

ÉVALUATION COMPARATIVE DE POLITIQUES D'APPROVISIONNEMENT LOCALES ET PAR NEGOCIATION DANS DES RESEAUX D'ENTREPRISES

Jean-Claude HENNET, Fouzia OUNNAR

LSIS, Université Paul Cézanne, Faculté de Saint Jérôme
Avenue Escadrille Normandie Niémen ,13397 Marseille
Cedex 20

E-mail: jean-claude.hennet (fouzia.ounnar)@lsis.org

Nadine ZBIB

Université de Valenciennes (UVHC)
Le mont Houy

59313 Valenciennes cedex 09

Nadine.Zbib@univ-valenciennes.fr

RESUME : *Le caractère décentralisé de la prise de décisions dans les réseaux d'entreprises nécessite de nouvelles modalités de coordination, en particulier des mécanismes de négociation. Pour évaluer les performances de ces mécanismes, il est nécessaire de prendre en compte le caractère nécessairement imparfait des informations disponibles au niveau local. C'est pourquoi les mécanismes de négociation proposés dans ce travail sont comparés à des politiques de pilotage purement locales, pour le problème de choix dynamique des fournisseurs. La première politique est une politique par tirage aléatoire dit "de Bernoulli", fondée sur une connaissance a priori de l'efficacité des fournisseurs. La seconde politique repose sur l'évaluation adaptative d'indices d'allocation dynamique. Le caractère assez rudimentaire de ces politiques n'autorisant pas une comparaison multicritères, l'évaluation ne porte que sur un critère temporel, comme la somme des dates de livraison ou le "makespan". Sur la base de ces indices de performance, la simulation des politiques locales et du mécanisme de négociation proposé montre une supériorité de ce dernier de l'ordre de vingt pour cent.*

MOTS-CLES : *Chaînes logistiques, négociation, optimisation, évaluation de performance, simulation distribuée.*

INTRODUCTION

Depuis quelques années, les relations entre clients et fournisseurs ont fortement évolué dans le but d'obtenir une meilleure gestion interne de chaque partenaire et une meilleure performance globale en réponse aux clients. En effet une nouvelle approche des relations entre entreprises, qualifiée de « partenariat industriel » est apparue. La plupart des recherches menées jusqu'à aujourd'hui sur le pilotage des relations Clients/Fournisseurs, se sont plutôt intéressées aux entreprises faisant partie d'une chaîne logistique intégrée ou s'inscrivant dans une forme de coopération verticale. La question qui se pose maintenant concerne le devenir du pilotage des relations Clients/Fournisseurs au niveau d'un réseau logistique.

Les réseaux logistiques actuels sont souvent construits à partir d'un ensemble de chaînes logistiques figées, au sens où chaque client a ses propres fournisseurs auprès desquels il lance ses commandes d'une façon régulière et répétitive. De même, les fournisseurs connaissent à l'avance des quantités que leurs clients vont commander. Autrement dit, la relation Clients/Fournisseurs est définie selon un contrat commercial avec des engagements figés des deux cotés (Clients ou fournisseurs) sur des volumes et/ou des périodes. D'autres types de contrats ont récemment été proposés, comme dans (Cachon et Larivière, 2001), (Ounnar et

Pujo, 2001) pour conférer au réseau logistique davantage de flexibilité et de réactivité.

L'étude concerne un modèle de réseau d'entreprises qui fonctionne comme une chaîne logistique, c'est-à-dire que les entreprises collaborent pour fabriquer des produits finis à partir de matières premières. Le but du travail est de comparer plusieurs politiques de pilotage du réseau. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'étage aval de la chaîne logistique, constitué d'un détaillant et de ses fournisseurs. Aujourd'hui, au lieu de se contenter de « pousser » les produits vers leur distributeur habituel, les entreprises de la chaîne logistique sont dépendantes du client final, qui détermine ce qui sera acheté et, par conséquent, ce que le système doit produire et amener jusqu'à lui.

Le détaillant dispose d'un stock de produits finis et il gère ce stock par la politique du stock de référence (base-stock policy), qui revient à commander aux fournisseurs les quantités nécessaires à la reconstitution du stock. La séquence de commandes du détaillant aux fournisseurs est donc identique à la séquence obtenue en production à la commande. Les commandes arrivent de façon aléatoire à taux moyen d'arrivées constant. Chaque commande peut être répercutée vers l'un quelconque des N fournisseurs. Nous supposons que chaque fournisseur produit à la commande. Les temps de traitement des commandes chez les fournisseurs dépendent de leur état de charge courant. La valeur moyenne du taux de production est supposée constante pour chaque

fournisseur. Cette valeur n'est pas connue avec précision par le détaillant. Dans la méthode dite "de Bernoulli", cette valeur est estimée a priori, tandis que dans la méthode dite "de Gittins", les durées de traitement sont estimées par un algorithme adaptatif.

Dans le cas de la politique d'approvisionnement par négociation, nous nous intéressons au développement d'un système de pilotage auto-organisé de réseaux de partenariat d'entreprises basé sur une architecture de pilotage décentralisé. La notion d'auto-organisation est subordonnée d'une part à l'utilisation d'une structure de décision décentralisée, et d'autre part à la prise en compte locale de l'état et du comportement propre de chaque entreprise partenaire.

On cherche ainsi à comparer plusieurs politiques d'approvisionnement : deux par affectation des commandes aux fournisseurs en fonction de leurs performances moyennes, évaluées sans puis avec mise à jour, une autre par négociation entre les fournisseurs en fonction de leur état de charge courant. Pour rendre cette comparaison possible, l'étude est restreinte à un seul critère temporel, qui peut être la somme des dates de livraison, ou bien le "makespan", qui est la date de fin d'exécution de la séquence de commandes. D'autres critères, liés en particulier à la qualité et à la fiabilité des approvisionnements, auraient pu être considérés dans la méthode par négociation, mais il est difficile d'envisager leur prise en compte dans les deux autres méthodes.

