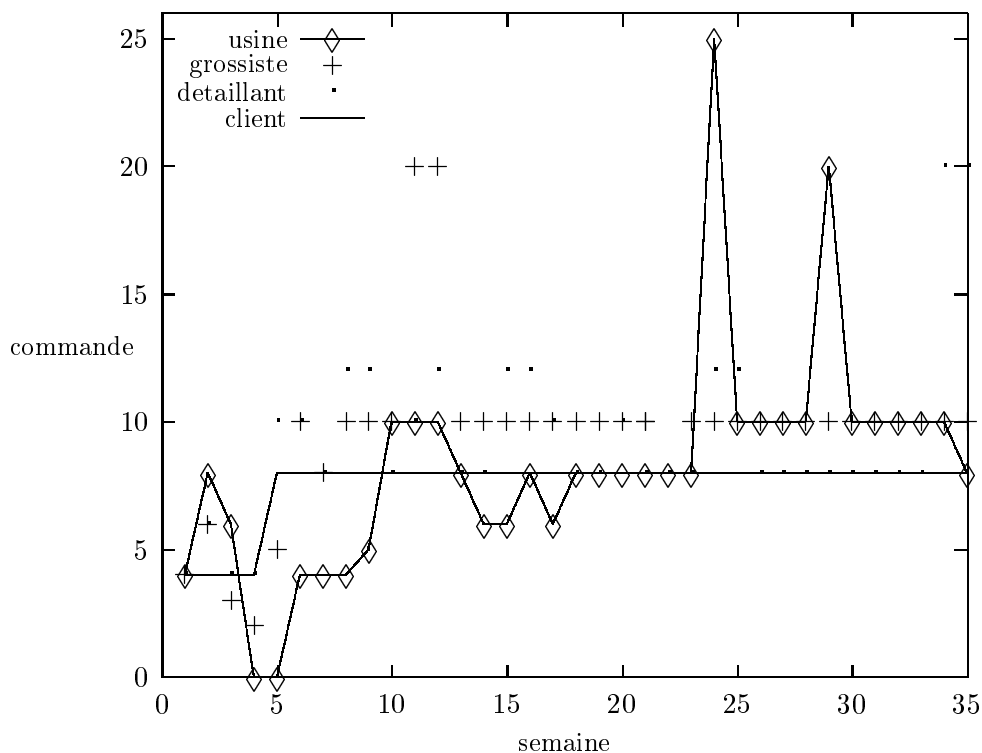


FIG. 17 – Partie de jeu du bois : commandes passées dans la chaîne du papier.

Le modèle de chaîne logistique de l'industrie forestière que nous utilisons dans cette recherche est le jeu du bois [Fjeld, 2001, Haartveit and Fjeld, 2002] qui est lui-même basé sur le jeu de la bière. Les figures 12 et 13 présentent les deux versions du jeu du bois. Afin de bien comprendre son fonctionnement, une partie réelle a été jouée sur la version divergente (donc il n'y avait pas de flux de matière entre la scierie et la papeterie comme dans la version intégrée). Les courbes 17 et 18 montrent les résultats que nous avons obtenus lors de cette partie. La courbe 17 présente la quantité de papier commandée par le client (simulé par un jeu de cartes sur lesquelles figuraient le nombre d'unité qu'il achète par semaine) et les joueurs ayant le rôle de détaillant, de grossiste et d'usine. La courbe 18 présente les mêmes données pour l'autre chaîne (planches). Ces deux courbes montrent qu'un effet coup de fouet s'est propagé dans les deux chaînes, puisqu'après une hausse de la demande de 4 à 8 unités (planches ou papier) par semaine, les commandes de l'usine varient entre zéro et plus de 20 unités par semaine. L'effet coup de fouet aurait du être plus important pour deux raisons. La première est que nous n'avons pas obligé les joueurs à fournir tout ce qui leur était commandé. En effet, lorsqu'ils n'étaient pas capable de fournir, ils donnaient ce qu'ils pouvaient et le reste (l'arréage) était oublié pour les semaines suivantes. Normalement, il aurait fallu obliger les joueurs à fournir tout ce qui leur est demandé, c'est à dire ne pas faire disparaître les arréages à la fin d'un tour. La seconde raison est qu'il y avait un certain partage de l'information entre les joueurs, puisque chacun pouvait voir la quantité de produit en transit sur le plateau de jeu entre les

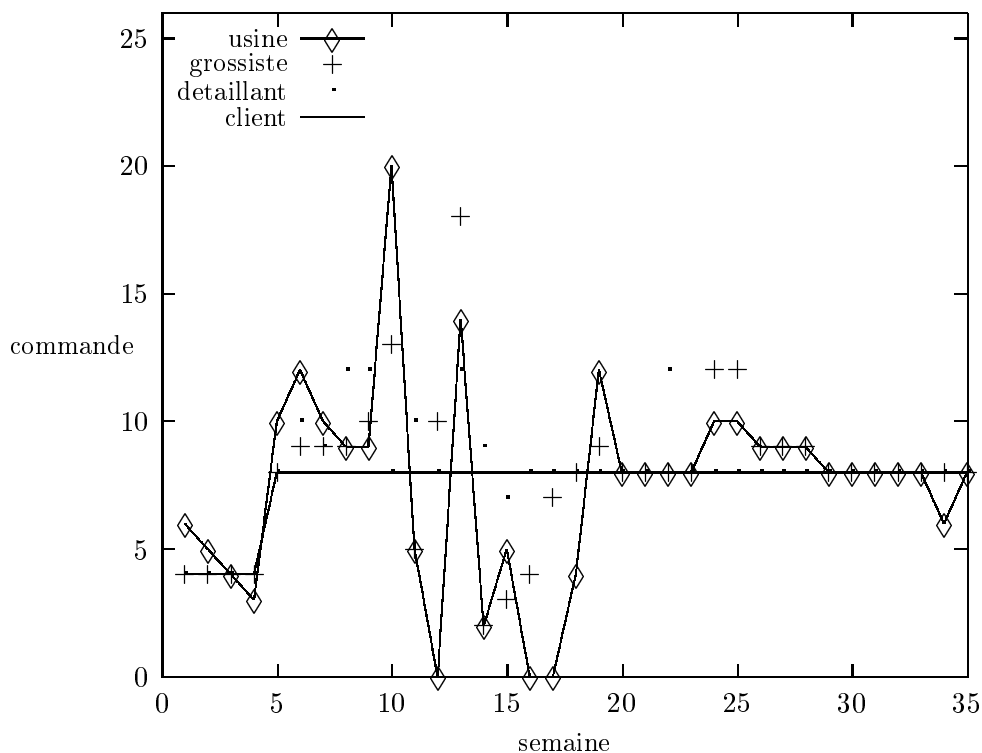


FIG. 18 – Partie de jeu du bois : commandes passées dans la chaîne des planches.

joueurs ainsi que le niveau des stocks de ses voisins.

Notre modèle de chaîne logistique basé sur le jeu du bois doit nous servir à vérifier l'efficacité du mécanisme de jetons que nous proposons. Plus précisément, nous comptons programmer des agents intelligents afin qu'ils jouent à ce jeu. La tâche de chaque agent sera donc de savoir quand et combien commander. Outre l'implémentation du mécanisme proposé, chaque agent devra se comporter comme une entreprise. A cet effet, chaque agent aura la structure d'une entreprise calquée sur le niveau 1 du modèle SCOR [Supply Chain Council, 2001] de la figure 19, c'est à dire d'une entreprise considérée comme une seule activité disposant d'un stock de pièces et d'un stock de produits.

La figure 20 représente la manière dont les clients (marché), le détaillant, la scierie et la forêt sont représentés par un agent. A cela s'ajoutent des agents représentant l'activité de transport entre ces quatre agents afin d'étudier par la suite l'impact sur les prix de livraisons par des camions non pleins, comme ils pourraient simplement faire intervenir des retards de livraison. C'est à dire que chaque entreprise de la chaîne logistique est modélisée par un agent et que les délais (et retards éventuels) dans les transports sont gérés par les agents de transport. Ainsi, les expéditions se font grâce à des agents-transport qui appliquent un retard lorsqu'ils transportent un produit pour prendre en compte le fait que dans une chaîne logistique réelle, un délai d'exécution séparé existe d'une part pour les flux de matières et d'autre part pour les flux de contrôle [Sjöström, 2001].

