

Coordination à base de jetons pour réduire l'amplification de la variabilité de la demande dans une chaîne logistique forestière*

Thierry Moyaux¹, Brahim Chaib-draa¹, Sophie D'Amours²

¹ Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR), Consortium de recherche FOR@C, Laboratoire DAMAS, Département d'Informatique et de Génie Logiciel, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4.

Email : {moyaux, chaib}@iad.ift.ulaval.ca

² Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR), Consortium de recherche FOR@C, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4.

Email : sophie.damours@gmc.ulaval.ca

Résumé. Dans ce papier, nous proposons un mécanisme de coordination permettant de réduire l'effet coup de fouet (i.e. l'augmentation de la variabilité de la demande) dans une chaîne logistique. Ce mécanisme repose sur des jetons permettant à une entreprise de séparer ses commandes en deux composantes : la partie « commande » représente ce dont elle a besoin pour faire face à la demande du marché alors que la partie « jetons » représente ce dont elle a besoin pour stabiliser ses inventaires. Pour valider notre approche, nous utilisons un modèle de chaîne logistique adapté du jeu de la bière (*Beer Game*) afin de prendre en compte les spécificités de l'industrie forestière du Québec (une province canadienne). Ce modèle est implémenté dans un tableur afin de pouvoir comparer expérimentalement notre approche à d'autres méthodes de passage de commandes.

Mots clés : Conception et pilotage des chaînes logistiques, amplification de la variabilité de la demande, partage de l'information, *Beer Game*.

1. Introduction

Les performances de nombreux systèmes sont réduites par la fluctuation des flux qui les parcourent. En tant que systèmes distribués composés d'entreprises traversées par différents flux (physique, financier et d'informations), les chaînes logistiques font aussi face à ce problème : il s'agit de l'amplification de la variabilité de la demande. Cette amplification de la variabilité (qui est aussi connue sous le nom d'effet coup de fouet ou encore d'effet de Forrester (1958), du nom de la première personne à l'avoir mise en évidence) est une déformation de l'information lorsque cette information remonte la chaîne logistique du point de vente vers les fournisseurs de matières premières. Concrètement, elle se propage de la façon suivante : le point de vente émet des commandes quasi-constantes à ses fournisseurs, alors que ces fournisseurs émettent des commandes qui sont plus variables et plus imprévisibles. Les conséquences néfastes de ce phénomène sont l'accroissement des inventaires, la réduction du service aux clients due à des ruptures de stock, l'inefficacité des transports, l'échec des plans de production...

* Nous tenons à remercier le consortium de recherche FOR@C (www.forac.ulaval.ca) pour son soutien financier.