Ce travail comprend quatre parties. La première partie décrit ce qu'est une chaîne logistique et de quelle manière elle contribue à mettre les produits et les services sur les marchés. Elle aborde également la question de la construction d'un réseau logistique articulé autour du concept de partenariat. La deuxième partie décrit des politiques d'approvisionnement locales dont l'objectif est pour le détaillant de rechercher la meilleure réponse à des commandes client arrivant en séquence. La troisième partie décrit plusieurs procédures de sélection par négociation, et retient la procédure de négociation entre fournisseurs par auto-organisation, proposée dans (Ounnar et Pujo, 2001). Dans la quatrième partie, ces politiques sont évaluées sur un jeu de données compatible avec les trois politiques. La maquette de simulation utilisée (Ounnar et al., 2006) s'appuie sur la mise en place d'un protocole d'interaction déployé dans un environnement de simulation distribué : HLA (High Level Architecture). Cette simulation permet la vérification de l'influence des différents acteurs du réseau de partenariat sur la performance de tout le réseau.

En raison du caractère monocritère des méthodes locales de sélection des fournisseurs, la comparaison effectuée ici est monocritère, malgré les capacités de sélection multicritères de la méthode par auto-organisation. En particulier, les trois politiques d'affectation des commandes sont comparées du point de vue de leurs performances temporelles, avec comme information complémentaire la charge de travail induite chez les différents fournisseurs.

1. GESTION DES CHAINES LOGISTIQUES

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 très concurrentiel font qu'il est impératif pour les entreprises non seulement de tirer parti de toutes les sources possibles d'approvisionnement et de sous-traitance, mais aussi de redéfinir et rationaliser le fonctionnement des chaînes logistiques, pour pouvoir mettre en place un réseau totalement efficace, depuis l'achat des matières jusqu'au consommateur (Poirier et Reiter, 2001).

1.1 Radiographie d'une chaîne logistique

Une chaîne logistique est le système grâce auquel les entreprises amènent leurs produits et leurs services jusqu'à leurs clients. Sa définition la plus courante est « un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'information dans les deux sens » (Ganeshan et al., 1999).



Figure 1. Flux parcourant une chaîne logistique

Dans une chaîne logistique, tous les groupes d'entreprises entrent en relation pour acheter, produire et distribuer des biens et des services aux consommateurs. Il peut aussi se révéler nécessaire d'introduire dans le réseau de nouveaux produits ou services pour anticiper et répondre aux attentes des marchés. Les facteurs qui jouent un rôle déterminant dans l'optimisation de la chaîne logistique sont la mise en place d'un flux d'informations circulant facilement et rapidement entre les membres du réseau, ainsi qu'une bonne transition entre les générations de produits pour toujours maintenir au plus haut les niveaux de satisfaction des clients finaux.

1.2 Contexte de l'étude

Le concept de « chaîne logistique » est maintenant largement utilisé dans l'industrie. Des logiciels du type Supply Chain Management (SCM) sont récemment apparus sur le marché. Ils permettent de modéliser une chaîne logistique intégrée (plusieurs ateliers dans plusieurs usines en considérant les processus d'achat, de fabrication et de livraison) et d'aider à prendre des décisions quant à sa configuration et sa gestion. Leur mise en œuvre nécessite un grand nombre de données (similaires à celles des ERP) et est donc relativement lourde. Par contre, ils ne sont pas vraiment destinés à permettre de

modéliser de façon approfondie les relations entre plusieurs entreprises. De ce fait, la notion de chaîne logistique est parfois utilisée en limitant son domaine à l'intérieur d'une entreprise, nous parlerons dans ce cas de « chaîne logistique intégrée » pour réserver le nom de chaîne logistique aux chaînes qui font intervenir plusieurs entreprises ayant des mécanismes de décision autonomes. Chaque entreprise peut évaluer statistiquement les performances des autres entreprises. Mais l'état de chaque entreprise, c'est à dire en particulier l'état de ses ressources (machines, équipes de travail, finances, etc.) et de son carnet de commandes, n'est connu que d'elle-même. Dans ce cadre d'hypothèses, la partie suivante va décrire différentes politiques de choix des fournisseurs dans le cas d'une prise de décision à l'arrivée de chaque commande client.

2 POLITIQUES LOCALES DE CHOIX DES FOURNISSEURS

Au sein d'une chaîne logistique, un détaillant peut être amené, pour un produit donné, à choisir entre deux stratégies : s'approvisionner auprès d'un seul ou de plusieurs fournisseurs. La première est souvent adoptée par tradition et pour simplifier les contrats et les flux. Dans la deuxième stratégie, le détaillant peut faire face à un ensemble de fournisseurs qui sont capables de satisfaire pleinement ses besoins en termes de quantité, qualité, délai, etc. Le problème qui se pose dans ce cas concerne le choix du meilleur fournisseur en se basant sur un ensemble de critères (coût, qualité, délai, etc.). Dans cette étude nous nous intéressons au deuxième type de stratégie, pour cela, nous présentons dans la section suivante différentes politiques d'approvisionnement mono-produit dans le cadre du choix dynamique de fournisseur.

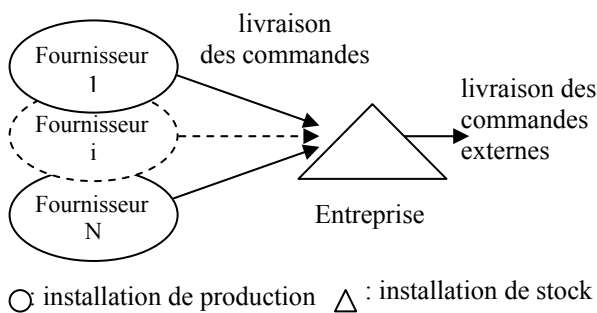


Figure 2. Représentation du problème dans le cas de N fournisseurs

En pratique, le processus de choix de fournisseur doit être multicritère. Parmi les critères les plus importants figurent la qualité du produit, la fiabilité de livraison, la disponibilité du produit, le coût, le délai, la capacité technique du fournisseur, le service après vente, la situation financière, la localisation géographique du fournisseur, etc. Pour l'évaluation des fournisseurs, de nombreuses méthodes prenant en compte ces critères peuvent être appliquées, telles que les méthodes catégoriques, les

méthodes de pondération, les méthodes d'aide à la décision multicritères (Mekouche, 2007).