Contrairement à la version plateau du jeu du bois (*Wood Supply Game*), le temps est

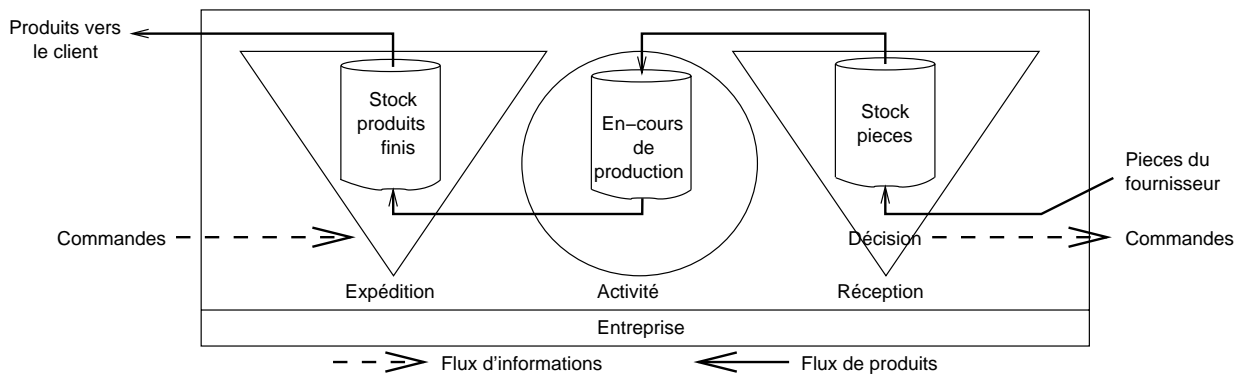


FIG. 19 – Fonctionnement de l’agent entreprise générique.

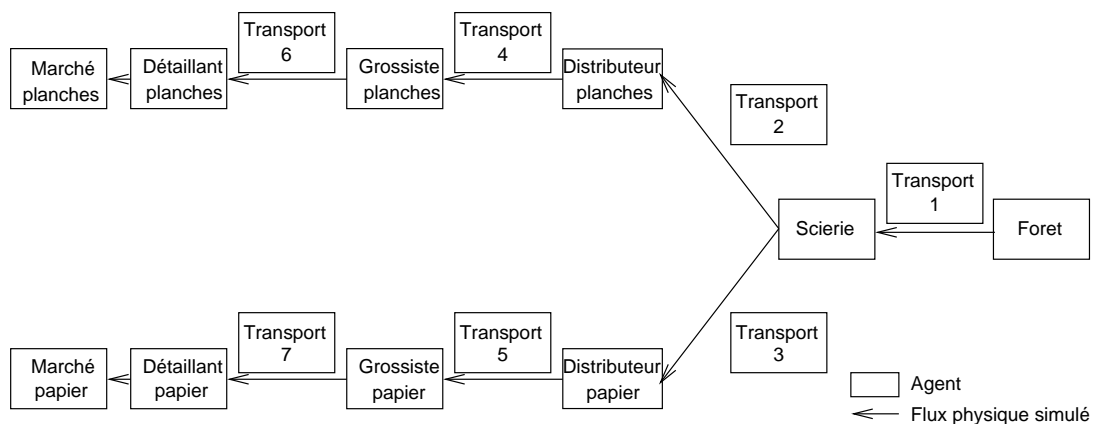


FIG. 20 – Organisation des agents dans le simulateur.

supposé continu (même si le modèle sera simulé sur un ordinateur qui discrétise le temps)¹². Toutes les entreprises fonctionnent 24h/24, 7 jours sur 7. De cette façon, toutes les entreprises fonctionnent en même temps. De plus, il y a un goulot d’étranglement qui se situe au niveau de la scierie (le plus en amont possible), ce qui nous permettra de simuler des risques de pénuries (une cause de l’effet coup de fouet) menant ainsi les agents à se comporter de manière opportuniste.

Dans le cas des communications entre agents, chaque agent doit gérer trois types de message :

1. les deux détaillants (le vendeur de papier et le vendeur de planches) diffusent à tous les autres agents de l’information à propos du marché. Cette information est constituée selon le mode utilisé (centralisation de l’information, VMI, CPFR) soit des données brutes de la demande de la clientèle, soit de prévisions de ce que voudra la clientèle pendant un certain nombre de périodes futures. Par rapport aux notations que nous avons déjà utilisées, l’information transmise à l’instant t est donc soit $m(t)$, soit $\{m(t), m(t+1), m(t+2), \dots\}$

¹² *A priori*, une seconde de simulation pourrait représenter une heure réelle

(ou encore une description continue de ces prévisions du type $m(t) = 10 - t/3 + 2t^2/70$).

2. Chaque produit dans la chaîne logistique est un objet *produit* ayant les champs suivants : la *date de création* (afin d'évaluer son temps de traversée de la chaîne logistique), le *prix* et le *type* (pour que l'agent scierie puisse dissocier les planches du papier). Une expédition de produits est représentée par l'envoi d'un objet *lot*. Cet objet *lot* est composé d'objets *produit* et contient aussi une propriété *date d'expédition* (pour que l'agent de transport sache quand livrer le *lot* à son destinataire).
3. Les commandes de produits sont des messages ayant les champs *date de la commande*, *produit demandé*, *quantité désirée* et *emphdate* de réception voulue.

Excepté la scierie, chaque entreprise ne gère qu'un seul type de produit. En outre, pour chaque agent, la mesure de performance individuelle utilisée est une moyenne de la mesure instantanée de l'effet coup de fouet présentée dans la sous-section 5.2. La performance globale de la chaîne logistique est mesurée par l'écart-type des commandes reçues par la forêt. Il pourra aussi être intéressant d'évaluer, pour chaque entreprise et pour l'ensemble de la chaîne logistique, le total des coûts, afin de voir la corrélation entre la réduction des coûts et la réduction de l'effet coup de fouet. Enfin, l'impact sur l'effet coup de fouet d'un taux d'imposition/subvention plus ou moins élevé et de transferts financiers linéaires ou quadratiques pourra être étudié.

6.2 Simulation d'une chaîne logistique de l'industrie forestière

Nous avons le choix entre deux méthodes d'implémentation :

- soit utiliser un outil de développement générique de système multi-agent : chaque agent sera alors implémenté par un programme pouvant communiquer avec les autres agent. Dans ce cas, un outil basé sur Java [Sun microsystems, 2002] sera utilisé de préférence en raison de la portabilité de ce langage sur différentes plates-formes.
- soit utiliser un outil plus spécifique comme un moteur de simulation distribuée ou un outil de développement de système multi-agent industriel. Par exemple, les outils AGenDA [Fisher et al., 1999] et GRIDS (Generic Runtime Infrastructure for Distributed Simulation) [Sudra, 2000] permettent de faire la simulation de systèmes distribués et le couple BPMAT/SCL d'IBM [IBM Research, 2001] offre une bibliothèque de composants logiciels pour modéliser des entreprises et des flux inter-entreprises.

Nous avons commencé avec le langage Java [Sun microsystems, 2002] et l'outil de développement de systèmes multi-agents Bee-gent 2 développé par Toshiba [Toshiba Corp., 2002]. La figure 21 représente l'arborescence de fichiers d'un agent. Le programme de chaque agent repose sur l'architecture trois tiers, c'est à dire que la distinction est faite entre l'interface utilisateur (*UI*), le moteur (*Engine*) et les données manipulées (*Data*).

Plusieurs problèmes relatifs à l'utilisation de Bee-gent sont apparus lors du début du développement. Le principal est un problème de performance dû au fait que chaque agent est un programme Java indépendant des autres. Bee-gent a été conçu pour assurer la mobilité des agents d'un processeur à un autre (en particulier pour faire du commerce électronique) : le type d'application auquel il est destiné ne requiert pas d'avoir plusieurs agents sur un même ordinateur. Par conséquent, exécuter en parallèle la quinzaine de programmes Java de notre simulation sature très vite la machine. Java gérant le multitâche grâce aux *threads*, il serait

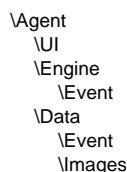


FIG. 21 – Architecture logicielle d’un agent.

beaucoup plus efficace de n’exécuter qu’un seul programme Java dans lequel chaque entreprise serait un thread. Un autre défaut de Bee-gent par rapport à nos besoins est qu’il n’a pas d’architecture BDI (*Belief, Desire and Intention*), c’est à dire qu’il n’a pas de mécanisme permettant de faire raisonner l’agent en déclenchant des règles lorsque certaines conditions sont réunies. Il serait pratique de pouvoir implémenter des règles du type « si l’activité est en cours depuis plus de dix minutes sur un lot, alors arrêter l’activité, mettre le lot dans le stock de produits finis et essayer de reprendre un lot dans le stock de pièces ». Ensuite, créer un agent fils par héritage d’un agent père n’est pas aisé : en effet, il est nécessaire de créer toutes les classes de l’agent fils en héritant de celles de l’agent père. Si chaque agent était un *thread* de Java, créer un agent fils reviendrait à hériter de la classe de ce *thread*. Enfin, la dernière chose qui nous gêne dans Bee-gent, c’est le fait qu’il faille implémenter dans chaque agent la position de certaines ressources : à chaque fois qu’un agent est déplacé physiquement de machine, il est nécessaire de modifier son code source et de donner à tous les autres agents de la simulation la nouvelle adresse *IP* (adresse d’une machine connectée à l’internet) de l’agent déplacé.