Afin de donner une vue différente de notre article (Moyaux *et al.*, 2003) où la chaîne logistique est assimilée à un système multiagent que l'on cherche à coordonner, ce papier adresse la réduction de l'effet coup de fouet en assimilant une chaîne logistique à un système dans lequel la dynamique des flux est difficile à cerner. Notre objectif est donc de stabiliser ce système en trouvant comment coordonner les commandes émises par des entreprises considérées comme totalement autonomes les unes des autres. Ceci nous conduit à proposer aux entreprises une manière de commander qui stabilise les commandes qu'elles passent. Avec cette technique, nous parvenons à préserver l'autonomie des entreprises car il n'y a pas de coordonnateur central jouant le rôle d'un chef d'orchestre et les entreprises n'ont pas à transmettre l'intégralité de leurs informations afin que ce coordonnateur central puisse calculer une façon optimale de commander. En effet, le mécanisme à base de jetons proposé ne suppose, lors d'un passage de commande, que la communication aux fournisseurs de deux informations : le besoin propre et le besoin du(des) client(s) direct(s). De ce point de vue, notre mécanisme est une mise en œuvre du partage de l'information sur la demande entre chaque paire d'entreprises proposé par Lee et ses collègues (1997a, 1997b) et qui est souvent perçu comme le meilleur moyen de lutter contre l'effet coup de fouet (Simchi-Levi *et al.*, 2000). Notre mécanisme consiste à séparer chaque commande en deux composantes : nous appelons « commande » la demande du marché transmise d'entreprise en entreprise et « jetons » la composante permettant de gérer les conséquences de la fluctuation de la demande du marché, donc de la partie « commande ». Nous supposons dans ce papier que toutes les entreprises jouent le jeu en transférant fidèlement à leur fournisseur la partie « commande » provenant de leur client. Le principe de ce mécanisme est présenté dans la section 2. Nous avons utilisé le Jeu du Bois Québécois comme modèle de chaîne logistique lors de la validation de ce mécanisme. Ce jeu est un dérivé des deux *Wood Supply Games* (Fjeld, 2001 ; Haartveit et Fjeld, 2002) qui sont eux-mêmes des adaptations du *Beer Game* (Sterman, 1989) aux spécificités de l'industrie forestière d'Europe du Nord. Ces quatre jeux sont très similaires : chaque participant joue le rôle d'une entreprise qui doit satisfaire la demande de son client en passant des commandes à son fournisseur et en satisfaisant sa demande et tout cela en gérant son inventaire de façon à le minimiser et à éviter les ruptures de stock. Dans tous ces jeux, le but est de faire cette minimisation par rapport à l'ensemble de la chaîne logistique : les joueurs jouent ensemble et non les uns contre les autres. Les participants comprennent ainsi de façon ludique certaines dynamiques d'une chaîne logistique et en particulier en quoi l'effet coup de fouet est gênant : à cette fin, FOR@C (consortium de recherche sur les affaires électroniques dans l'industrie des produits forestiers, Université Laval, Ville de Québec, Canada) organise avec ses partenaires industriels des parties de Jeu du Bois Québécois dans ce but. Lors de la validation de notre mécanisme, nous avons implémenté le Jeu du Bois Québécois dans un tableur : le modèle de chaque entreprise de ce jeu est donné dans la section 3 et les résultats de la validation dans la section 4.

2. Principe

L'idée à la base de notre approche est que l'effet coup de fouet peut s'éliminer facilement en forçant chaque entreprise à commander à son fournisseur ce que son client vient de lui commander (commandes un-pour-un). Cette façon de faire induit malheureusement des fluctuations importantes des inventaires (stocks trop importants et ruptures de stocks). Pour éviter ces fluctuations, notre mécanisme ajoute aux commandes un-pour-un une information appelée « jetons » pour représenter la quantité de produits que les entreprises ont besoin en plus ou en moins par rapport à la partie commande pour stabiliser leurs stocks à un niveau pertinent. Le but que doit atteindre ce

mécanisme est à la fois de ramener la chaîne logistique dans un nouvel état stable, mais aussi que cet état soit satisfaisant. En particulier, les niveaux d'inventaires doivent se stabiliser sur une valeur positive pour éviter d'avoir des arrérages (i.e. une baisse du service aux clients) et cette stabilisation doit se faire de préférence sur la quantité stockée au départ (ou une autre quantité jugée pertinente par rapport à la consommation du marché). Afin d'alléger les explications, on suppose dans tout le reste de cette section que la consommation du marché est constante avant et après un doublement brusque et unique. Dans ces conditions, si chaque entreprise se contente de commander ce que ses clients lui commandent (commandes un-pour-un), alors la chaîne logistique se stabilise très vite. Le premier but de stabilisation de la chaîne (i.e. but de réduction de l'effet coup de fouet) est donc atteint, mais cela conduit les niveaux d'inventaire de la chaîne logistique à diminuer de façon incontrôlée du fait de l'existence de *retards* : lorsqu'une entreprise apprend que la consommation du marché double, elle double ses expéditions et ses commandes, mais continue de recevoir pendant quelques temps ce qu'elle commandait précédemment, soit la moitié de ses besoins actuels. Pour pouvoir maîtriser cette fluctuation des inventaires, nous ajoutons ici les jetons. En effet, si l'entreprise avait commandé en agrégeant les parties commande et jetons, ses fournisseurs auraient interprété cela comme une augmentation encore plus importante de la consommation du marché. Au lieu de cela, la connaissance des besoins réels de l'entreprise permet l'apparition d'une rétroaction négative qui stabilise le système et qui est due à la connaissance qu'ont les entreprises de la raison de l'accroissement brusque des commandes qui leur arrivent : les entreprises sont en effet capables de discerner l'accroissement du au doublement de la consommation du marché de l'accroissement induit par les conséquences de ce doublement. Ici, la conséquence de ce doublement est une réduction des inventaires : l'émission de jetons va donc servir à reconstituer les stocks de sécurité¹.