Dans ce contexte, différentes politiques peuvent être envisagées pour assister le détaillant dans chacune de ses décisions de choix du fournisseur, telles que des politiques qui s'appuient sur un calcul d'indice basé sur des historiques et des statistiques. La méthode évaluée dans cet article utilise la négociation entre les fournisseurs pour qu'ils choisissent eux-mêmes le meilleur d'entre eux.

Comme il a été montré dans (Ounnar et Pujo, 2005), la négociation entre fournisseurs peut être aisément combinée avec des techniques d'analyse multicritères comme AHP. Il n'en est pas de même pour les méthodes basées sur les calculs d'indices de performance. Celles-ci sont généralement limitées aux critères temporels à minimiser, tels que la somme des dates de livraison des commandes, le "makespan", le retard maximum, la somme pondérée des retards, etc. Cette limitation est principalement due à l'absence de modèle permettant une prédiction fiable par le détaillant des performances des fournisseurs relativement à des critères de qualité. En effet, ces performances dépendent principalement de l'état et des paramètres internes des entreprises, qui ne sont pas, généralement, accessibles aux autres entreprises.

Si la supériorité des politiques par négociation est donc établie dans un cadre multicritères privilégiant la qualité et la fiabilité, la comparaison de ces politiques vis à vis des politiques par calcul d'indice reste à montrer pour les critères temporels classiques. A cette fin, nous avons construit un modèle académique du système à 1 détaillant et N fournisseurs pour lequel les calculs d'indices de performance temporelle puissent être rigoureux, et nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux types de politiques.

On considère une séquence d'arrivée de n commandes de clients. Le critère temporel à minimiser est la somme des dates de livraison des commandes. Soit, pour la k ème commande ($k \in \{1, n\}$), sa date d'arrivée, notée t_k et le fournisseur choisi, noté $i(k)$. En notant $d(k, j)$ la durée opératoire (aléatoire) du fournisseur j permettant de satisfaire (en composant du produit final) la commande k , le critère d'espérance mathématique de la somme des dates de livraison s'écrit :

$$Y = E \left[\sum_{i(k)} [t_k + d(k, i(k))] \right]. \quad (1)$$

En supposant la politique $i(k)$ indépendante des dates d'arrivée t_k , tant que ces dates respectent la séquence d'arrivée, un critère équivalent à minimiser est l'espérance de la somme des durées d'exécution :

$$J = E \left[\sum_{i(k)} d(k, i(k)) \right]. \quad (2)$$

Pour une séquence finie de commandes, on peut aussi chercher à minimiser l'espérance mathématique du "makespan" ou plus grande date de livraison :

$$M = E \left[\max_k [t_k + d(k, i(k))] \right]. \quad (3)$$

2.1 Règle de Bernoulli

(Arda et Hennet, 2006) ont présenté un modèle de gestion de stock d'une entreprise ayant une demande externe et aléatoire d'un produit. Pour le réapprovisionnement de ce stock, l'entreprise peut lancer des commandes chez plusieurs fournisseurs extérieurs qui exécutent les ordres de fabrication avec des durées opératoires aléatoires. En supposant connues les lois de probabilité de ces durées opératoires, l'analyse du régime permanent du système permet d'optimiser les probabilités d'affectation des commandes à chaque fournisseur. Les probabilités optimales peuvent ensuite être implémentées comme paramètres de Bernoulli, c'est à dire par tirage aléatoire des fournisseurs selon ces probabilités.

Dans cette étude, toutes les commandes sont supposées identiques. Elles arrivent chez le détaillant selon un processus de Poisson ayant le taux $\lambda > 0$. Chaque fournisseur fabrique un produit dans une durée suivant une loi probabiliste exponentielle en traitant les commandes selon l'ordre FIFO. Soit μ_i le taux de distribution exponentielle du temps de service pour le fournisseur $i = 1, \dots, N$. L'espérance mathématique de la durée opératoire moyenne du fournisseur choisi pour la commande k est donc :

$$E [d(k, i(k))] = \frac{1}{\mu_{i(k)}} \quad (4)$$

La politique de gestion de stock utilisée par le détaillant est du type "base stock" (ou stock de référence) portant sur la position de stock. Par définition, la position de stock est définie par:

Position de stock = stock possédé + commandes attendues – les arriérés de livraison.

A chaque arrivée d'une commande unitaire, la position de stock est maintenue à sa valeur de référence par lancement d'une commande unitaire à l'un des fournisseurs. La commande d'une unité est affectée au fournisseur i

avec la probabilité α_i où $0 \leq \alpha_i \leq 1$ et $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$.

Une condition nécessaire de stabilité du réseau de files d'attente est:

$$\lambda < \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (5)$$

Cette condition est supposée vérifiée. En choisissant comme critère à minimiser le critère J formulé plus haut (2) ou, de façon équivalente, l'espérance mathématique de la durée moyenne des commandes en attente chez les fournisseurs, la solution optimale du problème est obtenue par le mécanisme suivant (Arda et Hennet, 2006).

Dans un premier temps, le détaillant classe les fournisseurs par ordre décroissant de leur taux de service $\mu_1 > \mu_2 > \dots > \mu_N$, puis il calcule la valeur maximale,

pour $m=1, \dots, N$ de $\tau_m = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j - \lambda}{\sum_{j=1}^m \sqrt{\mu_j}}$ Soit m^* l'indice

pour lequel ce maximum est atteint. (Arda et Hennet, 2006) ont montré que la solution optimale du problème est obtenue pour les paramètres suivants:

$$\alpha_i^* = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} (\mu_i - \tau_{m^*} \sqrt{\mu_i}) & \text{pour } i = 1, \dots, m^* \\ 0 & \text{pour } i = m^* + 1, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

Pour appliquer la règle de Bernoulli, il suffit de procéder à un tirage aléatoire uniforme entre 0 et 1 à chaque arrivée d'une commande. Soit x la valeur de cette variable aléatoire. La commande est affectée au fournisseur k tel que:

$$\sum_{i=0}^{k-1} \alpha_i^* < x \leq \sum_{i=0}^k \alpha_i^* \quad (7)$$

avec par convention $\alpha_0^* = 0$.