6.2.1 Squelette du simulateur

La première étape de l’implémentation consiste à *simuler une chaîne logistique dans laquelle se manifeste l’effet coup de fouet*. Chaque agent cherche à minimiser le coût total de ses propres coûts de façon égocentrique. Il ne s’agit que du squelette du simulateur, car on n’incorpore dans chaque agent que les causes de l’effet coup de fouet, ainsi que les mécanismes faisant apparaître cet effet lors de la recherche des décisions optimales. Ce squelette est une coquille que l’on remplira par la suite avec les approches de réduction de l’effet coup de fouet proposées.

Rôles des agents

Pour décrire de façon générale les agents à implémenter, nous utilisons la description PAGE (*Percepts, Actions, Goals, Environment*, soit percepts, actions, buts et environnement) de Russel et Norvig [Russel and Norvig, 1995]. Ce cette manière, nous avons une bonne idée de ce que les agents percevront, de ce qu’ils feront et de quelle manière sera mesurée leur performance.

- *Percepts* : commandes provenant des clients avals
- *Actions* : passage de commande aux agents amonts
- *Goals* : minimiser le total des coûts locaux, soit la somme des coûts de possession, de passage des commandes et d’arrérage.
- *Environment* : les autres agents

D'autres caractéristiques divisent les agents en deux catégories :

1. *les agents qui prennent des décisions* : ce sont ces agents qui implémentent le mécanisme de jetons pour les aider à prendre ces décisions. Encore une fois, nous rappelons que ces décisions peuvent se résumer à répondre aux questions « quand commander ? » et « combien commander ? ». Ces agents sont :
 - *les agents du type détaillant* jouent le rôle de magasins dans lesquels viennent s'approvisionner les clients finaux. Leur temps de transformation $T_{ac}^{détaillant1}$ et $T_{ac}^{détaillant2}$ est négligeable : nous les considérons nuls ;
 - *les agents du type grossiste* jouent le rôle d'entrepôts intermédiaires entre les détaillants et les distributeurs. Leur temps de transformation $T_{ac}^{grossiste1}$ et $T_{ac}^{grossiste2}$ sont très petits ;
 - *les agents du type distributeur* jouent le rôle d'entrepôts intermédiaires entre les détaillants et les distributeurs. Leur temps de transformation $T_{ac}^{distributeur1}$ et $T_{ac}^{distributeur2}$ sont petits mais supérieurs à ceux des grossistes ;
 - *l'agent du type scierie* joue un rôle de production, donc son temps de transformation $T_{ac}^{scierie}$ est le plus élevé de la chaîne logistique. Cet acteur a deux clients (distributeur 1 et distributeur 2) afin de tenir compte des spécificités de la foresterie.
2. *les agents qui ne prennent pas de décision* : ces agents obéissent aux ordres émis par les autres agents (forêt, autres agents) ou génèrent une demande selon une distribution statistique (marché). Ces agents sont beaucoup plus simples que les agents précédents. En effet, leur comportement est très simple, puisqu'ils réagissent à leur environnement (ordre d'un autre agent, temps qui passe, etc.). Ces agents sont :
 - *l'agent du type forêt* : nous supposons, comme dans le jeu de la bière, que la forêt est une source d'approvisionnement qui peut fournir une quantité infinie de produits. C'est à dire que la forêt n'a aucun stock, et qu'elle produit exactement la quantité qu'elle doit livrer à la scierie ;
 - *les agents du type transport* : le rôle de ces sept agents est surtout de modéliser les retards. Il pourra être intéressant à l'avenir de prendre en compte la taille des lots transportés, c'est à dire de représenter le prix de transport par unité de produit comme étant plus bas lorsque le transport se fait par camions pleins plutôt que par chargements incomplets ;
 - *les agents du type marché* : ces deux agents simulent le comportement du client final qui vient chercher des produits chez son détaillant. La quantité demandée par période est modélisée par une distribution statistique.

Par conséquent, la hiérarchie de classes à implémenter est celle de la figure 22. L'agent générique est un agent abstrait : il ne contient qu'une description des propriétés et méthodes que tous les agents doivent avoir, mais sans forcément donner la valeur des propriétés ni le code des méthodes (ce sont des méthodes abstraites : seule leur signature est précisée). Les agents réactif et décideur sont aussi abstraits, mais certaines propriétés et méthodes communes à tous leurs enfants respectifs sont précisées par rapport à l'agent générique. Enfin, tous les agents utilisés dans le simulateur sont des instances héritant soit de l'agent réactif, soit de l'agent décideur.

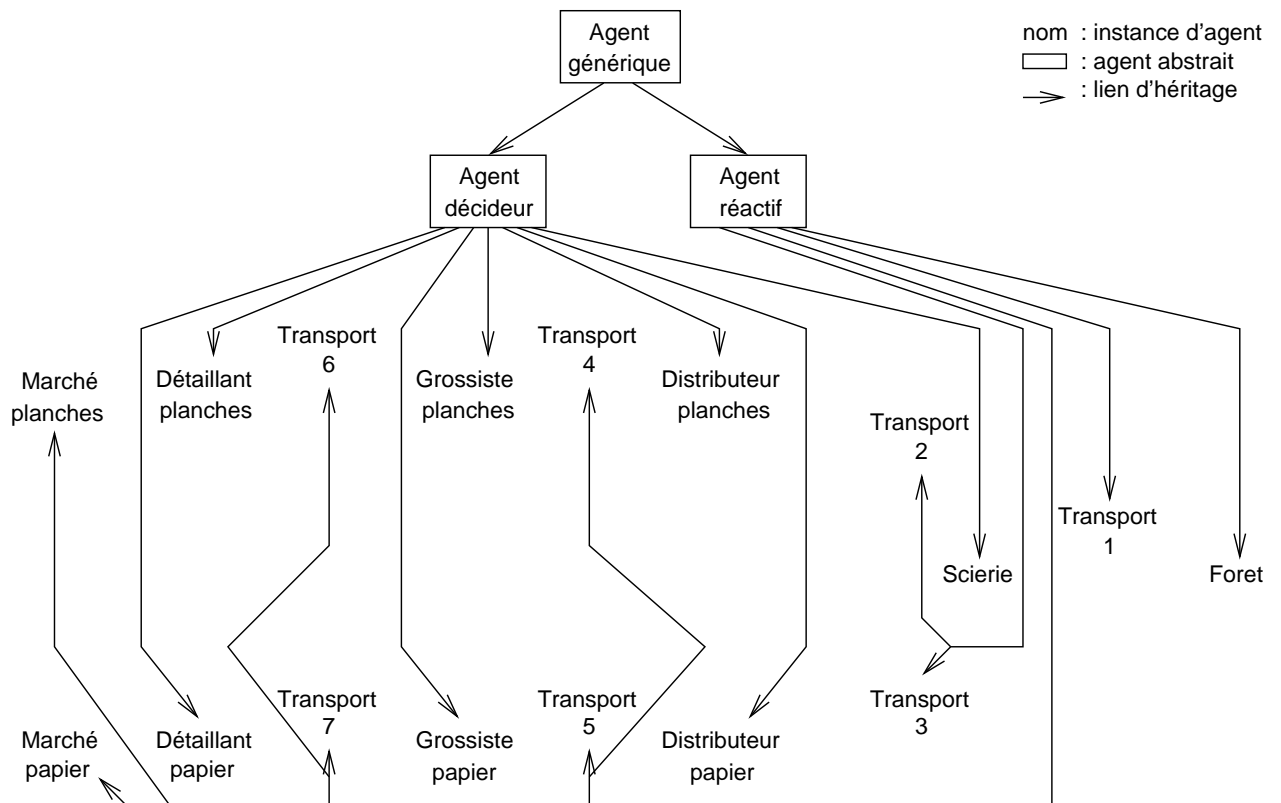


FIG. 22 – Hiérarchie de classes du simulateur.

6.2.2 Génération de l'effet coup de fouet

Si l'on veut étudier l'effet coup de fouet dans le cas général, les causes à prendre en compte dans le comportement des agents sont les suivantes :

1. *Cause* : la qualité et la fréquence de mise à jour des prévisions de la demande.

Conséquence pour les agents : pour émuler cette cause, il faut que les agents-entreprise fassent leur prévision de la demande future en fonction des commandes provenant de leur clients. Lorsque l'on suppose que la chaîne logistique fonctionne avec une centralisation de l'information, en VMI ou en CPFR, cette prévision se fait plutôt sur l'information communiquée par le détaillant.