Si on suppose en plus qu'il n'y a aucune limite de capacité dans la chaîne logistique, le traitement des jetons va se faire comme suit : après avoir remonté la chaîne logistique d'entreprise en entreprise depuis leur point d'émission (comme le font les commandes), les jetons arrivent chez le fournisseur le plus en amont (la forêt dans le cas de l'industrie forestière) où ils déclenchent l'expédition par ce fournisseur d'un unique lot de produits suffisamment important pour remonter les stocks de toutes les entreprises lorsque ce lot les traversera les unes après les autres. La taille de ce gros lot est donnée par la somme de jetons émis successivement par chaque entreprise qui se sont passées des commandes jusqu'à atteindre ce fournisseur le plus en amont. Concrètement, notre mécanisme fait traverser quatre états à la chaîne logistique :

1. *état initial* : avant le doublement de la demande du marché, le flux de produits dans la chaîne logistique est égal à la demande du marché. Les entreprises passent des commandes égales d'une période à l'autre et dont la quantité correspond à la demande du marché. Aucun jeton n'a besoin d'être émis.
2. *réponse de la chaîne logistique à la perturbation du marché* : juste après l'unique doublement de la demande du marché, les entreprises doublent leurs commandes puisqu'elles suivent strictement la demande du marché (commandes un-pour-un), mais à cause des délais de transmission des commandes et des délais de livraison, elles continuent de recevoir la quantité de produits qu'elles recevaient auparavant, soit deux fois moins que ce dont el-

¹ De façon générale, les jetons peuvent être utilisés différemment : par exemple, lorsque la consommation est strictement constante et qu'en entreprise veut réduire ses inventaires sans générer d'effet coup de fouet, elle émet des jetons négatifs pour en informer ses fournisseurs.

les ont maintenant besoin. Par conséquent, leurs inventaires diminuent. Les entreprises émettent donc des jetons au début de cet état pour dire à leurs fournisseurs qu'elles ont besoin de produits supplémentaires pour reconstituer leurs inventaires.

3. *état stable intermédiaire* : comme les entreprises commandent toutes ce qu'on leur commande (commandes un-pour-un), la chaîne logistique se restabilise. C'est état est stable car les flux de matières tout comme les commandes passées correspondent à la demande du marché, mais les inventaires y sont trop faibles (voir négatifs s'il y a des arrérages) ; cet état stable est donc indésirable.
4. *état stable final* : après que le gros lot de produits déclenché par les jetons ait traversé toutes les entreprises, la chaîne logistique reste dans le même état stable que l'état 3, à la différence près que les inventaires sont remontés à un niveau convenable.

3. Modèle d'une entreprise

Dans cette section, nous décrivons le modèle d'entreprise utilisé à des fins de validation dans la section 4. Nous utilisons les variables suivantes pour représenter chaque entreprise n dans la période w : To_w^n pour les transports quittant l'entreprise n dans la période w (afin d'être plus lisible, To_w^n est décomposé en Too_w^n , Tob_w^n et $To\Theta_w^n$ qui sont les expéditions correspondant respectivement à la commande en cours, aux arrérages et aux jetons mis en arrérages), Ti_w^n pour les transports arrivant à l'entreprise, I_w^n le niveau d'inventaire, Op_w^n les commandes passées à la période w , Oo_w^n les commandes passées à la période $w-1$, Oi_w^n les commandes qui arriveront à la période $w+1$, Θ_w^n les jetons détenus par l'entreprise, Θp_w^n les jetons émis à la période w , Θo_w^n les jetons émis à la période $w-1$ et Θi_w^n les jetons qui arriveront à la période $w+1$. Les conditions initiales sont $Too_1^n = Tob_1^n = To\Theta_1^n = \Theta_1^n = \Theta p_1^n = \Theta o_1^n = \Theta i_1^n = 0$, $To_1^n = Ti_1^n = Op_1^n = Oo_1^n = Oi_1^n = 4$ et $I_1^n = 12$ pour chaque entreprise n où c'est applicable (par exemple, la forêt n'a pas d' Oi). Afin de mettre un retard de deux périodes dans la transmission de l'information et dans les transports, les variables de commande, de jetons et de transport sont dédoublées, ce qui explique la présence des paires Oo_w^n / Oi_w^n , $\Theta o_w^n / \Theta i_w^n$ et To_w^n / Ti_w^n . $Oi_w^{détailants}$ est la consommation du marché, soit $Oi_w^{détailants} = 4$ pour les périodes $w=1, 2, 3$ et 4 et $Oi_w^{détailants} = 8$ sinon, lorsque la consommation du Jeu du Bois Québécois est utilisée. Ensuite, les relations entre ces variables sont comme suit :