2.2 Indices d'allocation dynamique

D'une façon classique, certains processus d'allocation dynamiques de tâches dans un réseau multi-ressources (ou multi-processeurs) peuvent être modélisés comme des problèmes de commande stochastiques connus sous le nom de "problèmes de bandits". Ces problèmes sont caractérisés par la sélection à chaque instant de décision, d'un des processus stochastiques possibles. Ces processus sont supposés indépendants et n'évoluent que lorsqu'ils sont sélectionnés. Depuis les travaux de (Gittins et Jones, 1972), il est bien connu que les problèmes de bandits sont résolus à chaque instant de décision par sélection du processus (la ressource de production ou le processeur informatique) de plus fort indice d'allocation dynamique (ou indice de Gittins). Différentes classes de problèmes admettent ce type de solution et des règles d'indice ont aussi été conçues et appliquées de façon approximative ou heuristique (voir par exemple (Hongler et Dusonchet, 2003) (Glazebrook et al., 2007)).

Dans cette étude, l'état de chaque processus, noté $x_j(t)$, correspond au planning de travail de chaque fournisseur j ; $j \in \{1, N\}$, ou plus précisément à la date de livraison de la dernière commande. Les dates de prise de décision sont les dates d'arrivée. $\{t_k\}$ des commandes. La règle d'évolution des variables d'état est la suivante, pour $t_k < t \leq t_{k+1}$, $k \in \{0, n-1\}$:

$$\begin{cases} x_j(t) = x_j(t_k) + d(k, j) & \text{si } j = i(k) \\ x_j(t) = x_j(t_k) & \text{si } j \neq i(k) \end{cases} \quad (8)$$

Pour le critère d'optimisation Y (1), les indices d'allocation dynamique à la date d'arrivée t_k sont les états futurs estimés des processus s'ils sont choisis:

$$g_k(j) = \hat{x}_j(t_k) + \hat{d}(k, j) \quad (9)$$

La règle d'indice correspond alors à:

$$i(k) = \arg \min(g_k(j)) \quad (10)$$

et sous ce choix, la règle d'évolution (8) s'applique à nouveau et les indices $g_{k+1}(j)$ sont calculés par mise à jour des espérances des états de planning et des durées opératoires estimées. Les nouveaux états de planning $\hat{x}_j(t_{k+1})$ sont calculés en fonction des lancements et des arrivées des commandes fournisseurs. Dans le cas où toutes les commandes sont identiques, la durée opératoire du fournisseur j est estimée de façon récursive par une moyenne glissante de mémoire m . Soit une commande q , arrivant du fournisseur j à l'instant courant, après une durée opératoire $d(q, j)$. La durée opératoire moyenne de ce fournisseur est alors mise à jour par la formule:

$$\hat{d}_j^{new} = \frac{m-1}{m} \hat{d}_j^{old} + \frac{1}{m} d(q, j). \quad (11)$$

3. LES REGLES DE SELECTION PAR NEGOCIATION

La négociation est un mécanisme permettant de gérer les dépendances entre acteurs ou le processus par lequel un groupe d'acteurs arrive à une décision acceptable sur un sujet donné. La négociation est requise quand les acteurs doivent coopérer pour satisfaire un objectif commun. Chaque entreprise appartenant à la chaîne logistique est vue comme un centre de décision, capable de faire évoluer le système dans les limites de son domaine d'action. Dans un cadre coopératif, les décisions prises en interne dans chacun de ces centres doivent être concertées. (Peillon, 2001) considère l'accord de coopération comme étant le résultat de la combinaison de deux ou plusieurs entreprises légalement indépendantes, dont chacune est caractérisée par une histoire, une stratégie, et contraintes particulières. (Telle, 2003) définit la coopération comme une forme de relation qui correspond à la formalisation des processus d'échanges périodiques et / ou de traitements (par exemple les processus collectifs d'élaboration et d'intégration de prévision). Pour (Despontin, 2004) la notion de coopération est assimilée à une action de prise de décision collective distribuée en vue de synchroniser les actions réparties chez les différents partenaires d'une chaîne logistique.

Au sein de la coopération, les partenaires doivent coordonner leurs actions et leurs décisions. (Brun et Portioli-Staudacher, 2000) définissent la coordination comme étant le processus de gestion des inter-dépendances entre les activités. Pour (Pujo et Kieffer, 2002) la coordination vise à assurer un accord temporel entre des entités à l'occasion d'une même action nécessitant leur participation collective, mais devant maintenant s'inscrire sur toute la durée de l'action. (Despontin, 2004) lie la coordination à la coopération, elle considère que la coordination est l'un des aspects qui compose la coopération. Pour elle, la coordination vise à synchroniser les actions dans le temps en exploitant un référentiel temporel commun et à gérer la cohérence des actions individuelles par rapport à l'ensemble des activités.

Les techniques de négociation se basent sur des approches monocritère ou multicritères. Nous présentons ci-

dessous deux types de négociations : négociations producteur / fournisseurs, et négociations entre fournisseurs seuls.

3.1 Les protocoles de négociation détaillant-fournisseurs

(Monteiro et Ladet, 2001) ont proposé une formalisation de la coopération dans une entreprise, entre ses donneurs d'ordres et ses fournisseurs en se basant sur la négociation des délais de livraison. Dans un réseau d'entreprises, une entreprise est vue comme fournisseur vis-à-vis de ses donneurs d'ordres et comme donneur d'ordres vis-à-vis de ses propres fournisseurs. A la réception d'une demande initiale issue d'un donneur d'ordres, l'entreprise a le choix entre trois décisions. Ce choix s'effectue en fonction des contraintes induites par la nouvelle demande. L'entreprise :

- a peut accepter pleinement la demande en respectant l'intégralité des contraintes (Accord),
- b peut faire le choix de proposer des modifications sur les contraintes (Proposition),
- c peut refuser la demande provenant du donneur d'ordres (Refus).