2. *cause* : la taille des lots et la fréquence des commandes.

conséquence pour les agents : le prix de transport par unité de produit doit fluctuer en fonction de la charge du camion. Par exemple, on peut fixer un coût de passage de commande C_c . Ce coût encourage les agents à passer peu de commandes de taille importante, plutôt que beaucoup de commandes de tailles réduites. Les agents devront donc savoir comment passer des commandes par lots de façon à réduire le coût par unité de produit transporté.

3. *Cause* : les risques de pénurie mènent à des achats préventifs

Conséquence pour les agents : les deux distributeurs qui s’approvisionnent chez la même scierie doivent savoir sur-commander lors des pénuries pour obtenir la quantité dont ils ont vraiment besoin.

4. *Cause* : fluctuation des prix induit des achats spéculatifs.

Conséquence pour les agents : si on laisse le prix de vente P d’un produit fluctuer, le problème n’est pas de faire fluctuer la variable de prix, mais est plutôt de faire tenir compte de cette fluctuation aux agents-clients. Il faudra en effet implémenter un comportement opportuniste pour qu’ils puissent profiter des baisses de prix.

5. *Cause* : les entreprises perçoivent mal les conséquences de leurs actions.

Conséquence pour les agents : les agents devront amplifier aléatoirement des commandes qu’ils reçoivent.

Deux approches peuvent être retenues dans notre étude :

- si nous supposons que nous partons de zéro, il faudra alors implémenter dans les agents les cinq causes précédentes de l’effet coup de fouet. Dans ce cas, le plus difficile n’est pas dans l’implémentation de la cause, mais dans la prise en compte de cette cause lors du processus de décision de l’agent. Par exemple, pour la quatrième cause, il est très facile de faire fluctuer le prix de vente (par exemple en établissant une relation de proportionnalité entre le niveau des stocks et le prix de vente unitaire). Par contre, faire augmenter ses achats à un agent lorsque le prix est bas est un peu plus compliqué.
- nous pouvons aussi supposer que toutes les solutions proposées pour réduire l’effet coup de fouet sont appliquées. Dans ce cas, seule la deuxième cause (taille des lots) devrait jouer dans notre système.

6.2.3 Fonctionnement de l’agent-entreprise générique

La figure 19 illustre le fonctionnement d’un agent en général, c’est à dire le comportement spécifié dans l’« agent générique ». Ce découpage est valable pour tous les agents du simulateur, même si certaines simplifications vont se faire lors de l’instanciation : par exemple, les agents de transport n’ont pas de stocks, c’est à dire que le Stock en Main de produits Reçus S_{mr} et le Stock en Main de produits à Livrer ont une taille nulle. Pour ces agents, la durée de l’activité T_{ac} représente le temps de transport.

Les activités de chaque agent sont réparties en trois pôles : la réception des produits provenant du fournisseur (via un agent de transport), l’activité propre à l’agent (par exemple couper du bois pour la scierie), et l’expédition des produits vers le client :

- *Réception* : l’agent maintient ici une file de données qui représente le stock en main de produits reçus S_{mr} . Cette pile de données empile des objets de types *item*. Chaque objet *item* représente une unité indivisible de produit qui a les propriétés *prix* et *date-de-creation*.
- *Activité* : c’est un mécanisme qui se fait de façon réflexe par l’agent. Le fonctionnement est le suivant. Si le stock d’encours L est vide, il est rempli avec L unités de produits retirés de la file S_{mr} . Après un temps T_{ac} , les produits sont retirés du stock L pour être

placés dans le stock S_{ml} . Puis ce processus recommence indéfiniment dès que le stock S_{mr} contient suffisamment de produits pour mettre L produits dans le stock L .

- *Expédition* : il s’agit aussi d’un mécanisme qui se fait de façon réflexe. Une file de données représente le stock en main de produits à livrer S_{ml} . Cette pile de données empile des objets de types *item* qui ont les mêmes propriétés que précédemment. Le fournisseur vient chercher des *item* dans ce stock, en tenant compte de la taille des chargements admissibles par le transporteur (sachant que le coût de transporteur est le même pour un camion plein et pour un camion vide).

Plus techniquement, les agents gèrent des *données* en mettant en œuvre des *services*. La figure 23 montre comment se répartissent les variables entre les trois pôles d’activité d’un agent. Ces variables permettent de représenter les trois parties de l’entreprise qui nous intéressent, à savoir la réception de produits du fournisseur, l’activité propre à l’entreprise (par exemple scier pour la scierie) et l’expédition (voir figure 23). Il existe un certain nombre de relations entre ces différentes variables, telle que $A = Q - S_{ml}$. C’est ce type de relations qui sont mises en œuvre dans les services qui suivent. La signification de ces variables se trouve dans l’annexe de ce papier.

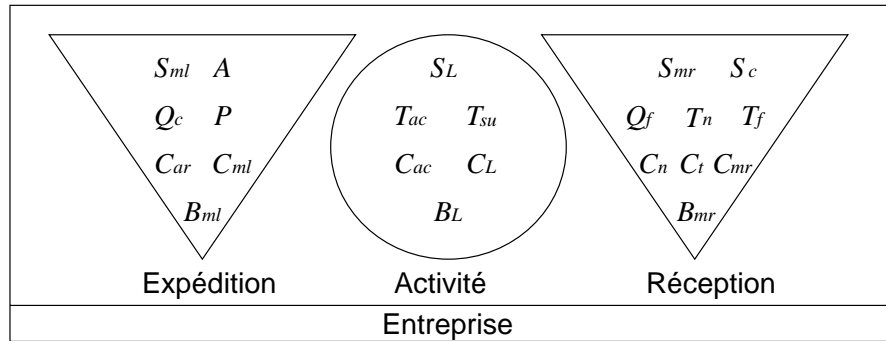


FIG. 23 – Répartition des variables dans un agent-entreprise.

Ensuite, les services des agents sont implémentés grâce à une base de règles qui se déclenchent lorsque leurs pré-conditions sont vraies (voir figure 24). Les règles *Recevoir*, *Produire* et *Expédier* sont très simples : chacune ne repose que sur une ou deux règles déclenchées par le temps qui passe ou par une quantité qui atteint un seuil. En revanche, les règles *Prévoir*, *Planifier* et *Commander* implémentent des comportements nettement plus évolués. Les choses réalisées lors de chacune de ces règles sont :

- *Recevoir*

Rôle : Réceptionner les produits arrivant du fournisseur.

Pré-condition : arrivée de produits.

Action : les produits transmis par le transporteur sont mis au début de la file d’attente symbolisant le stock S_{mr} .

- *Produire*

Rôle : Produire pour la scierie ou transporter pour les transporteur une quantité L de produits en un temps T_{ac} .

Pré-condition : Lorsqu'un temps T_{ac} s'est écoulé depuis de dernier déclenchement de cette règle ou sinon si le stock S_{mr} contient plus de L produits.

Action : Une quantité L de produits sont transférés du stock d'encours L vers le stock S_{mr} et une même quantité L de produits est prise dans la file S_{mr} pour être mise dans le stock d'encours L .

– *Traitement-cmde*

Rôle : Traitement de la commande, c'est à dire négociation avec le client de la commande adressée à l'agent.

Pré-condition : l'arrivée d'une commande du client.

Action : La négociation entre l'agent et son client est réalisée ici par un protocole de négociation. Les règles de *Traitement-cmde* négocient avec les règles *Commande* du client. En théorie, la négociation n'aboutit pas forcément, mais ce ne devrait jamais être le cas si toutes les entreprises implémentent le mécanisme de jetons proposés. Cette négociation porte sur la quantité commandée, sachant que le prix de vente est imposé par la fonction *Traitement-cmde*. Le prix de vente unitaire d'un produit P dépend de la quantité commandée et du Stock en Main de produits à Livrer S_{ml} : plus ce stock est important, plus le prix P diminue afin de favoriser la réduction de ce stock.

– *Expédier*

Rôle : Expédier les produits du stock S_{ml} vers le client.

Pré-condition : le stock a suffisamment de produits et le client a passé une commande.

Action : Si la négociation faite par *Traitement-cmde* a abouti, *Expédier* retire du stock S_{ml} la quantité de produits entendue est la confie au transporteur.

– *Prévoir-R*

Rôle : Prévoir la disponibilité de produits auprès du fournisseur.

Pré-condition : avant de passer de planifier.

Implémentation : règle du type « si je n'ai pas reçu 100% de ma dernière commande, alors surcommander » afin d'implémenter le cas échéant un comportement opportuniste dans l'agent.

– *Prévoir-E*

Rôle : Prévoir la demande future du client.

Pré-condition : aucune, il faut faire cela régulièrement (la pré-condition est donc déclenchée par l'horloge de l'agent).