To_w^n représente les expéditions par l'entreprise n à ses clients lors de la période w . Afin de clarifier son calcul, elle est découpée en trois composantes (équation 1) : Too_w^n représente les items expédiés en premier afin de satisfaire la commande courante (ou les items que l'entreprise est capable d'expédier si l'inventaire et le transport arrivant à l'entreprise ne suffisent pas, voir équation 2), ensuite l'entreprise n envoie Tob_w^n produits pour réduire son *backorder* (équation 3) et enfin, si les commandes sont satisfaites et qu'il n'y a plus d'arrérages, $To\Theta_w^n$ produits sont expédiés pour réduire les jetons mis en arrérages (ces jetons correspondent à des produits dont le client a besoin : leur rôle est le même que celui des arrérages, voir équation 4) :

$$To_w^n = Too_w^n + Tob_w^n + To\Theta_w^n \quad (1)$$

$$Too_w^n = \begin{cases} Oi_w^n & \text{si } I_{w-1}^n \geq 0 \text{ et } I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n \geq Oi_w^n \\ I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n & \text{si } I_{w-1}^n \geq 0 \text{ et } I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n < Oi_w^n \\ Oi_w^n & \text{si } I_{w-1}^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n \geq Oi_w^n \\ Ti_{w-1}^n & \text{si } I_{w-1}^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n < Oi_w^n \end{cases} \quad (2)$$

$$Tob_w^n = \begin{cases} 0 & \text{si } I_{w-1}^n \geq 0 \\ 0 & \text{si } I_{w-1}^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n = 0 \\ -I_{w-1}^n & \text{si } I_{w-1}^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n = -I_{w-1}^n \\ Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n & \text{si } I_{w-1}^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_{w-1}^n \neq -I_{w-1}^n \end{cases} \quad (3)$$

$$To\Theta_w^n = \begin{cases} 0 & \text{si } \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n = 0 \\ \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n & \text{si } \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } I_w^n \geq 0 \text{ et } I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n - Too_w^n \geq \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \\ I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n - Too_w^n & \text{si } \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } I_w^n \geq 0 \text{ et } I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n - Too_w^n < \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \\ \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n & \text{si } \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } I_w^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_w^n \geq \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \\ Ti_{w-1}^n - Too_w^n & \text{si } \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \neq 0 \text{ et } I_w^n < 0 \text{ et } Ti_{w-1}^n - Too_w^n < \Theta_i^n + \Theta_{w-1}^n \end{cases} \quad (4)$$

La variable de retard représentant les produits arrivants à l'entreprise n à la période w est remplie par les produits expédiés la période précédente par le fournisseur $n+1$:

$$Ti_w^n = To_{w-1}^{n+1} \quad (5)$$

Le niveau courant de l'inventaire est le niveau d'inventaire précédent plus les entrées de produits moins les sorties :

$$I_w^n = I_{w-1}^n + Ti_{w-1}^n - To_w^n - (O_i^n - Too_w^n) + Tob_w^n \quad (6)$$

Les jetons sont similaires à un inventaire négatif (i.e. à un arréage) car ils correspondent aussi à des produits à expédier (l'équation 7 n'a pas besoin d'être modifiée lorsque les jetons ne sont pas utilisés) :

$$\Theta_w^n = \Theta_{w-1}^n + \Theta_i^n - To\Theta_w^n \quad (7)$$

Dans les expériences A et C, les jetons ne sont pas utilisés : $\Theta_p^n = 0$. Dans les expériences B et D, nous avons choisis empiriquement que les entreprises émettent une quantité de jetons correspondant au double de la variation des commandes qui arrivent, soit $2*(O_i^n - O_{i_{w-1}}^n)$. Les équations 8 et 9 sont définies ensemble : si les jetons ne sont pas utilisés, l'équation 9 doit aussi être modifiée.