Cette politique permet d'une part de propager les besoins réels de chacun des acteurs tout en tendant les flux par une politique de fabrication au plus tard.

Une autre étude décrite par Hennet et al. (2007) s'appuie sur la négociation comme outil de coordination efficace dans un système de production. Le but principal de ce travail est d'identifier les buts et de proposer des modalités d'action pour deux types d'agents impliqués dans l'étape d'exécution : agents ordre et agents ressource. La nature de ces buts crée une certaine concurrence : les agents ordre entrent en compétition pour l'usage des ressources, tandis que les agents ressource s'affrontent pour exécuter les ordres. Afin de construire des protocoles de négociation entre les agents impliqués dans des systèmes d'exécution de fabrication, les auteurs ont considéré un premier agent ordre et un certain nombre agents ressource concurrents pour exécuter l'ordre. Typiquement, c'est un cas où le protocole « Contract-net » s'applique (Smith, 1981). Dans un tel protocole, l'agent ordre agit en tant qu'initiateur, responsable d'obtenir son ordre traité de la façon la plus efficace. À cet effet, l'agent d'ordre envoie un appel d'offre à chaque agent ressource habilité à traiter l'ordre. Chaque agent ressource agit en tant que soumissionnaire potentiel en soumettant une proposition d'exécution à l'agent ordre.

Les mécanismes décrits ci-dessus ont été proposés dans le cadre d'une entreprise et peuvent être étendus pour être appliqués au niveau du choix des fournisseurs entre entreprises.

3.2 Négociations entre fournisseurs

(Ounnar et Pujo, 2001) ont proposé une nouvelle approche des relations entre entreprises où le partenariat se traduit par l'association en réseau des fournisseurs potentiels, à charge pour eux d'assurer collectivement la répar-

tition des ordres venant des différents clients en respectant les intérêts de chacun des partenaires.

Contrairement aux réseaux logistiques actuels où les chaînes sont figées, dans le réseau logistique auto-organisé proposé, une chaîne est construite à chaque fois qu'il y a une commande à réaliser. En effet, lorsque le client lance un Appel d'Offre, les fournisseurs potentiels rentrent en phase de négociation et le choix de la meilleure réponse se fait par émergence en fonction de l'état réel du fournisseur. Ce type de réseau est bâti sur le partenariat. Il s'agit en quelque sorte d'un réseau logistique optimisé au sens de (Poirier et Reiter, 2001). Le pilotage de la relation de partenariat concerne la totalité des actions développées ensemble pour atteindre des objectifs communs et réagir au bon moment à tout dysfonctionnement provenant d'un des partenaires. Elle nécessite donc une négociation entre les partenaires.

La négociation s'effectue selon un protocole inspiré de Contract-net. La réponse aux Appels d'Offres (AO) lancés par le client, vise à exploiter de la meilleure manière les capacités des fournisseurs (Ounnar et al., 2004). Afin que chacun des fournisseurs puisse participer à la négociation, nous avons associé à chacun des partenaires un centre de décision nommé Entité de Pilotage Autonome (EPA). Cette dernière lui permettra de s'auto-évaluer face à la réception des appels d'offres.

Dans cette approche, il n'y a plus d'organisation prévisionnelle. La solution finalement adoptée pour faire fonctionner l'ensemble de ces entités sera obtenue par émergence. En effet, en l'absence de hiérarchie, chaque entité participe d'une part à la proposition de solutions et d'autre part à l'évaluation de solutions. La proposition apparaissant comme la plus performante du point de vue de critères d'évaluation sera adoptée. L'auto-évaluation est basée sur un ensemble de critères qualitatifs et quantitatifs (coût, qualité, délai, etc.), par conséquent l'utilisation d'une méthode multicritères s'impose.

Cette politique augmente l'autonomie des entités du réseau. Quand un client lance un AO, les fournisseurs entament une étape de négociation afin de rechercher la meilleure réponse. Cette recherche du meilleur fournisseur est basée sur la négociation entre les centres de décision (EPA). Chaque EPA est composée de trois modules : le module interaction, le module optimisation et le module planning.

- Le module interaction permet d'assurer la distribution des ordres par la mise en concurrence de fournisseurs pouvant potentiellement répondre à un appel d'offre émis par un client, avec des règles et des critères impartiaux et communs.
- Le module optimisation permet au fournisseur de s'auto évaluer. Comme décrit dans (Mekaouche et al., 2005), l'évaluation de performance est basée sur la méthode multicritères AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1984).
- Le module planning permet de calculer la date de réalisation de l'appel d'offre par l'exécution d'une méthode analytique qui fait appel aux différents états du planning au niveau du système de production.

Lorsqu'un client envoie un appel d'offre (AO) sur le réseau, l'AO se trouve muni d'un certain nombre d'informations telles que: nom de l'entité émettrice, la quantité désirée par le client, le délai de fin de négociation, le délai de livraison, etc. Une fois l'AO reçu par une EPA donnée, son module interaction va vérifier la faisabilité de l'AO en terme de métier et procède ensuite à la transmission des caractéristiques de l'appel d'offre au module optimisation. Le module optimisation entame l'application de la méthode multicritères AHP dans le but d'obtenir un classement de tous les appels d'offre reçus, selon sa capacité à les traiter. L'application de cette méthode nécessite un ensemble de critères qui peuvent être de nature qualitative ou quantitative. Parmi les critères quantitatifs figure la notion de temps, qui se traduit par la date de réalisation de cet appel d'offre au niveau du système de production. Cette donnée dépend de l'état du planning de charge et la disponibilité des équipements. Le résultat est transmis au module optimisation pour qu'il puisse achever l'application de la méthode multicritères. Le module interaction compare alors cette performance à la meilleure réponse proposée sur le réseau concernant cet AO, puis l'envoie sur le réseau si elle est meilleure.