Implémentation : cela dépend du mode de fonctionnement utilisé (centralisation de l'information, VMI, CPFR). Par exemple, s'il y a centralisation de l'information, cette règle peut estimer $m(t + d)$ en calculant une moyenne mobile.

– *Planifier*

Rôle : Planifier la prochaine commande de l’agent en se basant sur les prévisions issues de Prévoir.

Pré-condition : déclenché par la fin de Prévoir.

Implémentation : calcul basé sur les prévisions de *Prévoir-R* pour fixer quand et combien commander de façon à ce que cette commande soit la moins chère possible (ce coût dépend de la quantité commandée et du système d’impôts/subventions à jetons proposé). En ce qui concerne la validation du mécanisme à jetons proposé (donc la raison d’être de ce simulateur de chaîne logistique), c’est ici que se trouve la partie essentielle de l’agent, à savoir la gestion du mécanisme de jetons ainsi que la prise de décision sur quand et combien commander. Concrètement, c’est cette règle qui détermine les valeurs satisfaisants la relation 2, c’est à dire $Q_f(n)/\Delta T_f(n) = m(T_f(n) + d)$.

– *Commander*

Rôle : Passer des commandes au fournisseur de l’agent.

Pré-condition : Déclenchée par Planifier au moment opportun pour envoyer.

Implémentation : envoi d’un message de commande au fournisseur.

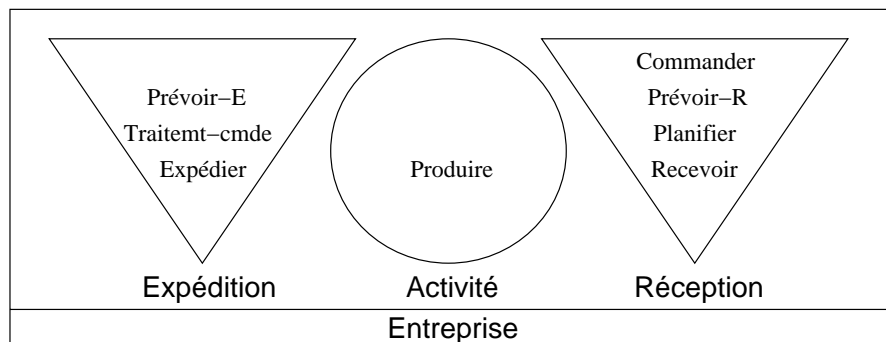


FIG. 24 – Règles à effectuer par chaque agent.

6.3 Installation physique

La réduction de l’effet coup de fouet dans l’industrie forestière peut se décomposer en deux parties. La première partie consiste à mettre en place les solutions qui ont été rappelées dans la revue de littérature (centralisation de l’information, politique de bas prix quotidiens (EDLP), partage des produits entre les clients par rapport aux historiques de commandes plutôt que par rapport à la commande actuelle, etc.). Cette partie pourrait être calquée soit sur la méthode suivie par Hameri [Hameri, 1996] dans la chaîne de distribution du papier, ou encore sur la démarche suivie par Taylor [Taylor, 2001] pour les composants automobiles qui a l’intérêt de lutter contre l’effet coup de fouet de manière purement pratique plutôt que théorique.

La seconde partie de l’approche est l’installation du mécanisme que nous proposons. Sa mise en place physique dans l’industrie forestière nécessite que toutes les entreprises acceptent

le principe des impôts et des subventions. Cet accord doit se concrétiser par des contrats dans lesquelles les entreprises s'engagent à suivre les règles du mécanisme et plus particulièrement à verser de l'argent à une autre entreprise lorsqu'elles ont à le faire. Ensuite, l'opérationnalisation du système d'impôt/subvention par des jetons se fera en ajoutant un composant logiciel aux systèmes d'information des entreprises. Ce composant devra :

1. quantifier l'effet coup de fouet généré par le passage d'une commande d'une taille donnée à un moment donné ;
2. gérer les jetons de l'entreprise :
 - itemdestruction des jetons positifs par des jetons négatifs ;
 - création de jetons lorsqu'une commande le rend nécessaire ;
 - mémorisation du niveau de jetons.
3. connaître la demande du marché, c'est à dire pouvoir lire l'information issue de la centralisation de l'information (ou selon les cas du VMI, du CPFR, etc.) ;
4. transférer avec chaque commande les jetons nécessaire (transfert d'information, si l'on suppose que le système de jetons est informatisé) ;

7 Planning de travail

Les tâches du planning de la figure 25 correspondent aux objectifs de notre recherche, à savoir :

1. étudier l'effet coup de fouet en détails et montrer qu'il relève de la problématique des systèmes informatiques multiagents, particulièrement pour les aspects de coordination et de coopération : achevé.
2. proposer des techniques originales multiagents pour atténuer, voire éliminer, le coup de fouet dans le cadre d'une coordination entre agents-entreprises-collaboratives : achevé.
3. analyser, spécifier et modéliser une chaîne logistique réelle (en l'occurrence la chaîne logistique forestière) et l'implémenter sur machine comme un système multiagent :
 - (a) analyser, spécifier et modéliser une chaîne logistique réelle : en cours, à terminer avant novembre 2002.
 - (b) implémenter ce modèle comme un système multiagent : en cours, à terminer avant fin 2002.
4. opérationnaliser les techniques multiagents proposées en 2 et les appliquer au système multiagent proposé en 3 : prévu pour le début la session d'hiver 2003.
5. analyser les résultats obtenus tout en mesurant l'efficacité des techniques multiagents proposées :
 - (a) analyser les résultats obtenus avec et sans le système de jetons proposé : prévu pour le milieu de la session d'hiver 2003.

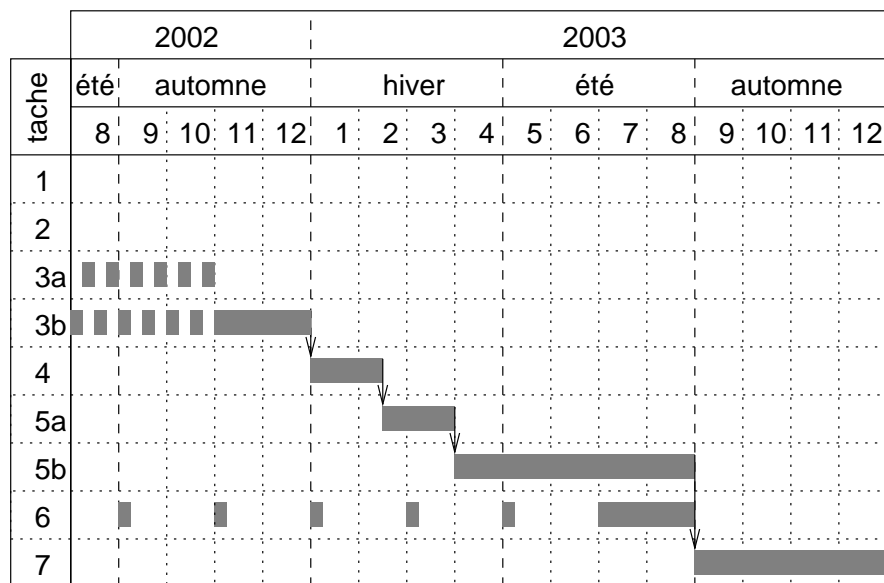


FIG. 25 – Planning de travail.

- (b) analyser les résultats obtenus avec des systèmes alternatifs (coordination centralisé, Kanbans généralisés, système PAC, etc.) : prévu pour la fin de la session d'hiver 2003 et l'été 2004.
6. proposer des solutions concrètes à mettre en place si les résultats obtenus sont probants : en cours, à finir si nécessaire d'ici la fin de la session d'été 2003.
 7. rédiger la thèse : pendant la session d'hiver 2003.

8 Collaborations

Pour effectuer ce travail, nous comptons collaborer avec :

- le consortium de recherche For@c de l'université Laval (Canada) dans le cadre duquel cette thèse s'effectue, et plus particulièrement avec Paul Callou (entreprise Kruger), Jean-Marc Frayet (directeur de la recherche), Alain Rousseau (directeur des projets industriels), Alain Martel (professeur titulaire au département des opérations et systèmes de décision de l'Université Laval) et Anass Jabiri (doctorant à la faculté des sciences de l'administration de l'université Laval).
- le laboratoire LSIS de l'université d'Aix-Marseille I (France), et plus particulièrement avec Bernard Espinasse (professeur), Erwan Tranvouez (maître de conférences) et Olivier Labarthe (doctorant).
- le centre de recherche CIRANO, et plus particulièrement Robert Gérin-Lajoie (directeur de projet du groupe de commerce électronique) et Houssein Benameur (professionnel de recherche).