$$\Theta_p^n = \begin{cases} 0 & \text{(Expériences A et C)} \\ \Theta_i^n - 2*(O_i^n - O_{i_{w-1}}^n) & \text{(Expériences B et D)} \end{cases} \quad (8)$$

L'équation 9 implémente la politique de commande utilisée ; nous avons utilisé quatre politiques A, B, C et D qui sont décrites dans la section 4. Ce ne sont que des exemple, bien d'autres politiques de commande peuvent être mises ici.

$$Op_w^n = \begin{cases} 0 & \text{si } O_i^n + I_{w-1}^n - I_w^n \leq 0 & \text{(Expérience A)} \\ O_i^n + I_{w-1}^n - I_w^n & \text{sinon} & \text{(Expérience A)} \\ O_i^n & & \text{(Expérience B)} \\ 0 & \text{si } O_i^{détailant} + I_{w-1}^n - I_w^n \leq 0 & \text{(Expérience C)} \\ O_i^{détailant} + I_{w-1}^n - I_w^n & \text{sinon} & \text{(Expérience C)} \\ O_i^{détailant} & & \text{(Expérience D)} \end{cases} \quad (9)$$

La commande passée la période précédente est copiée dans les commandes émises :

$$Oo_w^n = Op_{w-1}^n \quad (10)$$

De même pour les jetons expédiés la période précédente :

$$\Theta_o_w^n = \Theta_p_{w-1}^n \quad (11)$$

La commande qui arrive à l'entreprise est celle qui a quitté le client à la période précédente :

$$O_i^n = Oo_{w-1}^{n-1} \quad (12)$$

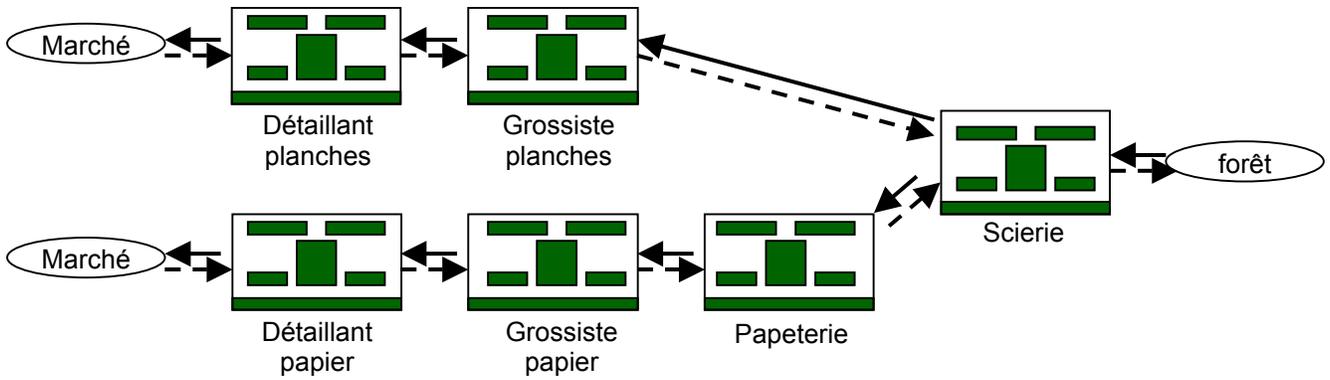


Figure 1. Modèle de chaîne logistique du Jeu du Bois Québécois

De même pour les jetons :

$$\Theta i_w^n = \Theta o_{w-1}^{n-1} \quad (13)$$

Toutes les entreprises sont implémentées de la même manière, exceptée la scierie qui a deux ensembles de variables Θi_w^n , Θp_w^n , I_w^n et To_w^n et à laquelle on ajoute des variables additionnelles pour faire l'interface entre ces deux ensembles de variables et les variables de son fournisseur (forêt). C'est-à-dire que nous faisons comme s'il y avait deux scieries (une pour le papier, l'autre pour les planches) qui partagent Ti_w^n , puis nous agrégeons les commandes $Op_w^{scierie_papier}$ et $Op_w^{scierie_planches}$ qu'elles auraient passées (dans notre validation, nous avons choisi de façon heuristique $Op_w^{scierie} = \text{Max}\{Op_w^{scierie_papier}, Op_w^{scierie_planches}\}$, ce qui est un mauvais choix pour les inventaires, car ils se restabilisent à un niveau trop élevés) et chaque partie de la scierie reçoit les produits arrivant du fournisseur (car une unité de bois provenant de la forêt donne une unité de papier et une unité de planches).