L'approche d'affectation des appels d'offres proposée a pour objectif d'obtenir un équilibre entre charge et capacité au niveau d'un fournisseur et d'arriver à un lissage de charges entre les différents fournisseurs avec un objectif à plus long terme de proposer un système équitable entre les fournisseurs du réseau. Elle permet en outre de mettre en œuvre un système d'évaluation des fournisseurs pertinent, cohérent pour pérenniser les relations clients - fournisseurs dans une dynamique partenariale. L'approche proposée permet l'affectation de l'appel d'offre prenant en compte plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs participant à l'augmentation de la productivité sur l'ensemble de la chaîne logistique du fournisseur au client.

4 COMPARAISON DE PERFORMANCES

4.1 Evaluation analytique et par simulation

Les politiques de sélection de fournisseur sous information incomplète, comme dans (Arda et Hennet, 2006) et (Azoulay-Schwartz et al., 2004), sont fondées sur des calculs numériques qui donnent une probabilité ou un indice exact et spécifique à chaque fournisseur. Selon ces valeurs, l'un des fournisseurs est sélectionné pour répondre à l'appel d'offre courant.

Parmi les politiques par négociation, l'approche retenue est celle de la négociation entre fournisseurs, proposée dans (Ounnar et Pujo, 2001).

En raison de la structure d'information du système, l'évaluation des politiques décrites ci-dessus nécessite un environnement de simulation distribuée. La maquette de simulation utilisée s'appuie sur la mise en place d'un protocole d'interaction déployé dans un environnement HLA (High Level Architecture).

Le terme « architecture » désigne ici les éléments fonctionnels principaux, les interfaces et les règles de conception applicables à toutes applications de simulation. Dans les textes de la norme HLA, il n'est jamais fait référence à l'utilisation de plates-formes de développement particulières (système d'exploitation, environnement de développement, protocole réseau, etc.). C'est en ce sens que la HLA peut être qualifiée de "haut niveau". Cela implique également que HLA en elle-même, n'apporte aucune infrastructure technique pour le développement de modèles et de simulations : une fois le choix de HLA fait, il appartient aux développeurs de choisir leur propre infrastructure en fonction de leurs objectifs et contraintes dans le respect du standard.

L'architecture HLA est caractérisée par les propriétés d'interopérabilité et de réutilisabilité. La réutilisation signifie que les modèles de composants de simulation peuvent être réutilisés dans différentes applications de simulation. Les composants de simulation réutilisables peuvent être combinés avec d'autres composants sans besoin de recodage. L'interopérabilité implique la capacité de combiner des composants de simulation sur des plateformes réparties de différents types, souvent avec des opérations en temps réel.

Ainsi, l'architecture HLA s'intéresse à la fois à l'interconnexion de plateformes de simulation et à des aspects de plus haut niveau tel que l'échange d'événements et la synchronisation. Contrairement à toutes les autres architectures (DIS (Distributed Interactive Simulation), ALSP (Aggregate Level Simulation Protocol), etc.), et en plus de sa caractérisation par les deux propriétés à savoir, l'interopérabilité et la réutilisabilité, l'architecture HLA assure la synchronisation entre les simulations, ce qui constitue son atout majeur notamment par rapport à l'architecture CORBA (Common Object Request Broker Architecture).

Une *fédération* HLA désigne un système de simulation distribué faisant intervenir un ensemble de simulations élémentaires, appelées fédérés, s'échangeant des informations.

Dans (Ounnar et al., 2006), un environnement de modélisation et de simulation compatible HLA a été conçu à partir du formalisme DEVS (Discret Event system Specification). Sous cet environnement, appelé DEVS/HLA le concept principal est celui de la modularité avec laquelle les différents composants de modèles sont couplés ensemble à travers des interfaces d'entrée/sorties, ce qui permet l'envoi de messages d'un fédéré à un autre en utilisant les interactions HLA. Outre le fait d'assurer cette communication, HLA soutient la mise à jour des attributs d'objets déclarés et DEVS/HLA facilite une telle mise à jour.

Pour simuler la politique de négociation entre fournisseurs, chaque EPA est modélisé sous le formalisme DEVS. La chaîne logistique est représentée comme une fédération, et les modèles des EPA sont les fédérés (Ounnar et al., 2006).

4.2 Elaboration d'un jeu de données

Soit un réseau constitué d'un détaillant et de 5 fournisseurs. Pour pouvoir comparer les performances des 3 politiques de choix des fournisseurs, une séquence d'appels d'offres de même type et de même quantité, est lancée par le détaillant. Cette séquence comporte 50 ordres de fabrication (OF) de 3000 produits, lancés à des dates aléatoires, avec un taux de lancement $\lambda = 1$ (1 lot de 3000 produits par 3000 unités de temps). Le tableau 1 ci-dessous représente les caractéristiques des fournisseurs.

<i>Entreprises</i>	<i>50 OF de 3000</i>	<i>Durée d'exécution unitaire</i>	<i>Charge initiale</i>
Fournisseur 1		2	460
Fournisseur 2		5	220
Fournisseur 3		3	325
Fournisseur 4		4	465
Fournisseur 5		3	500

Tableau 1 : Données sur l'AO et les fournisseurs

4.3 Comparaison des politiques de pilotage

a) Méthode de Bernoulli

L'application de la règle de Bernoulli passe par le calcul des paramètres τ_m selon la formule présentée à la section 2.1, par la détermination de la valeur d'indice m^* pour laquelle cette quantité est maximale, puis par le calcul des paramètres optimaux α_i^* par la formule (6). Il est intéressant de noter que pour le cas de lots de 3000 unités pris en exemple, le calcul peut se faire de façon équivalente sur les taux d'arrivée (λ) et les taux de service (μ_i) relatifs à une unité ou à un lot, quelle que soit la taille de ce lot.