9 Schéma de la thèse

La structure prévue de la thèse est la suivante :

1. Introduction
2. Problématique
3. Revue de littérature
4. Solution proposée
5. Validation de la solution proposée par simulation multi-agent
 - (a) Modélisation multi-agent d'une chaîne logistique
 - (b) Le simulateur multi-agent d'une chaîne logistique
 - (c) Mise à l'épreuve de la solution proposée par simulation multi-agent
 - (d) Analyse des résultats expérimentaux
6. La solution proposée mise en œuvre dans l'industrie forestière
7. Conclusion

10 Annexe

Notations utilisées

- T_f = temps écoulé depuis le dernier passage de commande (variable en heures) ;
- Q_f = quantité commandée aux fournisseurs de l'entreprise (variable en nombre d'items) ;
- Q_c = quantité commandée par les clients de l'entreprise (variable en nombre d'items) ;
- n = indice de la commande ;
- m = débit du marché (variable ou constant en items/heure) ;
- CF = mesure de l'effet coup de fouet (variable en items/heure) ;
- S_{mr} = quantité de Stock en Main de produits Reçus (variable en nombre d'items) ;
- S_{ml} = quantité de Stock en Main de produits à Livrer (variable en nombre d'items) ;
- S_L = quantité de produits dans l'encours L . Comme la production se fait par lot, S_L vaut soit zéro soit L (variable en nombre d'items) ;
- S_c = quantité de Stock Commandé mais pas encore reçu (variable en nombre d'items) ;
- A = arrérages, c'est à dire la quantité que l'entreprise doit encore livrer, mais qu'elle n'a pas de disponible (variable en nombre d'items) ;
- P = prix de vente (variable en \$/item) ;
- B_{ml} = capacité du stock S_{ml} ;
- B_{mr} = capacité du stock S_{mr} ;
- B_L = capacité de l'encours L , c'est à dire taille des Lots (constante en nombre d'items) ;
- C = coût total de l'agent, soit ce que chaque agent cherche à minimiser individuellement. On a donc $C^{actuel} = C^{precedent} + C_{pr} + C_{pl} + C_L + \sum_{nombre\ de\ lots} C_{ac} \cdot L + C_{ar} + C_{C_t} + C_n \cdot T_n$ (en \$) ;
- C_{mr} = coût de possession d'un produit en Main Reçu (constante en \$/item/heure) ;
- C_{ml} = coût de possession d'un produit en Main à Livrer (constante en \$/item/heure) ;
- C_L = coût de possession des encours L (constante en \$/item/heure) ;
- C_{ac} = coût de réalisation de l'ACTivité (constante en \$/item) ;
- C_{ar} = coût d'ARRéage, c'est à dire coût d'une rupture de stock de produits à livrer (constante en \$/item manquant/heure) ;
- C_t = coût d'une Transaction (constante en \$/commande) ;

- C_n = coût de Négociation (en \$/unité de temps de négociation);
- T_n = Temps (durée) écoulé depuis le début de la Négociation en cours (variable en heures);
- T_{ac} = Temps (durée) de l'ACTivité (constante en heures/item);
- T_{su} = Temps (durée) de SetUp, c'est à dire le temps pour changer de produit (constante en heures/changement de produit);
- L = Longue période de référence, par exemple une année (constante en heures);

Références

- [Alliance IBM, i2 et Ariba, 2001] Alliance IBM, i2 et Ariba (2001). <http://www.ibm-i2-ariba.com>.
- [Anderson, 2000] Anderson, G. (2000). From the supply chain to collaborative commerce networks : the next step in supply chain management. *ASCET*, 2. <http://anderson-g.ASCET.com>.
- [Ariba, Inc., 2001] Ariba, Inc. (2001). <http://www.ariba.com>.
- [Asikainen, 2001] Asikainen, A. (2001). Design of supply chains for forest fuels. In Sjöström, K. and Rask, L.-O., editors, *Supply Chain Management for Paper and Timber Industries*, pages 179–190.
- [Asselin, 2002] Asselin, F. (2002). Formation de coalitions d’agents logiciels pour le groupement d’acheteurs. Master’s thesis, Université Laval, Département d’informatique et de génie logiciel, Québec, Canada.
- [Asselin and Chaib-draa, 2002] Asselin, F. and Chaib-draa, B. (2002). Towards a protocol for the formation of coalitions of buyers. In Crainic, T. G. and Gavish, B., editors, *Proceedings of the Fifth International Conference on Electronic Commerce Research (ICECR-5)*.
- [Atkinson et al., 1997] Atkinson, A. A., Banker, R. D., Kaplan, R. S., and Young, S. M. (1997). *Management Accounting, second edition*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- [Baan AG, 2001] Baan AG (2001). Web site : <http://www.baan.com>.
- [Backx et al., 1998] Backx, T., Bosgra, O., and Marquardt, W. (1998). Towards intentional dynamics in supply chain conscious process operations. *Invited paper at FOCAPO 1998*.
- [Balasubramanian et al., 2001] Balasubramanian, S., Whitman, L., Ramachandran, K., and Sheelavant, R. (2001). Causes and remedies of bullwhip effect in supply chain. In *Annual conference 2001, Hotel inter-continental, Dallas, Texas, USA*.
- [Barbuceanu and Fox, 1995] Barbuceanu, M. and Fox, M. (1995). Cool : A language for describing coordination in multi-agent systems. In *Proceedings of the first International Conference on Multi-Agent Systems*.
- [Barbuceanu and Fox, 1996] Barbuceanu, M. and Fox, M. (1996). Coordinating multiple agents in the supply chain. In *Proceedings of the Fifth Workshops on Enabling Technology for Collaborative Enterprises, WET ICE’96, IEEE Computer Society Press*, pages 134–141.
- [Baumgaertel et al., 2001] Baumgaertel, H., Brueckner, S., Parunak, V., Vanderbok, R., and Wilke, J. (2001). Agent models of supply network dynamics. *The Practice of Supply Chain Management*.
- [Beauregard et al., 1994] Beauregard, R., Beaudoin, M., Ait-Kadi, D., and Mongeau, J.-P. (1994). A systemic approach to consider complexity in sawmill modeling. *Wood and Fiber Science*, 26(3) :421–437.

- [Beauregard et al., 1995] Beauregard, R., Beaudoin, M., Ait-Kadi, D., and Mongeau, J.-P. (1995). A systemic approach for sawmill modeling. *Wood and Fiber Science*, 27(3) :301–318.
- [Beauregard et al., 1997] Beauregard, R., Beaudoin, M., Ait-Kadi, D., and Mongeau, J.-P. (1997). A systemic approach to reengineering sawmills : A supplier’s perspective. *Forest Products Journal*, 47(2) :38–46.
- [Beck and Fox, 1994] Beck, J. and Fox, M. (1994). Supply chain coordination via mediated constraint relaxation. In *Proceedings of the First Canadian Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, pages 61–72, Banff, Canada.
- [Ben-Ameur et al., 2002] Ben-Ameur, H., Chaib-draa, B., Gérin-Lajoie, R., Kropf, P. G., and Vaucher, S. (2002). Towards an agent-based package e-procurement. Série scientifique du CIRANO de montréal, PQ, Canada.
- [Berger, 2000] Berger, A. (2000). Leaders of the web.com : accelerating the transition to the web-based world. *ASCET*, 2. <http://berger.ASCET.com>.
- [Blackburn, 1991] Blackburn, J. D. (1991). The quick response movement in the apparel industry : a case study in time-compressing supply chains. In Irwin, Homewood, I., editor, *Time-based competition : the next battleground in American manufacturing*, chapter 11.
- [Bournez and Gutknecht, 2001] Bournez, C. and Gutknecht, O. (2001). Modèle de contrôle par émergence de coordinations dans un réseau de contrats multiagents. In *Journées Francophones de l’Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes MultiAgents*, Montréal, Québec, Canada.
- [Bovet and Martha, 2000] Bovet, D. and Martha, J. (2000). *Value nets, breaking the supply chain to unlock hidden profits*. John Wiley and sons, Inc.
- [Bredström et al., 2001] Bredström, D., Lundgren, J. T., Mason, A., and Rönnqvist, M. (2001). Supply chain optimization in the pulp mill industry. In *LiTH-MAT-R-2001-12*.
- [Buzacott and Shanthikumar, 1992] Buzacott, J. and Shanthikumar, G. (1992). A general approach for coordinating production in multiple-cell manufacturing systems. *Production and operations management*, 1(1) :34–52.
- [Cachon and Zipkin, 1999] Cachon, G. P. and Zipkin, P. H. (1999). Competitive and cooperative inventory policies in a two-stage supply chain. *Management science*, 45(7) :936–953.
- [Carlsson and Fullér, 2000] Carlsson, C. and Fullér, R. (2000). A fuzzy approach to the bullwhip effect. In *Cybernetics and Systems ’2000, Proceedings of the Fifteenth European Meeting on Cybernetics and Systems Research*. Vienna, Austria.
- [Carlsson and Fullér, 2001] Carlsson, C. and Fullér, R. (2001). Reducing the bullwhip effect by means of intelligent, soft computing methods. In *Proceedings of the 34th Hawaii international conference on system sciences*.
- [Chaib-draa, 1995] Chaib-draa, B. (1995). Industrial applications of Distributed AI. *Communication of ACM*, 38(11) :49–53.

- [Chaib-draa et al., 2001] Chaib-draa, B., Moulin, B., and arras, I. (2001). Agent et systèmes multiagents. In J.P. Briot et Y Demazeau, editor, *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. Hermes, Lavoisier.
- [Chen, 1999] Chen, F. (1999). Decentralized supply chains subject to information delays. *Management science*, 45(8) :1076–1090.
- [Chen et al., 1994] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., and Simchi-Levi, D. (1994). The bullwhip effect : Managerial insights on the impact of forecasting and information on variability in a supply chain. In *Quantitative models for supply chain management*, chapter 14. Sridhar Tayur, Ram Ganeshan and Michael Magazine.
- [Chen and Samroengraja, 2000] Chen, F. and Samroengraja, R. (Spring 2000). The stationary beer game. *Production and operations management*, 9(1) :19–30.
- [Cingil and Dogac, 2001] Cingil, I. and Dogac, A. (2001). An architecture for supply chain integration and automation on the internet. *Journal of distributed and parallel databases*, 10(10) :59–102.
- [Clark and Scarf, 1960] Clark, A. and Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management science*, 6 :465–490.
- [Cloutier et al., 2001] Cloutier, L., Frayret, J.-M., D’Amours, S., Espinasse, B., and Montreuil, B. (2001). A commitment-oriented framework for networked manufacturing coordination. *International journal of computer integrated manufacturing*, 14(6) :522–534.
- [Commerce One Inc., 2001] Commerce One Inc. (2001). <http://www.commerceone.com/>.
- [Consortium Rosetta Net, 2001] Consortium Rosetta Net (2001). <http://www.rosettanet.org/>.
- [Daganzo, 2001] Daganzo, C. (2001). A theory of supply chains. This report is a set of lecture notes for an advanced course on transportation theory, delivered in the Fall 2001.
- [DARPA, 2001] DARPA (2001). DAML (DARPA Agent Markup Language), www.daml.org/.
- [Dodd and Kumara, 2001] Dodd, C. and Kumara, S. R. T. (2001). A distributed multi-agent model for value nets. *IEA/AIE 2001*, pages 718–727.
- [Eymann, 2001] Eymann, T. (2001). Markets without makers - a framework for decentralized economic coordination in multiagent systems. In *L. Fiege, G. Mühl, U. Wilhelm (Eds.) : Electronic Commerce. Proceedings of the Second International Workshop WELCOM 2001, Heidelberg, Germany*, pages 63–74, Department of computer science and information systems, University of Hong Kong. Lecture Notes in Computer Science 2232.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les systemes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris.
- [Fisher et al., 1999] Fisher, K., Chaib-draa, B., Müller, J. P., Pischel, M., and Gerber, C. (1999). A simulation approach based on negotiation and cooperation between agents : A case study. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 29(4) :531–545.

- [Fjeld, 2001] Fjeld, D. E. (2001). The wood supply game as an educational application for simulating dynamics in the forest sector. In Sjöström, K. and Rask, L.-O., editors, *Supply Chain Management for Paper and Timber Industries*, pages 241–251, Växjö.
- [Forrester, 1958] Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics - a major breakthrough for decision-makers. *Harvard Business Review*.
- [Forrester, 1961] Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. The M.I.T. press - Massachusetts Institute of Technology - Cambridge, Massachusetts.
- [Fransoo and Wouters, 2000] Fransoo, J. C. and Wouters, M. J. (2000). Measuring the bullwhip effect in the supply chain. *Supply Chain Management*, 5(2).
- [Garé, 2000] Garé, B. (2000). Entreprise, ouvre-toi! *Logiciels & systèmes*, (52). Dossier spécial chaîne logistique.
- [Greenstein, 2000] Greenstein, S. (2000). The commercialization of information infrastructure as technological mediation : the internet access market. *Informations Systems Frontiers*, 1(4) :329–348.
- [Haartveit and Fjeld, 2002] Haartveit, E. Y. and Fjeld, D. E. (2002). Experimenting with industrial dynamics in the forest sector - a beer game application. In *Symposium on Systems and Models in Forestry*, Chile.
- [Hachette, 2002] Hachette (2002). Dictionnaire universel francophone en ligne. <http://www.francophonie.hachette-livre.fr/>.
- [Hameri, 1994] Hameri, A.-P. (1994). Papermaking and distribution logistics - practical experience. *Paper and Timber*, 76(4) :246–250.
- [Hameri, 1996] Hameri, A.-P. (1996). A method to avoid demande amplification in bulk paper distribution. *Paper and Timber*, 78(3) :102–106.
- [Hameri and Lehtonen, 2001] Hameri, A.-P. and Lehtonen, J.-M. (2001). Production and supply management strategies. *Scandinavian Journal of Management*, 17 :376–396.
- [Hicks, 1999] Hicks, D. A. (1999). The state of supply chain strategy. *IIE Solutions*, 31(8).
- [i2 Technologies, 2001] i2 Technologies (2001). <http://www.i2.com>.
- [IBM Corporation, 2001] IBM Corporation (2001). <http://www.ibm.com>.
- [IBM Research, 2001] IBM Research (2001). Bpmat : a business process modeling and analysis tool. <http://www.research.ibm.com/pdtr/bpmat.htm>.
- [J. D. Edwards & Co., 2001] J. D. Edwards & Co. (2001). <http://www.jdedwards.com>.
- [Jacobs, 2000] Jacobs, F. R. (2000). Playing the beer distribution game over the internet. *Production and operations management*, 9(1) :31–39.
- [Jennings and Wooldridge, 1998] Jennings, N. and Wooldridge, M. (1998). Applications of intelligent agents. In *Agent technology : Foundations, applications and markets*, pages 3–28.

- [John Taras CPIM, 2001] John Taras CPIM (2001). <http://www.vendormanagedinventory.com/>.
- [Kimbrough et al., 2001] Kimbrough, S. O., Wu, D., and Zhong, F. (2001). Computers play the beer game : can artificial agents manage supply chains? *Decision Support Systems*.
- [Labarthe, 2000] Labarthe, O. (2000). *Modélisation multi-agent de chaînes logistiques*. Mémoire de diplôme d'études approfondies, Université d'Aix-Marseille 3, Marseille, France.
- [Lakhal et al., 1998] Lakhal, S. Y., Martel, A., and Oral, M. (1998). L'entreprise réseau : un cadre conceptuel pour une modélisation formelle. Document de travail No. 1998-030, Faculté des Sciences de l'Administration, Centre CENTOR, Université Laval, Québec, PQ, Canada.
- [Lee et al., 1997a] Lee, H. L., Padmanabhan, V., and Whang, S. (1997a). The bullwhip effect in supply chain. *Sloan management review*, pages 93–102.
- [Lee et al., 1997b] Lee, H. L., Padmanabhan, V., and Whang, S. (1997b). Information distortion in a supply chain : the bullwhip effect. *Management Science*, 43(4) :546–558.
- [Lee and Whang, 1999] Lee, H. L. and Whang, S. (1999). Decentralized multi-echelon supply chains : incentives and information. *Management Science*, 45(5) :633–640.
- [Liberopoulous and Dallery, 2000] Liberopoulous, G. and Dallery, Y. (2000). A unified framework for pull control mechanisms in multi-stage manufacturing systems. *Annals of Operations Research*, 93(1) :325–355.
- [Lizotte and Chaib-draa, 1997] Lizotte, S. and Chaib-draa, B. (1997). Coordination in CE systems : An approach based on the management of dependencies between agents. *Concurrent Engineering : Research and Applications (CERA)*, 5(4) :367–377.
- [Lyonnais and Montreuil, 2001] Lyonnais, P. and Montreuil, B. (2001). Un environnement distribué de simulation à base d'agents. In *3e conférence francophone de MODélisation et SIMulation - conception, analyse et gestion des systèmes industriels*, Troyes (France).
- [Mallya, 1999] Mallya, S. N. (1999). *Demand driven production and distribution : Seamless integration of downstream supply chain decisions using electronic data interchange*. Partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Drexel University, Philadelphia, PA, USA.
- [Martel, 2001] Martel, A. (2001). Conception et gestion de chaînes logistiques. Manuel de formation, Université Laval, Québec, PQ, Canada.
- [Maturana et al., 1999] Maturana, F., Shen, W., and Norrie, D. (1999). Metamorph : an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing. *International Journal of Production Research*, 37(10) :2159–2173.
- [Muckstadt et al., 2001] Muckstadt, J., Murray, D., Rappold, J., and Collins, D. (2001). Guidelines for collaborative supply chain system design and operation. *Information Systems Frontiers*, 3(4) :427–435.
- [Numetrix, 2001] Numetrix (2001). <http://www.numetrix.com>.

- [OASIS, 2001] OASIS (2001). The XML cover pages - XML Common Business Library (xCBL). www.oasis-open.org/cover/cbl.html.
- [Oliver and Webber, 1992] Oliver, R. K. and Webber, M. D. (1992). Supply-chain management : Logistics catches up with strategy (reprint from outlook (1982)). In M., C., editor, *Logistics - The strategic issues*, pages 63–75. London et al.
- [Oracle Corp., 2001] Oracle Corp. (2001). <http://www.oracle.com/applications>.
- [Parunak, 1996] Parunak, H. V. D. (1996). Applications of distributed artificial intelligence in industry. In O'Hare, G. M. P. and Jennings, N. R., editors, *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, pages 71–76. John Wiley & Sons.
- [Parunak, 1998] Parunak, H. V. D. (1998). Industrial and practical applications of dai. In Wei, G. (Ed.) : *Multi-Agent Systems. The MIT Press : Cambridge, MA, 1998*. <http://www.erim.org/van/apps98.pdf>.
- [Parunak and VanderBok, 1998] Parunak, H. V. D. and VanderBok, R. (1998). Modeling the extended supply network. In *ISA-Tech'98 (Houston)*, Industrial Technology Institute.
- [Poirier and Reiter, 2001] Poirier, C. C. and Reiter, S. E. (2001). *La supply chain - Optimiser la chaîne logistique et le réseau interentreprises*. Dunod. Traduit de « The supply chain optimization : Building the strongest total business network (1996) par Monique Sperry.
- [Porter, 1986] Porter, M. (1986). *L'avantage concurrentiel*. InterEditions (Paris). Traduit de Competitive Advantage (1985) par Philippe de Lavergne.
- [Porteus, 2000] Porteus, E. L. (2000). Responsibility tokens in supply chain management. *Manufacturing & service operations, Informis*, 2(2) :203–279.
- [Price, 2000] Price, N. (2000). Le e-Procurement fait son entrée en France. *Logiciels & systèmes*, (52).
- [Promatis Corp., 2001] Promatis Corp. (2001). Supply chain management intelligence and improvement roadmap. White paper disponible sur <http://www.get-income.com/info/download/whitepapers/>.
- [QAD Inc., 2001] QAD Inc. (2001). <http://www.qad.com/>.
- [Quinn et al., 2000] Quinn, F., Fitzgerald, K. R., and Bradley, P. (2000). Supply chain perspectives from the business press. *ASCET*, 2. <http://quinn-f.ASCET.com>.
- [Ressources naturelles Canada, 2002] Ressources naturelles Canada (2002). L'état des forêts au canada : Nos forêts au nouveau millénaire 1999-2000. <http://www.nrcan.gc.ca/cfs-scf/>.
- [Rigby et al., 2000] Rigby, C., Day, M., Forrester, P., and Burnett, J. (2000). Agile supply : rethinking systems thinking, systems practice. *International journal of agile management systems*, 2(3) :178–186.
- [Russel and Norvig, 1995] Russel, S. and Norvig, P. (1995). *Artificial Intelligence - A modern approach*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

- [Sadeh et al., 1999] Sadeh, N., Hildum, D., Kjenstad, D., and Tseng, A. (1999). Mascot : An agent-based architecture for coordinated mixed-initiative supply chain planning and scheduling. In *Workshop notes, Agent-Based Decision Support for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Third International Conference on Autonomous Agents (Agents '99)*.
- [SAP AG., 2001] SAP AG. (2001). <http://www.sap.com>.
- [Scholl, 2001] Scholl, H. J. (2001). Looking across the fence : Comparing findings from sd modeling efforts with those of other modeling techniques. In *19e international conference of the system dynamics society*, Emory Hotel and Conference Center, Atlanta, Georgia, USA.
- [Schreiber et al., 1999] Schreiber, G., Hakkermans, H., Anjewierden, A., de Hoog, R., Shadbolt, N., de Velde, W. V., and Wielinga, B. (1999). *Knowledge engineering and management - the CommonKADS Methodology*. MIT Press, ISBN : 0262193000.
- [Shapiro, 2000] Shapiro, J. F. (2000). *Modeling the Supply Chain*. Duxbury.
- [Shen and Norrie, 1999] Shen, W. and Norrie, D. H. (1999). Agent-based systems for intelligent manufacturing : A state-of-the-art survey. *Knowledge and Information Systems*, 1(2) :129–156.
- [Simchi-Levi et al., 2000] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., and Simchi-Levi, E. (2000). *Designing and managing the supply chain*.
- [Sjöström, 2001] Sjöström, K. (2001). Costs and lead time of material flows in pulp and paper manufacturing line. In Sjöström, K. and Rask, L.-O., editors, *Supply Chain Management for Paper and Timber Industries*, pages 192–202, Växjö.
- [Stadtler, 2000] Stadtler, H. (2000). Supply chain management - an overview. In Stadtler, H. and Kilger, C., editors, *Supply chain management and advanced planning - Concepts, models, software and case studies*, pages 7–28. Springer-Verlag.
- [Sterman, 1989] Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior : Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management science*, 35(3) :321–339.
- [Sudra, 2000] Sudra, R. (2000). Distributed supply chain simulator in grids. In Joines, J. A., Barton, R. R., Kang, K., and Fishwick, P. A., editors, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pages 356–361.
- [Sun microsystems, 2002] Sun microsystems (2002). Java 2 platform. <http://java.sun.com/>.
- [Supply Chain Council, 2001] Supply Chain Council (2001). Scor version 5.0! introduction web cast. Présentation PowerPoint disponible sur http://www.supplychainworld.org/WebCast/SCOR50_overview.ppt.
- [Swaminathan et al., 1998] Swaminathan, J. M., Smith, S. F., and Sadeh, N. M. (1998). Modeling supply chain dynamics : A multiagent approach. *Decision Sciences*, 29(3) :607–632.
- [Taylor, 1999] Taylor, D. (1999). Measurement and analysis of demand amplification across the supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 10(2) :55–70.

- [Taylor, 2000] Taylor, D. (2000). Demand amplification : Has it got us? *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 30(6) :515–533.
- [Taylor, 2001] Taylor, D. (2001). An approach to the identification and elimination of demand amplification across the supply chain. In Taylor, D. and Brunt, D., editors, *Manufacturing operations and supply chain management*, pages 155–174. Thomson Learning.
- [Teigen and Barbuceanu, 1996] Teigen, R. and Barbuceanu, M. (1996). The supply chain demonstrator, Rapport technique et guide de l'utilisateur.
- [Toshiba Corp., 2002] Toshiba Corp. (2002). Bee-gent (Bonding and Encapsulation Enhancement aGENT). <http://www.toshiba.co.jp/beegent/index.htm>.
- [VICS Association, 2001] VICS Association (2001). <http://www.cpfr.org>.
- [Waller et al., 1999] Waller, M., Johnson, M. E., and Davis, T. (1999). Vendor-managed inventory in the retail supply-chain. *Journal of business logistics*, 20(1) :183–203.
- [Walsh, 2001] Walsh, W. E. (2001). *Market protocols for decentralized supply chain formation*. Thèse de doctorat, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA.
- [Walsh and Wellman, 1998] Walsh, W. E. and Wellman, M. P. (1998). A market protocol for decentralized task allocation. In *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-98)*, Department of computer science and information systems, University of Hong Kong. Extended version of A market protocol for decentralized task allocation.
- [Walsh and Wellman, 1999] Walsh, W. E. and Wellman, M. P. (1999). Modeling supply chain formation in multiagent systems. In *Agent mediated electronic commerce (IJCAI workshop)*, pages 94–101.
- [Wilding, 1998] Wilding, R. (1998). The supply chain complexity triangle - uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 28(8) :599–616.
- [Wooldridge and Jennings, 1995] Wooldridge, M. and Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2) :115–152.
- [World Wide Web Consortium, 1999] World Wide Web Consortium (1999). Resource description framework (RDF) model and syntax specification. W3C Recommendation, www.w3.org/TR/REC-rdf-syntax.
- [World Wide Web Consortium, 2000] World Wide Web Consortium (2000). Resource description framework (RDF) schema specification 1.0. W3C candidate recommendation, www.w3.org/TR/rdf-schema/.
- [World Wide Web Consortium, 2001] World Wide Web Consortium (2001). www.w3c.org.