4. Validation expérimentale

Comme nous l'avons déjà dit, l'effet coup de fouet est du en partie aux dynamiques de la chaîne logistique. Le jeu de distribution de la bière (*Beer Game*) est un jeu éducatif conçu pour enseigner les dynamiques d'une chaîne logistique en se basant sur un modèle très simplifié de chaîne logistique. Ce jeu a été adapté aux spécificités de l'industrie forestière québécoise (une province canadienne). Pour illustrer ce mécanisme, nous considérons l'exemple suivant sur une chaîne logistique inspirée du jeu de la bière. Le Jeu du Bois Québécois se joue comme le *Beer Game*, sauf qu'il y a plus de participants. Notre modèle de chaîne logistique est adapté aux spécificités de l'industrie forestière québécoise. En particulier, son flux de produits est divergent, c'est-à-dire que le complexe de sciage achète du bois d'une unique forêt puis qu'elle vend des copeaux à la papeterie (son papier est ensuite vendu à un grossiste Wp puis à un détaillant Rp) et des planches à un grossiste Wl (qui revend ensuite ces planches à un détaillant Rl). Nous considérons qu'il n'y a aucune activité de transformation de la matière, que les seuls coûts sont ceux de stockage et d'arrimage et qu'il n'y a aucune limite de capacité. La chaîne logistique part d'un état stable, c'est à dire d'un état où les commandes passées et les quantités commandées et transportées sont toutes égales d'une période à l'autre. La figure 1 présente le modèle de chaîne logistique utilisé dans le Jeu du Bois Québécois et que nous avons utilisé pour implémenter le modèle précédent. Plus précisément, chacun des six joueurs du jeu est représenté dans le tableur par un jeu des treize équations précédentes. Tous nos résultats sont obtenus avec des simulations de cinquante périodes.

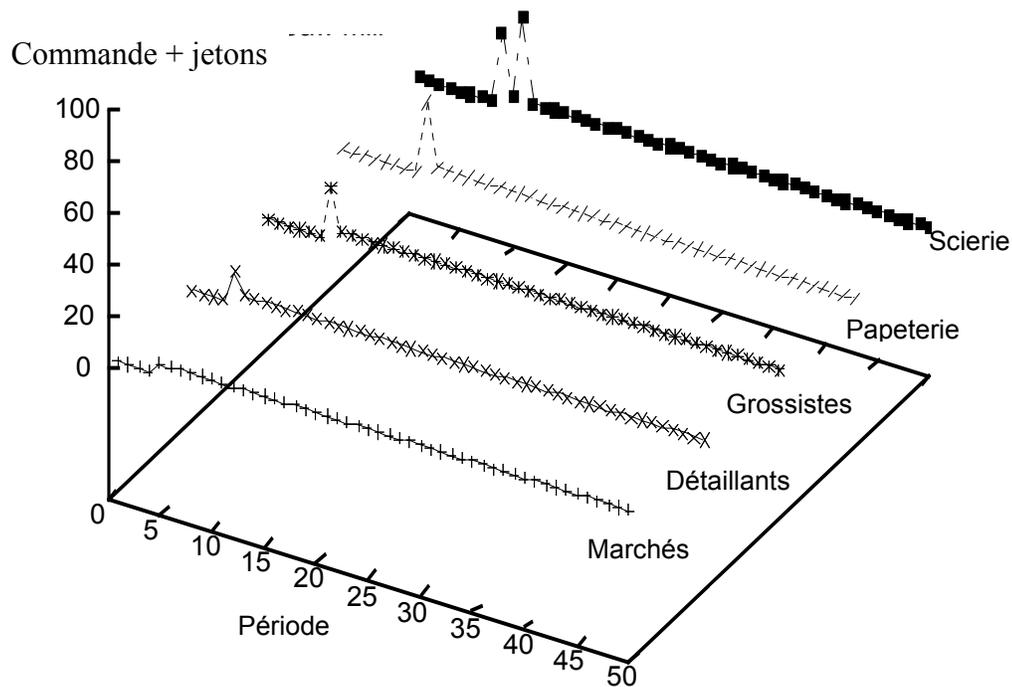


Figure 2. Commandes passées avec la règle B lorsque le marché consomme comme dans le Jeu du Bois Québécois.

Les expérimentations menées sur cette adaptation du Jeu du Bois pour valider notre mécanisme sont les suivantes. Comme nous venons de le dire, la partie « mécanique » du jeu (transferts physiques et d'information à chaque période de jeu) ainsi que la règle de passage de commande sont la mise bout à bout d'implémentations du modèle précédent dans un tableur ; cette règle de passage de commande (A, B, C ou D) est la même pour toutes les entreprises de la chaîne logistique. Ces quatre règles sont les suivantes :

- A. les entreprises commandent ce que leur client leur commande moins la variation de leur inventaire : les entreprises essaient juste de garder un inventaire constant. En fait, les stocks vont croître au cours du temps car on interdit les commandes négatives, ce qui fait que des sur-commandes ne sont jamais compensées par des sous-commandes négatives (i.e. des annulations de commandes).
- B. les entreprises commandent ce que le client leur commande (commandes un-pour-un) et émettent des jetons pour reconstituer leur inventaire si la demande fluctue : c'est le fonctionnement de base du système tel que nous l'avons présenté précédemment.
- C. les entreprises commandent ce que le marché consomme moins la variation de leur inventaire : c'est la même règle que la première règle, sauf que l'on suppose ici que les entreprises connaissent en temps réel la demande du marché (i.e. centralisation de l'information).
- D. les entreprises commandent ce que le marché leur commande et émettent des jetons pour reconstituer leur inventaire si la demande fluctue : c'est la même règle que la B, sauf que l'on suppose qu'il y a une centralisation de l'information (comme dans C).

Nous comparons ces quatre manières de commander expérimentalement en les confrontant aux neuf types de consommation du marché suivants (les chiffres donnés représentent le nombre d'unités consommées par chacun des deux marchés à chaque période ; par exemple, pour la demande à la *Beer Game*, 4 unités de papier et 4 unités de planches sont consommées pendant les

Consommation du marché		Règle A (sans jetons, sans centralisation de l'information)	Règle B (avec jetons, sans centralisation de l'information)	Règle C (sans jetons, avec centralisation de l'information)	Règle D (avec jetons, avec centralisation de l'information)
1	Jeu du Bois Québécois	4912	1632	1496	1612
2	Jeu du Bois Québécois inv.	4384	3324	2924	2280
3	Dirac	2936	2148	1800	1936
4	Dirac inversé	3064	2484	1912	1756
5	Croissance	5090	3748	5524	1552
6	Décroissance	5352	4728	4123	3252
7	Saisonnalité faible	2016	2182	1702	1694
8	Saisonnalité moyenne	2780	2069	1969	1662
9	Saisonnalité forte	3224	1768	1869	1597

Figure 4. Résultats expérimentaux avec quatre politiques de commande et neuf types de consommation du marché

avons introduit le premier pour présenter ce qui se passe en théorie, mais ici la chaîne logistique passe directement dans l'état stable final. Si l'on suppose comme dans le *Beer Game* qu'une unité en inventaire coûte 1\$ par période et une unité en arrérage coûte 2\$ par période, alors cette façon de commander coûte 1632\$. Le tableau de la figure 2 présente les coûts totaux pour les quatre politiques de commande et pour les neuf types de consommation du marché précédents. Pour chaque type de commande, nous avons grisé la façon de commander ayant les coûts les plus faibles. On constate que la centralisation de l'information donne toujours d'excellents résultats, mais que l'on peut très souvent les améliorer en utilisant en plus les jetons.

5. Conclusion

Les résultats de ce papier sont (i) la mise en évidence d'une nouvelle cause de l'effet coup de fouet, à savoir que les retards sur les flux physiques et informationnels obligent à sur- ou sous-commander afin de stabiliser les inventaires, (ii) la proposition d'un mécanisme permettant d'atténuer cet effet, (iii) la modélisation d'une entreprise du jeu de la bière (*Beer Game*) que l'on peut facilement modifier afin de pouvoir comparer diverses politiques de commandes, (iv) l'implémentation dans un tableur de ce modèle d'entreprise afin de former une chaîne logistique inspirée de l'industrie forestière québécoise (ce modèle est celui utilisé dans le Jeu du Bois Québécois) et (v) la validation grâce à cette implémentation de l'efficacité du mécanisme proposé pour réduire l'effet coup de fouet. En particulier, cette validation permet de visualiser les quatre états par lesquels passent une chaîne logistique mettant en œuvre la politique de passage de commandes basées sur le partage de l'information que nous proposons : état initial, réponse de la chaîne logistique à la perturbation du marché, état stable intermédiaire et état stable final.

En résumé, ce papier illustre que les commandes un-pour-un éliminent l'effet coup de fouet, mais qu'elles sont inapplicables du fait de la grande fluctuation des inventaires qu'elles induisent, et cela alors même que nous n'avons considéré qu'un cas très simple de chaîne logistique. C'est la raison pour laquelle nous proposons de séparer en pratique la quantité dont ont besoin les entre-

prises pour répondre à la demande du marché (i.e. la « commande ») de la quantité dont elles ont besoin par rapport aux besoins propres à la chaîne logistique (i.e. le « jeton », qui peut par exemple représenter ce qu'une loi (s, S) dit de commander), ce qui permet aux entreprises de restaurer leurs commandes sur la consommation du marché juste après une quelconque perturbation causée par le marché ou par les entreprises de la chaîne logistique. Cela montre donc quelle information doit être partagée (la consommation du marché qui est transmise dans « commande ») et comment s'en servir (l'information transmise dans « jetons » peut être ignorée puisqu'elle n'est là que lors d'une perturbation). En outre, comme les entreprises vont demander la quantité « commande » quoiqu'il arrive (elles en ont besoin pour satisfaire la consommation du marché), alors on peut interpréter le « jeton » comme l'effet coup de fouet. En effet, on a vu que si la consommation du marché est constante excepté lors d'un unique doublement (cf. demande à la *Beer Game* et les figures 1 et 2), c'est dans « jetons » que les entreprises peuvent s'écarter de la consommation du marché et donc amplifier ce doublement : si les entreprises ne demandaient que « commande » (donc avec des commandes un-pour-un), il n'y aurait pas d'effet coup de fouet mais des fluctuations des inventaires partout dans la chaîne logistique. En ajoutant des « jetons », les entreprises peuvent s'écarter de cet idéal quant à l'effet coup de fouet en annonçant à leur(s) fournisseur(s) ce qu'elles font, ce qui permet à ces fournisseurs de ne pas tenir compte des jetons quand ils font des prévisions. Les « jetons » représentent donc l'effet coup de fouet.

6. Bibliographie

Fjeld, D. E. (2001). The wood supply game as an educational application for simulating dynamics in the forest sector. In : *Supply Chain Management for Paper and Timber Industries* (K. Sjöström et L.-O. Rask, ed.), pp. 241-251.

Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics – A major breakthrough for decision-makers. *Harvard Business Review*.

Haartveit, E. Y. et D. E. Fjeld (2002). Experimenting with industrial dynamics in the forest sector – A beer game application. In : *Symposium on Systems and Models in Forestry*, Chile.

Lee, H. L., V. Padmanabhan et S. Whang (1997a). The bullwhip effect in supply chain. *Sloan Management Review*, pp. 93-102.

Lee, H. L., V. Padmanabhan et S. Whang (1997b). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, Vol. 43, Num.4, pp. 546-558.

Moyaux T., B. Chaib-draa et S. D'Amours (2003). Multi-agent coordination based on tokens: Reduction of the bullwhip effect in a forest supply chain. In : *Proc. 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS)*, Melbourne (Australie).

Simchi-Levi, D., P. Kaminsky et E. Simchi-Levi (2000), *Designing and Managing the Supply Chain*. Mc Graw-Hill Higher Education.

Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, Vol. 35, Num. 3, pp.321-339.