Pour les valeurs numériques de la section 4.2, les fournisseurs retenus sont, dans l'ordre de leur taux de service, le fournisseur 1, avec $\alpha_1^* = 0,37$, les fournisseurs 3 et 5, avec $\alpha_3^* = \alpha_5^* = 0,23$ et le fournisseur 4 avec $\alpha_4^* = 0,17$. Le fournisseur 2 n'est pas retenu. Il n'est donc jamais sélectionné dans la simulation. Les autres fournisseurs sont sélectionnés par tirage aléatoire respectant (approximativement) les probabilités α_i^* . La méthode donne donc des résultats différents selon les tirages aléatoires générés. La figure 2 illustre un de ces tirages, pour lequel la durée d'exécution maximale (makespan) vaut 126325 unités de temps. Elle correspond à la date de fin de l'OF 49, pour lequel le fournisseur 3 a été sélectionné.

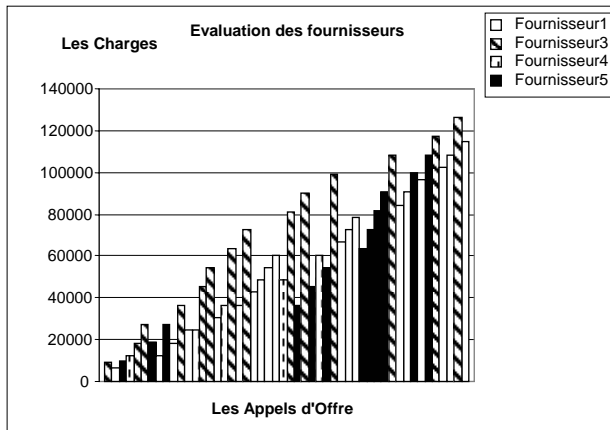


Figure 3 : Méthode Bernoulli – Affectation des OF et évolution de la charge des fournisseurs

b. Indice de Gittins

Les 50 ordres de fabrication sont lancés un par un par le détaillant. Le détaillant choisit le fournisseur qui a le plus court délai moyen. En réponse, le fournisseur envoie la date d'exécution prévue pour cet OF. Nous supposons ici que la date d'exécution réelle est identique à la date d'exécution prévue. Cette information permet au détaillant de mettre à jour le délai moyen d'exécution relatif au fournisseur choisi, par la formule (11). Les délais moyens estimés des autres fournisseurs restent inchangés. Le caractère adaptatif de cette méthode lui confère une performance supérieure à celle de la méthode de Bernoulli, comme le montre la Figure 3. La durée d'exécution maximale (makespan) obtenue vaut 120220 unités de temps. Elle correspond à la date de fin de l'OF 49, pour lequel le fournisseur 2 a été sélectionné.

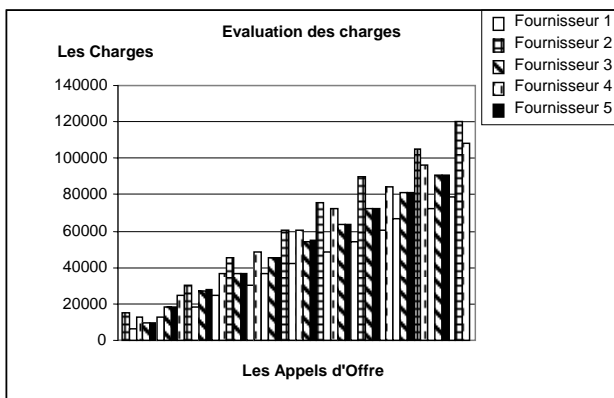


Figure 4 : Méthode Gittins - Affectation des OF et évolution de la charge des fournisseurs

c) Méthode par négociation

La méthode par négociation est appliquée dans sa version monocritère. Chaque ordre de fabrication fait l'objet d'un appel d'offre envoyé à tous les fournisseurs. Le mécanisme d'auto-évaluation relatif à la date d'achèvement la plus proche conduit toujours à la sélection du fournis-

seur le plus performant à la date de réception de l'OF. La figure 4 montre la performance obtenue par ce mécanisme localement optimal. La durée d'exécution maximale (makespan) est de 96465 unités de temps. Elle est obtenue pour la date de fin de l'OF 50, pour lequel le fournisseur 4 a été sélectionné.

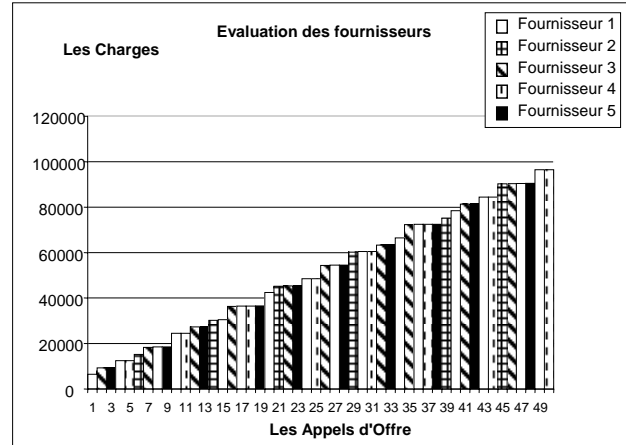


Figure 5 : Méthode de négociation - Affectation des OF et évolution de la charge des fournisseurs

d)- Analyse des résultats

La méthode de Bernoulli optimise les probabilités de choix en régime permanent. Elle n'est pas très performante car elle n'utilise pas d'information en temps réel qui permettrait une mise à jour des performances des fournisseurs.

La méthode de Gittins est adaptative. Elle optimise le choix localement par mise à jour des délais moyens des fournisseurs.

La méthode par négociation n'a pas été utilisée dans sa version multicritères, mais nous pouvons constater qu'une affectation monocritère par négociation permet d'obtenir une bonne répartition des AO entre les fournisseurs avec des dates d'achèvement des OF très performantes.

5 CONCLUSION

L'étude présentée dans ce travail porte sur l'évaluation comparative de politiques d'approvisionnement locales dans des réseaux d'entreprises, avec et sans négociation. Pour cela, nous avons simulé la mise en oeuvre de deux politiques locales sans négociation (par branchement de Bernoulli et par indices de Gittins), et l'implémentation d'une méthode par négociation auto-organisée. Un environnement de simulation distribuée DEVS/HLA a été utilisé pour préserver le caractère local privé des données et des décisions relatives aux différentes entreprises. Bien que la politique par négociation étudiée soit, par nature, multicritères, la comparaison a été restreinte au seul critère temporel, en raison des limitations inhérentes aux méthodes locales sans négociation. Il a fallu, en outre, élaborer un jeu de données pour lequel les 3 politi-

ques étaient applicables. Le jeu de données choisi est relatif à un réseau d'entreprises composé de cinq fournisseurs et d'un client. La comparaison des différentes politiques a été effectuée sur la base de 50 ordres de fabrication lancés par le détaillant, soit vers un fournisseur spécifique, soit sous la forme d'un appel d'offre vers tous les fournisseurs.

La comparaison des résultats montre que la méthode par négociation procède par choix optimal pour chaque appel d'offre, tandis que les politiques sans négociation ont des performances limitées par l'insuffisance des informations utilisées pour chaque prise de décision.

Le caractère monocritère de la comparaison étant principalement lié aux limitations de la méthode par branchement de Bernoulli, il est envisagé d'effectuer par la suite une comparaison entre une méthode de pilotage par indice d'allocation dynamique multicritères et la méthode de négociation par auto-évaluation multicritères.

REFERENCES

- Arda, Y., and J.C, Hennet, 2006. Inventory control in a multi-supplier system. *International Journal of Production Economics*, Vol 104/2 :249–259.
- Azoulay-Schwartz, R., S, Kraus and J, Wilkenfeld, 2004. Exploitation vs. exploration: choosing a supplier in an environment of incomplete information. *Decision Support Systems*, Vol. 38/1, 1-18.
- Brun, A., and A, Portioli-Staudacher, 2000. Negotiation-driven supply chain co-ordination for small and medium enterprises. *Agent Technologies and Their Application Scenarios in Logistics - 14th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI Workshop Notes*, Berlino, 20-25 Agosto.
- Cachon, G. P., and M. A, Lariviere, 2001. Contracting to assure supply: how to share demand forecasts in a supply chain. *Management Science*, 47 (5), 629-646.
- Despoutin, E., 2004. *Aide à la décision pour une coopération inter entreprises dans le cadre de la production à la commande*. Thèse du laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Ganeshan, R., M. Magazine and S, Tahir, 1999. *Quantitative models for supply chain management*. Kluwer Academic Publication. Collection Operations Research Management Science.
- Gittins, J.C., and D.M, Jones, 1972. A dynamic index for the sequential design of experiments. *Colloquia Mathematica Janes Bolai, European meeting of statisticians*, Budapest, Hungary, 9 : P. 241–266.
- Glazebrook, K. D., C, Kirkbride, H.M, Mitchell, D.P, Gaver and P.A, Jacobs, 2007. Index Policies for Shooting Problems, *Operations Research*, Vol. 55, No. 4, p. 769-781.
- Hennet, J-C., I, Demongodin and P, Blanc, 2007. An agent-based framework for manufacturing execution systems. *International Modeling and Simulation Multiconference*, Buenos Aires, Argentine.
- Hongler, M.O., and F, Dusonchet, 2003. Continuous time Restless Bandits and dynamic scheduling for make-to-stock production. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(6): p. 977-990.
- Mekaouche, L., F, Ounnar, P, Pujo and N, Giambiasi, 2005. Management of calls for proposals within self organized enterprises network. *IMP'05, 21st Annual Industrial Marketing & Purchasing Conference*, Rotterdam, Pays Bas, 1-3 September.
- Mekaouche, L., 2007. *Pilotage proactif basé sur la simulation distribuée d'un réseau logistique*. Thèse, Université Paul Cézanne, Aix Marseille III.
- Monteiro, T., and P, Ladet, 2001. Formalisation de la coopération par la négociation des délais dans le pilotage des flux interentreprises. *MOSIM'01*.
- Ounnar, F., and P, Pujo, 2001. Décentralisation des mécanismes de pilotage de la relation donneurs d'ordres / fournisseurs. *4e Congrès International de Génie Industriel*, Aix-Marseille.
- Ounnar, F., P, Pujo, L, Mekaouche and N, Giambiasi, 2004. Decentralized Self Organized Control of a Partnership Network in an Intelligent Supply Chain. *IMS International Forum 2004: Global Challenges in Manufacturing*, Part 2, p. 1319-1326, Cernobbio - Italy.
- Ounnar, F., and P, Pujo, 2005. Supplier evaluation process within a self-organized logistical network. *International Journal of Logistics Management*, 16 :1 : p. 159–172.
- Ounnar, F., P, Pujo, A, Zahaf and N, Giambiasi, 2006. Interoperability of Enterprises Network Holonic Control via HLA. *INCOM'06 Conference, 12th IFAC International Symposium*.
- Peillon, S., 2001. *Le pilotage des coopérations interentreprises : le cas des PME*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet.
- Poirier, C., and S, Reiter, 2001. *La supply chain, optimiser la chaîne logistique et le réseau interentreprises*, Dunod.
- Pujo, P., and J.-P, Kieffer, 2002. *Concepts fondamentaux du pilotage des systèmes de production*. Collection IC2-Productique : Hermès Science Europe Ltd (Ed.), Fondements du pilotage des systèmes de production.
- Saaty, T. L., 1984. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. Traduction française : *Décideur face à la complexité*, Entreprise Moderne d'Édition, Paris.
- Smith, R. G., 1981. The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Trans.on Computers*, 29 : p. 1104–1113.
- Telle, O., 2003. *Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : aide à la coopération au sein d'une relation Donneur D'Ordres/Fournisseur*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace.