

AMELIORATION DE LA SYNCHRONISATION DE LA PRODUCTION SUR UNE CHAINE LOGISTIQUE

Vincent GIARD* & Gisèle MENDY**

Mots-clés : chaîne logistique, anticipation, pilotage des flux, point de pénétration de commande, kanban, production synchrone, robustesse, aléa.

1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, l'évolution de l'environnement économique des entreprises a conduit à une tension croissante sur les flux, en particulier pour les entreprises spécialisées dans la production de masse de produits fortement diversifiés, auxquelles on s'intéressera dans cet article. Ce raccourcissement de l'intervalle de temps, entre la passation d'une commande et le moment où elle doit être honorée, a des répercussions en cascade dans la chaîne logistique, d'autant que la pression sur les coûts s'est dans le même temps accrue. La différenciation retardée n'est plus suffisante pour faire face aux nouveaux défis, le pilotage des flux doit être amélioré. La solution consistant à améliorer la qualité de l'information circulant dans la chaîne logistique et à augmenter sa vitesse de circulation ne suffit pas lorsque certains processus mobilisés dans une production à la commande ne sont pas parfaitement fiables : il faut trouver des règles de pilotage conciliant efficacité et efficience. De nouveaux principes, testés avec succès sur des cas industriels validés, sont proposés ici et comparés à quelques approches disponibles. L'industrie automobile sera retenue comme exemple car c'est la plus avancée dans cette évolution qui concerne les industries orientées vers la production de masse de produits personnalisés (Anderson & Pine, [2], 1997).

* Lamsade, université Paris-Dauphine. Courriel : vincent.giard@dauphine.fr.

** Renault et Lamsade, université Paris-Dauphine. Courriel : gisele.mendy@renault.com.

On commencera par préciser quelques concepts qui permettent de mieux comprendre cette nouvelle problématique (§ 1). On présentera ensuite (§ 2) une approche permettant de mieux synchroniser la production des processus d'une chaîne logistique secondaire avec celle de la chaîne logistique principale qu'il alimente, lorsque la fiabilité de la production de la chaîne logistique secondaire est insuffisante. Les gains et les risques associés à cette logique de production synchrone ont été identifiés au travers de deux cas industriels; l'utilisation de la simulation a permis d'évaluer la sensibilité des résultats obtenus (§ 3).

2. Concepts mobilisés

Pour positionner correctement la problématique abordée, on commencera par définir la chaîne logistique (§ 1-1). La distinction entre flux tirés et flux poussés, avec ses implications sur les modalités de pilotage des flux, demande à être précisée lorsqu'elle est utilisée dans l'analyse du fonctionnement d'une chaîne logistique (§ 1-2). Dans cette chaîne, la rapidité de transmission des informations relatives aux commandes fermes, du processus devant satisfaire ces demandes aux processus - fournisseurs directs ou indirects, joue un rôle important sur l'organisation de la production. Le concept de point de pénétration de commande éclaire les enjeux d'une anticipation de la connaissance de la demande à satisfaire dans les chaînes logistiques secondaires (§ 1-3).

2.1 La chaîne logistique

De nombreux problèmes se posent dans la définition de la chaîne logistique et dans son utilisation d'un point de vue opérationnel (Giard, [6], 2003). On se limitera, ici, à quelques éléments liés à l'usage de l'information dans le pilotage des flux d'une chaîne logistique, vue ici comme un enchaînement de processus de production ou de transport, liés par des relations de type «client - fournisseur» et orientés vers la satisfaction d'une demande finale. Dans le contexte retenu, une chaîne logistique permettant la production d'une gamme donnée de produits se caractérise, en général, par un réseau de processus convergeant vers un processus d'assemblage final ; la distribution et la vente de ces produits sont souvent assurées ensuite par un réseau de distribution de type divergent. Cette chaîne logistique peut se décrire par le schéma de principe de la figure 1.

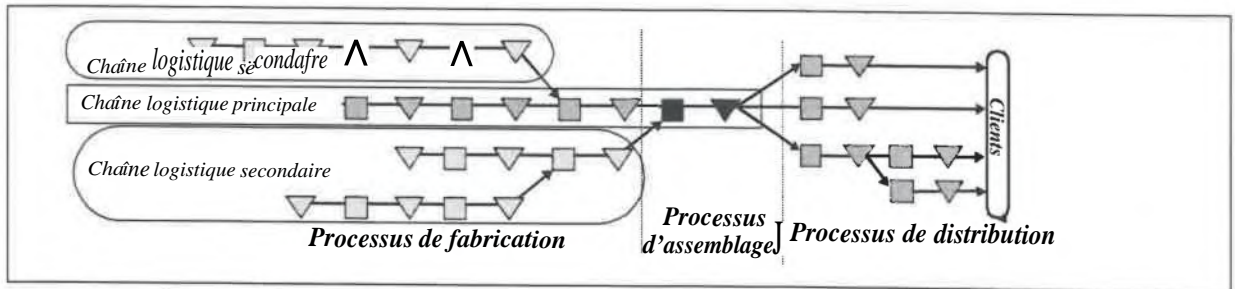


Figure 1 : Graphe des processus d'une chaîne logistique

On s'intéressera ici aux chaînes logistiques orientées vers la fabrication et l'assemblage et travaillant pour satisfaire les commandes de clients finals ou celles d'intermédiaires du réseau de distribution formulées en réponse à des demandes connues (approvisionnement à la commande) ou anticipées (approvisionnement pour stock). Dans ce réseau, on distinguera une chaîne logistique principale, constituée d'un enchaînement de processus convergeant vers le processus d'assemblage qui délivre des produits satisfaisant les demandes des clients, des chaînes logistiques secondaires, qui alimentent en composants les processus de la chaîne logistique principale. Le plus souvent, le système productif de la chaîne logistique principale appartient à une même entité juridique qui peut, ou non, posséder tout ou partie des systèmes productifs associés aux chaînes logistiques secondaires. Dans les deux cas, les problèmes de pilotage de la chaîne logistique se posent de la même manière mais il est, *a priori*, plus facile de concilier les points de vue locaux lorsque tous les processus sont dans le même périmètre juridique. Ajoutons, pour terminer, que ce schéma de principe ne vise pas à tout représenter, la réalité pouvant être plus complexe¹ mais aussi plus simple².

La distinction classique entre flux tirés et flux poussés doit être complétée lorsqu'on cherche à l'appliquer au pilotage d'une chaîne logistique.

¹ Par exemple, la diversité de la production peut faire que certains processus de ce graphe ne sont pas systématiquement mobilisés, le plus souvent en raison de la diversité des produits assemblés, tandis que d'autres peuvent être dédoublés, y compris celui de l'assemblage final qui peut s'étendre vers l'amont. Enfin, ce processus d'assemblage final n'est alimenté que par une seule chaîne logistique secondaire alors qu'il peut l'être par plusieurs.

² La chaîne logistique de distribution se simplifie quand le nombre de clients est faible et que la chaîne logistique est plus orientée vers une fabrication à la commande que vers un assemblage à la commande. La chaîne logistique de fabrication et d'assemblage peut se limiter à un simple enchaînement de processus, si les composants utilisés se trouvent facilement dans le commerce (découplage assuré par des stocks).

2.2 *Pilotage à flux poussés - pilotage à flux tirés*

En général, on parle de flux tirés lorsque la production d'un processus A est déclenchée par la commande d'un processus - client B, le processus - fournisseur A s'interdisant de produire en l'absence de commande. Deux remarques doivent alors être faites.

Pour des raisons économiques (arbitrage entre coûts de lancement et de possession en cas de demande suffisamment régulière), le lancement en production du processus A peut porter sur un lot de taille supérieure à la commande faite par le processus B. Le stock excédentaire ainsi créé sera consommé par des commandes ultérieures qui ne déclencheront pas de production par le processus A, tant que le stock disponible reste supérieur aux commandes ; dans ce cas, les concepts de flux tirés et de production à la commande ne sont pas totalement substituables.

Rien n'interdit au processus - client de produire sur la base d'une anticipation de commandes et non de commandes fermes (production pour stock). Dans une perspective locale, la qualification de flux tirés ne vaut que pour le processus - fournisseur dont la production n'est déclenchée que par la commande de l'un des processus - clients avec lequel il est en relation directe. Dans la perspective globale, qui est celle de la chaîne logistique, on peut réserver cette qualification au pilotage des flux d'un enchaînement de processus allant jusqu'à celui satisfaisant la demande d'un produit fini, considérée comme le fait générateur de la production dans cette chaîne logistique. Dans ce cas, la production d'un processus n'est pas nécessairement déclenchée par la commande de l'un des processus - clients avec lequel il est en relation directe. Il est alors nécessaire de préciser si c'est le point de vue local ou le point de vue global que l'on retient en parlant de flux tirés.

On parle de flux poussés lorsque la production d'un processus est décidée sur la base d'une anticipation, et non en réponse à une commande passée par l'un de ses processus - clients. Cette anticipation peut être le fruit d'une prévision portant sur des demandes non encore formulées (demande potentielle), auquel cas, on est clairement en production pour stock. Elle peut aussi résulter d'un calcul de mise à disposition à temps de composants à un processus - client, pour rendre possible la livraison de produits à une date ultérieure conformément à une commande effective déjà passée par un client du dernier processus de la chaîne logistique considérée, lequel ne peut être le processus - client du processus considéré ici. On est alors localement dans une logique de flux poussés et, globalement, dans une logique de flux tirés.

Ces remarques permettent de mieux caractériser le pilotage des différents processus d'une chaîne logistique et de mieux cerner la valeur opérationnelle des informations relatives à la demande finale circulant dans une chaîne logistique de production et d'assemblage. Le

découplage potentiel entre ces deux modes de pilotage (flux poussés/flux tirés) passe par la mise en évidence du point de pénétration de commande.

2.3 Le Point de Pénétration de Commande

La fabrication d'un produit complexe implique l'usage combiné d'une nomenclature des composants rentrant dans la fabrication du produit et des gammes de fabrication de ce produit et de ses composants. Les gammes permettent d'associer un processus à la fabrication de chaque composant ; la nomenclature permet ensuite d'établir la cartographie des flux impliqués dans la fabrication du produit et donc de la chaîne logistique concernée.

La connaissance de l'intervalle de temps séparant l'acceptation de la commande, de sa livraison, peut être répercutée en cascade dans les processus concernés se trouvant en amont du processus à l'origine de la commande dans la chaîne logistique. Sur un graphique Gantt visualisant l'enchaînement des processus de la chaîne logistique, la longueur des rectangles associés aux processus étant proportionnelle à leur durée³, on peut repérer sur l'axe du temps le point correspondant à la date à laquelle la date de livraison est connue dans une chaîne logistique secondaire. Ce point, unique si tous les processus disposent de cette information en même temps, est qualifié de point de pénétration de commande (PPC). Il permet de tracer une frontière dans la cartographie des processus entre ceux qui peuvent travailler à la commande et ceux qui doivent produire pour stock, une frontière similaire pouvant être établie dans la nomenclature. La figure 2 illustre cette détermination du PPC et le partage qu'il opère dans l'ensemble des processus et dans celui des références.

En amont du PPC, la connaissance de la demande finale est trop tardive pour pouvoir produire à la commande mais elle peut être utilisée par certaines politiques de production pour stock (politique de rechargement périodique à un niveau prédéterminé...). En aval du PPC, cette information permet aussi bien une production pour stock qu'une production à la commande.

³ L'organisation du système productif intervenant dans le processus (job shop, flow shop, ligne...) joue sur ces durées ; par ailleurs, le type de conception des produits retenue pour faire face à la variété requise par le marché a un impact sur l'intérêt de l'anticipation du PPC (Giard & Mendy, 2006, [9]).

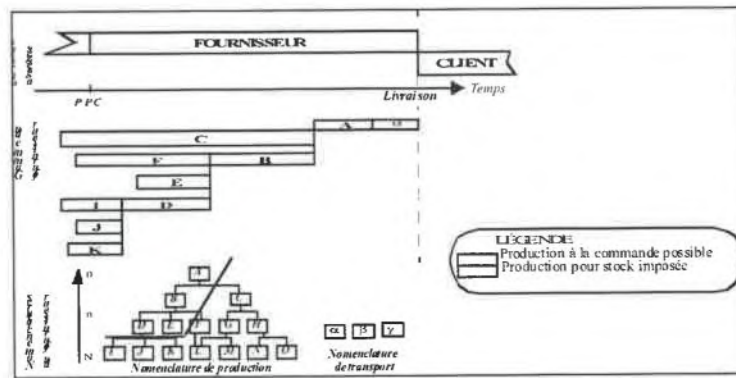


Figure 2 : Le principe du point de pénétration de commande (PPC).

Le passage à la production synchrone, auquel on s'intéresse ici (§ 2-2), a pour conséquence un déplacement à gauche du PPC sur le Gantt, permettant le remplacement d'une production pour stock par une production à la commande. Le pilotage à flux tirés localement peut alors se transformer en un pilotage à flux tirés globalement, doublé d'un pilotage à flux poussés localement.

3. Le pilotage synchrone des flux d'une chaîne logistique secondaire insuffisamment fiable

Le problème d'espace de stockage en bord de chaîne posé par une forte diversité en assemblage a conduit les entreprises, en particulier celles de l'industrie automobile, à passer en approvisionnement synchrone dans un contexte caractérisé par une faible anticipation de la demande à satisfaire (§ 2-1). On ne peut guère jouer dans ce cas que sur une différenciation retardée, réalisée par l'un des derniers processus de la chaîne logistique secondaire à partir de stocks préexistants de composants différents (le montage des housses des sièges automobiles constituant l'exemple classiquement retenu). Une augmentation de cette anticipation permet de passer d'un approvisionnement synchrone à une production synchrone où les composants assurant la différenciation peuvent être fabriqués à la commande au lieu de l'être pour stock. Si la fiabilité des processus de la chaîne logistique secondaire est bonne, on est ramené à un problème d'ordonnancement du type de ceux évoqués au § 2-1, à ceci près que l'on est dans une logique de programmation glissante sur un horizon de quelques dizaines d'heures. Le problème est nettement plus compliqué lorsque les processus de production de la chaîne logistique secondaire n'ont pas une fiabilité suffisante par rapport aux normes de qualité (dont la sévérité a tendance à s'accroître). De nouvelles approches du pilotage doivent être alors imaginées (§ 2-2).

3.1 *L'approvisionnement synchrone*

L'approvisionnement synchrone se fonde sur la passation d'une commande au fournisseur approvisionnant un poste de travail assemblant des composants substituables, d'un lot de composants à livrer à une heure précise permettant de couvrir exactement la demande à satisfaire jusqu'à la livraison suivante, ces composants étant rangés dans l'ordre de leur utilisation (encyclage). Le problème de l'encombrement du stock de bord de chaîne ne se pose plus, à condition que les livraisons ne soient pas trop espacées. Cette commande, passée quelques heures avant la consommation des références sur le poste, reprend l'ordre de passage que l'on doit observer sur le poste d'assemblage et qui doit être respecté à la livraison. Cet ordre peut être celui du lancement en fabrication/assemblage ou celui observé à un point de captage en amont du poste d'assemblage considéré si cet ordre est susceptible d'être perturbé⁴. On est alors sur un pilotage en flux poussés sur la base d'une anticipation considérée comme fiable. Le faible temps de réaction laissé au fournisseur l'oblige à mobiliser les principes de différenciation retardée dans la conception de ses produits et de ses processus (Tarondeau, 1982, [13], et Agard, 2002, [1]) et à utiliser des structures rapprochées permettant de préparer la livraison d'un lot encyclé (Magasin Avancé Fournisseur, MAF) ou d'achever la différenciation requise par les clients (Site Avancé Fournisseur, SAF).

3.2 *La production synchrone*

Après avoir présenté le contexte industriel visé, on examinera successivement les deux principes qui fondent l'approche nouvelle du pilotage de la production synchrone que nous proposons.

3.2.1 Contexte industriel visé

La production synchrone se caractérise fondamentalement par une transmission de la réquisition de composants au fournisseur, plusieurs dizaines d'heures en avance au lieu de quelques heures en avance comme c'est le cas avec l'approvisionnement synchrone. Cette solution est, *a priori*, intéressante parce que la remontée du point de pénétration de commande permet de diminuer la part de production pour stock au profit d'une production à la commande, rendant moins attractif l'usage de structures rapprochées, MAF ou SAF. Elle se heurte cependant à deux difficultés.

Tout d'abord, il faut que l'information transmise soit totalement fiable. Cette fiabilité n'est pas assurée si l'ordre indiqué lors de l'envoi de l'information au fournisseur est ensuite perturbé

⁴ Voir les différents travaux menés sur l'analyse des perturbations de l'ordre sur ligne d'assemblage (Giard et Jeunet, 2005, [7], et Danjou et al., 2000, [5]).

pour des raisons déjà évoquées (gestion en ligne de la qualité ou rupture d'approvisionnement en amont du poste d'assemblage considéré). L'usage de mécanismes correctifs (stocks de tri permettant un re-ordonnement partiel du flux, stocks de sécurité...) s'avère alors nécessaire. Dans l'analyse présentée ici, on supposera que l'information transmise est fiable, la présentation de mécanismes de rattrapage étant accessoire par rapport à l'objectif de cet article.

Il faut ensuite que le fournisseur tire le meilleur parti de l'information transmise. Les approches habituelles de pilotage des flux ne sont pas appropriées, il convient d'en imaginer de nouvelles. On va examiner quelques principes mobilisables, testés avec succès sur des problèmes réels.

On s'intéressera ici à un processus permettant la fabrication de plusieurs références, celui de la gestion d'un processus mono produit étant trivial. On s'appuiera sur une étude poussée de deux cas industriels, le premier utilisant un système Kanban et le second, une politique de recombêtement périodique. D'importantes simulations ont permis de comparer la performance de ces règles de pilotage avec les nouvelles règles proposées ici.

Si le processus de production du fournisseur garantit une qualité sans défaut, le pilotage des flux est relativement aisé. On commencera néanmoins par présenter notre démarche en univers certain, ce qui facilite la compréhension du premier principe qui la fonde. Son adaptation en univers aléatoire (§ 2-2.2) s'appuie sur un second principe (§ 2-2.3). Bien évidemment la comparaison de cette démarche par rapport aux pratiques actuelles (§ 3) ne sera présentée qu'en univers aléatoire sur la base de caractéristiques observées et validées industriellement.

3.2.2 Décision en univers certain - présentation du premier principe mobilisé par la nouvelle démarche de production synchrone

L'hypothèse de l'univers certain a trois conséquences importantes sur lesquelles s'appuie l'algorithme de synchronisation proposé ; seule la troisième sera remise en cause lorsque l'on passera en univers aléatoire.

- Les décisions de lancement en production du fournisseur sont prises à intervalles réguliers d'amplitude τ . Cet intervalle ne saurait être inférieur au temps opératoire unitaire maximum τ_0 du processus, ni être supérieur à un seuil τ_j défini par les dernières réquisitions connues du client au moment de la prise de décision. La définition de τ doit tenir compte de la périodicité des tournées d'enlèvement mais aussi des règles de lotissement et du temps de traitement. Au moment de la prise de décision à la date t , on connaît pour chacune des références i , le stock disponible S_{it} ainsi que la demande encyclée à satisfaire à partir de cette

date sur un horizon H correspondant à l'anticipation fournie par le client (avec $H \geq \tau$). Si, au moment de la prise de décision, des références sont en cours de production, leurs dates précises de livraison sont connues. Enfin, l'intervalle de temps entre lancement en production et livraison est certain.

- L'approvisionnement du processus étudié est garanti (absence de rupture de stock). On ne se préoccupe donc pas ici du pilotage des processus-amont. La levée de cette hypothèse, en univers certain, ne pose pas de trop de problèmes mais complique l'analyse sans en changer les fondements. Elle est plus difficile en univers aléatoire.
- La production de cet atelier est sans défaut.

En univers certain, l'existence du stock S_{it} ne se justifie a priori que pour trois raisons :

1. Le lancement de la référence i en production est précédé d'un temps de lancement et la capacité de production de l'atelier ne permet pas, pour satisfaire l'ensemble des demandes, de perdre trop de temps en lancement. Que la capacité soit suffisante ou non, ces stocks peuvent résulter d'un arbitrage entre coûts de lancement et coûts de possession.
2. Pour des raisons techniques, le lancement en production d'une référence peut être amené à respecter une taille de lot dont l'importance a de fortes chances d'excéder la demande à satisfaire jusqu'à la prochaine prise de décision. On observe ce cas dans les processus traitant simultanément plusieurs lots (traitement thermique ou chimique), chaque lot ayant une taille fixe et portant sur la même référence (ce qui n'exclut pas la possibilité d'avoir plusieurs lots portant sur la même référence).
3. Seule une constitution judicieuse de stock permet d'éviter les ruptures de stock si le nombre de lots que l'on peut lancer entre deux prises de décision successives est inférieur au nombre de références.

À la date t de prise de décision, outre le stock disponible S_u , on connaît la demande D_u' à satisfaire entre t et t' ($t \leq t' \leq t + H$). Le premier principe de fonctionnement de l'algorithme proposé est celui d'une simulation de l'évolution des stocks à partir de cette date t , pour rechercher les références qui seront le plus rapidement en rupture de stock. Dans cette simulation, on tient compte des livraisons faites entre t et t' , correspondant aux décisions prises antérieurement à t ainsi que celles des décisions prises en t (elles se prendront progressivement au cours de la simulation).

- On cherche d'abord la première date de rupture de stock prévisionnelle, qui se produit pour la référence i ; on décide, pour éviter cette rupture, de lancer en production par anticipation

à la date t la quantité q_a généralement définie par un lot de taille minimale $q_{\min} \geq 1$, ce qui conduit à une mise à jour du stock S_{i_1} de la référence i_1 à la date t_1' dans la simulation :

V W

- S'il reste une capacité résiduelle à la date t , on poursuit la simulation jusqu'à la seconde rupture de stock qui se produit en t_2' et porte sur la référence i_2 (qui peut éventuellement être la même que celle qui a provoqué la rupture précédente), ce qui conduit à lancer la date t la quantité q_{i_2} .
- On poursuit tant que reste une capacité résiduelle inexploitée.

Trois remarques peuvent être faites :

- Si les stocks de départ S_{i_0} sont suffisants, la rupture de stock est impossible; une solution triviale interdisant toute rupture consiste à calibrer les stocks initiaux S_{i_0} sur la demande prévisionnelle jusqu'à la prochaine prise de décision.
- Cette règle doit être adaptée si l'on doit respecter certaines contraintes de production (coûts de lancement dépendant de l'ordre de fabrication, regroupement de références pour des contraintes de teintes...); ces adaptations jouent essentiellement sur la définition de la capacité résiduelle et le séquençement des références lancées en production, si celui-ci est étalé dans le temps, sans affecter le principe énoncé.
- La capacité disponible peut ne pas être saturée lorsque l'horizon H est atteint dans la simulation. Dans ce cas, et si le taux de production est supérieur au taux de consommation du client, on peut utiliser cette capacité résiduelle pour augmenter la taille des lots des références et/ou décider de lancer en production de nouvelles références.

3.2.3 Décision en univers aléatoire - présentation du second principe mobilisé par la nouvelle démarche de production synchrone

La remise en cause de l'hypothèse d'une production sans défaut est indispensable pour de nombreux processus de production. Ceux de peinture, par exemple, connaissent souvent des taux de rebut p allant de 5 à 15 %. La solution classique utilisée en milieu industriel, consistant à considérer que sur n pièces produites (n correspondant à l'arrondi supérieur de $\lambda_{it}/(1-p)$, noté $\lceil \lambda_{it}/(1-p) \rceil$), q_{it} seront bonnes, ne peut garantir l'absence de rupture de stock, le nombre $X_{i,c}$ de pièces bonnes suivant la loi Binomiale :

$B \{ [\text{qit} / (1-p)], (1-p) \}$. Le risque encouru avec cette solution est illustré au tableau 1.

p	n = LM	$P(X < 5)$	n = fAEI	$P(X < 10)$	n = fôAI	$P(X < 15)$	njjiiil	$P(X < 20)$
5%	6	3,30%	11	10,20%	16	18,90%	22	9,50%
10%	6	11,40%	12	11,10%	17	23,80%	23	19,30%
15%	6	22,40%	12	26,40%	18	28,00%	24	28,70%

Tableau 1 : Probabilités de rupture d'approvisionnement pour le client $P(X < q_i)$ pour divers taux de rebut p et différentes productions demandées ($q_i = 5, 10, 15$ et 20).

Par rapport à l'univers certain, le seul changement porte sur la mise à jour des stocks S_{ih} , $S_{i_2t_2}$... La mise à jour du stock, au cours de la simulation, utilisée en univers certain ($S_{i_1t_1} \oplus S_{i_1t_1} + q_{i_1}$) doit être adaptée puisqu'il est possible qu'une ou plusieurs unités parmi les q_{i_1} livrées soient défectueuses, ce qui conduit inéluctablement à observer une rupture de stock avant la date f_{i_1}' . Le *second principe* mobilisé est celui d'une *maîtrise du risque de rupture de stock*. Ce risque se gère en remplaçant q_{i_1} par x_i qui est la quantité la plus forte telle que $P(X_i < r_i) < a$, où a est un risque de rupture d'approvisionnement maximal accepté ($a = 1\%$ dans notre exemple) et X_i suit la loi $B \{ \gamma_i, (1-p) \}$. Le tableau 2 illustre cette détermination pour une probabilité de non acceptation d'une pièce quelconque du lot, égale à 10 %. Si on lance en production un lot de 10 unités, on n'en comptabilisera que 5 en entrée en stock, ce qui revient à accepter une probabilité de 0,16 % de rupture d'approvisionnement pour le client (livraison de moins de 5 unités). Supposons maintenant qu'au cours de la même simulation opérée dans le cadre de la prise de décisions en t , cette même référence tombe à nouveau en rupture de stock. Le lancement initialement prévu doit être révisé et passé, par exemple, à 20 unités. En gardant le même risque, la lecture du tableau montre que l'on peut espérer ne pas tomber en dessous de 13 unités correctes (risque de 0,24% accepté). Antérieurement, pour cette même référence, on avait comptabilisé 5 pièces bonnes, cette nouvelle décision de lancement en production conduit à en comptabiliser 8 de plus (et non encore 5) pour arriver à 13.

qi	6	8	10	12	14	16	18	20
2k	2	4	5	7	9	10	12	13
$P(X_i < X_j)$	0,13%	0,50%	0,16%	0,43%	0,92%	0,33%	0,64%	0,24%

Tableau 2 : Production bonne x_i ayant plus de 99% de chances d'être dépassée sur un lot de taille q_i .

Quelques remarques complémentaires doivent être faites.

- Cet algorithme permet une adaptation immédiate aux variations de structure de la demande, ce que ne permet pas d'autres approches classiquement utilisées (sauf à recalculer en permanence leurs paramètres de pilotage). Le problème de la variation en volume est implicitement pris en compte si le taux de production ou la durée quotidienne de travail s'adaptent facilement, le niveau d'anticipation nécessaire pour calculer les désamorçages prévisionnels (nombre de produits séquencés demandés par le client) restant le même.
- Les calculs de position prévisionnelle de stock minorent les quantités rentrant en stock dans la simulation faite en t mais, la démarche proposée relevant d'une logique de planification glissante, à la prise de décision suivante (en $t + \tau$), tout ou partie de la production q_{it} décidée en t sera livrée. La nouvelle décision à prendre s'appuiera sur les stocks observés $S_{i,t+\tau}$, calculés à partir des $S_{i,t}$, des consommations effectives depuis la précédente prise de décision et de la partie de q_{it} livrée «conforme aux spécifications» entre t et $t + \tau$ (et non de la quantité «a minima» utilisée dans la précédente simulation).
- Le risque de rupture d'approvisionnement d'une référence i utilisé lors de la prise de décision en t est normalement supérieur à celui effectivement encouru.
- Si la date de rupture prévisionnelle est postérieure à la date $t + \tau$, la probabilité de rupture de stock à cette date ne correspond pas au risque α , associé à une livraison, mais à $P(X_{it} = 0) = p^{q_{it}}$, le risque encouru est alors normalement plus faible que celui que l'on accepte a priori. Si, à la livraison, on observe plus d'une pièce bonne, la date prévisionnelle de rupture de stock est alors plus éloignée. On peut espérer, avec ce système de programmation glissante, que si les premières dates prévisionnelles de rupture de stock sont assez éloignées ($2x$), on a le temps de réagir si certaines livraisons s'avèrent trop mauvaises.
- Si le stock initial S_{it} ne couvre pas la demande $D_{i,t+x}$ à satisfaire entre t et $t + x$, et si la date de rupture prévisionnelle est antérieure à $t + x$, il y a nécessairement rupture de stock s'il n'y a pas de livraison avant $t + x$; dans le cas contraire, cette rupture peut parfois être évitée avec un séquençement approprié.
- On a déjà vu qu'au moment de la prise de décision, des composants peuvent se trouver en cours de production dans l'atelier et seront livrés avant la prise de décision suivante. La qualité de ces livraisons à venir n'étant pas connue, on peut décider, dans la mise à jour des S_{it} , soit d'utiliser le principe de précaution retenu pour les livraisons à venir, soit de

procéder à un tirage aléatoire du nombre de pièces bonnes (loi Binomiale). Cette seconde solution a été utilisée dans la seconde étude de cas, la simulation portant alors sur plus d'un mois de fonctionnement.

4. Analyse de deux cas industriels et de leur pilotage actuel dans le secteur automobile

Certains constructeurs automobiles, conscients des gains potentiels permis par une démarche de production synchrone, se sont engagés à transmettre à certains de leurs fournisseurs l'ensemble des ordres de fabrication séquencés fermes non plus sur une information physique découlant du séquençement de leur ligne d'assemblage (information n'allant pas au-delà de 5 heures dans notre exemple) mais sur une information administrative ferme et séquencée avec une visibilité de l'ordre de quelques jours. Cette démarche nous a conduit à identifier dans un premier temps, pour un fournisseur de rang 1 (appelé ici «*cas A*»), les gains associés à cette nouvelle démarche et à vérifier si les règles de pilotage utilisées sont adaptées et si le fournisseur tire le meilleur parti de l'information transmise. Dans une seconde étude, nous avons cherché à mettre en évidence, pour un second fournisseur de rang 1 (appelé ici «*Cas B*») assurant sur un SAF un approvisionnement synchrone, les gains potentiels d'une remontée possible du PPC en amont de ses processus. Cette réflexion a été menée dans le cadre d'une étude de suppression du SAF.

La modélisation de leurs processus respectifs (§ 3-1) va permettre d'analyser les règles de fonctionnement des pilotages actuels et de comprendre comment utiliser au mieux l'anticipation de l'information transmise par le client, sachant que la fiabilité des processus du fournisseur est insuffisante et que les informations transmises aux fournisseurs peuvent perdre de leur fiabilité pour les réquisitions éloignées. L'allongement significatif de l'horizon des réquisitions du client conduit légitimement à s'interroger sur l'efficacité et l'efficience des règles de pilotage actuellement utilisées mais aussi de celles proposées ici. L'analyse de ce *benchmark*, s'appuyant sur d'importantes simulations comparables reposant sur les principales caractéristiques observées, fournit des réponses à ces questions ainsi que des indications sur la robustesse de ces nouvelles règles de pilotage (§ 3-2).

4.2 Présentation des processus des fournisseurs

Les deux cas A et B ont en commun le fait que les procédés de production ne sont pas complètement fiables mais diffèrent par le mode du pilotage utilisé aujourd'hui (figure 3).

Dans le cas A, le fournisseur introduit la diversité par un processus de peinture et procède par la suite à la mise en stock des différentes teintes obtenues. Alors que l'information transmise par le client est exploitable depuis plusieurs mois en amont de l'atelier de peinture (information administrative ferme séquencée sur quelques jours), le PPC réellement exploité est positionné par le fournisseur en aval de la diversité ce qui met en évidence que le fournisseur utilise l'information ferme qu'en entrée de ligne d'assemblage final et procède en fin de parcours à l'encyclage des pièces dans l'ordre de consommation de la ligne d'assemblage du client final. Le pilotage du cas A assuré entre le stock de références peintes et les lancements assurés en atelier de peinture repose sur un système Kanban assez classique. Le stock initial S_{i0} dimensionné en sortie de l'atelier peinture pour chacune des couleurs référencées, correspond à un nombre de kanbans défini par l'industriel en fonction de la structure de la demande et de ses habitudes de gestion des risques. Le calibrage du stock est défini sur la borne supérieure d'unités permettant d'assurer un risque moindre de désamorçages (2 racks/teinte) ; nous ne sommes pas ici dans le cas d'un calcul de kanbans maximum correspondant à la quantité maximale demandée entre deux livraisons dans l'objectif d'annuler tout risque de rupture de stock. Pour une diversité de 14 teintes, le fournisseur peut lancer en peinture comme taille de lot minimale, 3 lots de 18 unités (cycle de 54 unités) pour un temps de cycle de 90 minutes. La périodicité de la prise de décision pour lancement en production est à intervalle régulier d'amplitude minimale de $\tau = 90$ minutes et la règle de lancement répond à un système traditionnel de kanban.

L'organisation du cas B est un peu plus complexe ; le fournisseur assure dans un premier temps la production de produits semi-finis sur la base de demandes prévisionnelles sur un site de fabrication propre situé à quelques dizaines de kilomètres de l'usine cliente. La diversité initiale est de 20 références différentes et la diversité finale en sortie d'atelier de peinture est portée à 360 références teintes. Le lancement en peinture ne se fait pas sur la base de commandes fermes séquencées envoyées par le client mais sur une logique de recomplètement pour stock monitoré périodiquement par l'information des consommations réelles entrées dans leur système SAP.

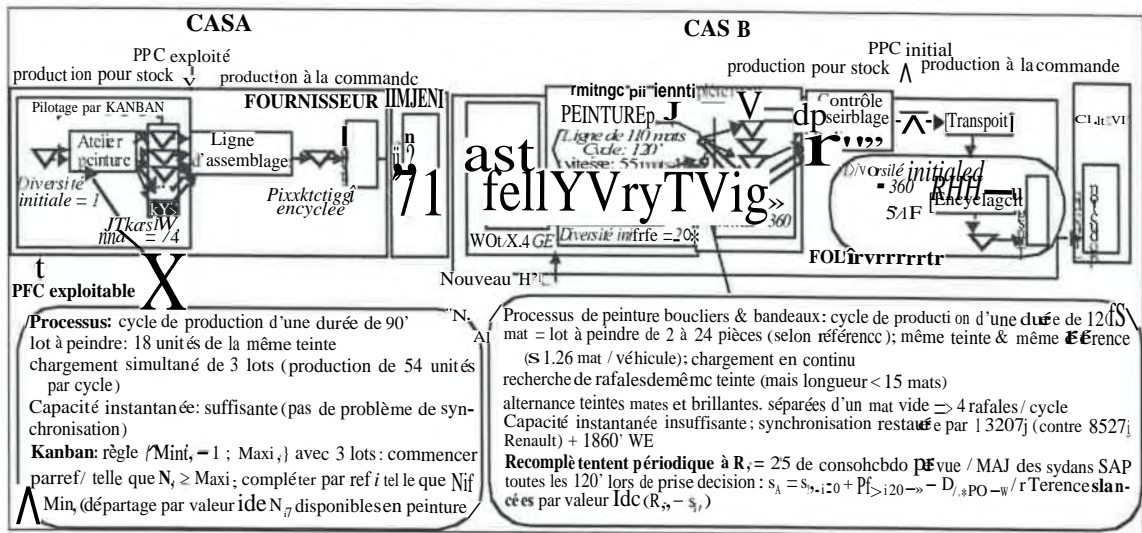


Figure 3 : Modélisation des processus des fournisseurs A et B - Pilotage par KANBAN et Pilotage par recomplètement de stock.

Sur une période de deux heures ($x = 2$), les consommations réalisées sur le Site Avancé Fournisseur, implanté sur le site du constructeur où l'ensemble de toutes les références sont stockées en attente d'une opération d'assemblage final, sont enregistrées dans leur système. Le seuil de recomplètement noté R_i est fixé pour chacune des références à 2 jours de consommation moyenne dans le but d'éviter toute rupture de stock. La logique de recomplètement pour stock est basée sur le lancement en peinture pour la référence i ayant la valeur la plus importante de la différence $R_i - S_{i,t}$ (avec $S_{i,t}$ = position de stock à l'instant t). Avec une capacité de chargement en peinture de 55 mats/heure (diversité maximale produite en deux heures égale à 110, alors que la diversité totale est de 360), on épuise avec cette règle la capacité disponible au lancement. Le cas B est plus complexe que le cas A caractérisé par un lancement simultané de trois références en peinture : la décision porte sur la séquence des références à charger sur les 110 prochains mats, en tenant compte de certaines contraintes techniques : nécessité de séparer, par un mat vide, toute séquence de mats chargés de composants à peindre en teinte mate, des séquences de mats chargés de composants à peindre en teinte brillante; limitation à 15 des séquences de mats de même teinte; recherche d'une minimisation du nombre de changements de teinte. Le fournisseur B procède dans un dernier temps au transport de toutes les références (pour toute la diversité) de son site vers le SAF où il effectue un assemblage final des références sur la base de demandes fermes séquencées provenant du client final avant de les acheminer par transport interne jusqu'au poste de consommation final.

4.2 *Simulation des règles de pilotage actuelles en univers aléatoire et analyse des résultats*

L'identification des bénéfices associés au déplacement du PPC en amont de la diversité passe par l'analyse d'un problème stochastique de lancement en peinture pour lequel la simulation utilisant la méthode Monte Carlo est très bien adaptée. Dans l'objectif d'obtenir des résultats en simulation, nous avons retenu ici deux scénarii testés en univers aléatoire, avec un taux de rebut en peinture de 10 %. En régime de croisière, une règle de rattrapage périodique de la production défectueuse a été appliquée aux deux cas A et B.

Le scénario 1 représente le pilotage actuel du fournisseur (Kanban pour le cas A et recombêtement pour stock pour le cas B). Le cas B se caractérise par une particularité supplémentaire, celle d'une désynchronisation des flux, induite par une capacité de production du fournisseur inférieure à celle du client. Ce décalage est rattrapé par une durée de production quotidienne plus grande pour le fournisseur que pour le client ainsi que par une production additionnelle le week-end. Ce problème, sans incidence sur l'algorithme proposé, ne sera pas présenté en détail ; son évocation permet toutefois de comprendre la forme des courbes de l'évolution de la production et le fait qu'il est à peu près impossible d'observer une rupture de stock au cours des deux premières journées avec les règles actuelles de pilotage. Il faut ajouter que le scénario de référence du cas B repose sur le maintien des règles actuelles avec un taux de consommation du client plus important que celui observé actuellement et correspondant aux objectifs fixés à court terme par le client ; ceci explique pourquoi les ruptures de stock trouvées dans la simulation sont plus importantes que celles actuellement observées.

Le scénario 2 utilise les nouvelles règles de pilotage en production synchrone exposées au § 2-2. La simulation des deux cas a été réalisée à partir d'un film de composants (respectant le mix/volume fourni par les fournisseurs) généré sur un peu plus de 4 semaines de production permettant de se faire une opinion réaliste sur le comportement de ces systèmes en régime de croisière dans le cadre des deux scénarii. La neutralisation de la fin du film généré dans la simulation a été nécessaire afin de garder un horizon minimum (ce qui laisse 4 semaines de production). Les figures 4 et 5 fournissent les résultats des simulations faites avec usage d'un taux de rebut de 10 %. Dans le cas A (figure 4), le pilotage actuel du kanban (y compris avec un stock initial plus important) ne permet pas de couvrir les risques de rupture de stock ce qui s'explique par une myopie totale des ordres de consommations à venir en l'absence d'un réajustement dynamique du nombre de kanbans s'appuyant sur les informations prévisionnelles. Dans le scénario 2, l'application de l'algorithme de production synchrone avec une visibilité des ordres de fabrication sur un horizon $H=10$ (visibilité qui équivaut à 10 cycles

de 54 unités soit 540 prochains ordres) permet, avec un stock initial réduit de 50 % (stock initial défini par le fournisseur), de couvrir l'ensemble des demandes et de se préserver des risques de ruptures de stock. Avec plusieurs jeux de données simulés, les premières dates de rupture prévisionnelles sont apparues à partir d'un horizon compris entre $H=9$ et $H=10$. Ceci met en évidence que la valeur de l'information est limitée au-delà, sachant que la programmation est glissante; en d'autres termes l'information au-delà de 540 ordres séquencés n'a pas de valeur ajoutée ($H=10$ correspond à une journée de film ferme). Cette conclusion est liée aux caractéristiques du système étudié et au calibrage des stocks initiaux ; par ailleurs, l'algorithme présente l'avantage d'une adaptation immédiate à toutes modifications de structure (la demande pouvant sans problème se concentrer durablement sur une seule référence).

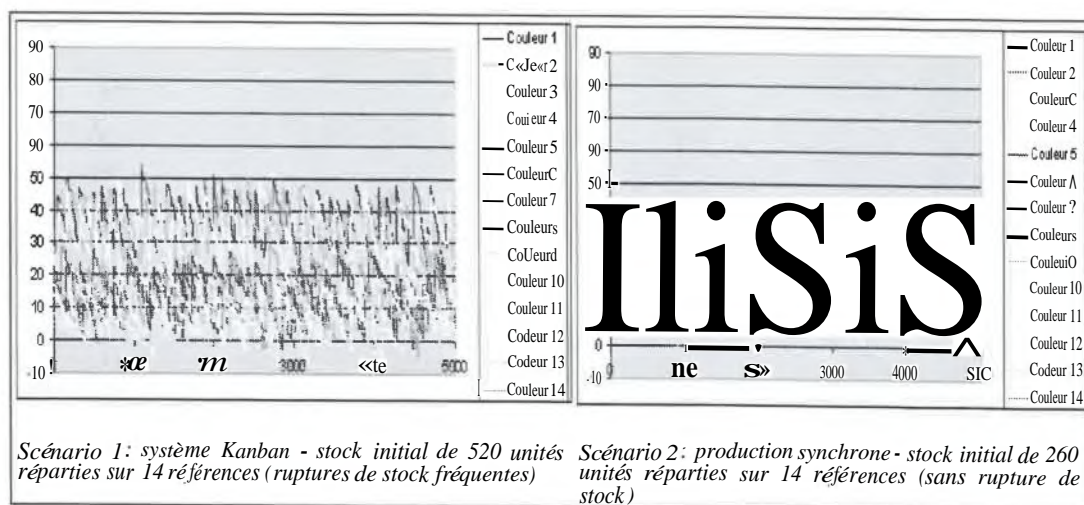


Figure 4 : Résultats en univers aléatoire Cas A - Évolutions des stocks (élémentaires) dans les 2 scénarii.

La figure 5 illustre les résultats du cas B et montre l'importante réduction de stocks (60 %) permise par la nouvelle approche et ce sans aucune rupture de stock, contrairement à ce qui se passe dans le scénario 1 où, sur une simulation de 4 semaines, on constate 1,7 % de demandes non satisfaites pour cause de rupture de stock ; ce taux pourrait être diminué par un paramétrage dynamique des règles de pilotage utilisées. Les ruptures de stock du premier scénario ne sont pas visibles car la courbe de la figure 5 représente le cumul de toutes les références en stock. Dans la production synchrone, avec ce stock initial, la dernière date prévisionnelle de rupture de stock est à 25 heures, ce qui met en évidence que toute information additionnelle n'a pas de valeur ajoutée. Là encore des modifications rapides et durables de la structure de la demande sont absorbées sans problème.

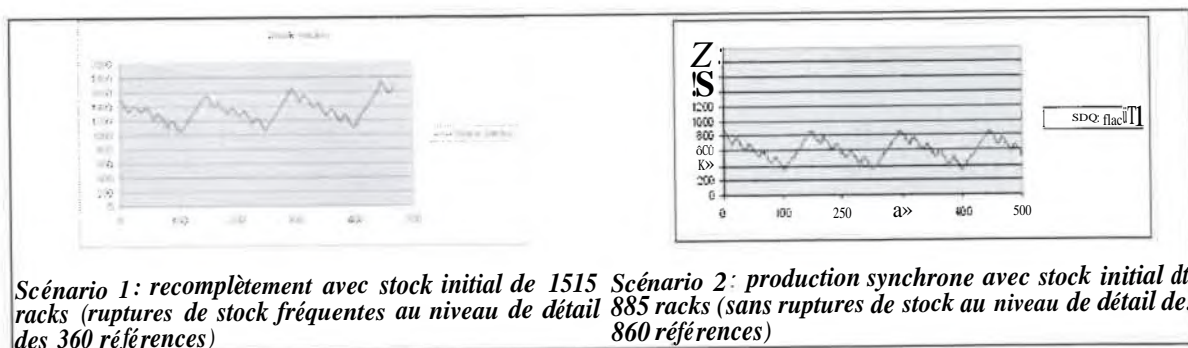


Figure 5 : Résultats en univers aléatoire Cas B – Production synchrone.

5. Conclusion

En comparaison avec un pilotage basé sur un système kanban traditionnel ou sur le principe du reapprovisionnement pour stock périodique, l'application de l'algorithme de la production synchrone appliqué à deux cas industriels confrontés à des problèmes de fiabilité des processus industriels, a montré qu'il était possible à la fois de réduire notablement le niveau des stocks et d'éliminer les ruptures d'approvisionnement pour le client. En outre, ces études ont montré les limites de la valeur de l'information transmise par le client : dans l'application de cet algorithme, dès que la capacité de production disponible pour la période à venir est saturée, les informations relatives aux demandes postérieures à celle qui a déclenché la dernière décision de production ne présentent pas d'intérêt pour le pilotage de l'atelier. Cette affirmation est sans doute à relativiser si l'on entend également piloter avec ces informations le processus situé en amont de celui étudié ici mais cette analyse est beaucoup plus complexe du fait de l'incertitude sur la qualité de la production. Enfin, la réactivité de cette approche à des changements radicaux de la structure de la demande constitue un atout supplémentaire.

Cette exploration de nouvelles règles de pilotage doit aller de pair avec l'amélioration de la qualité de l'information circulant dans la chaîne logistique et de sa vitesse de circulation qui repose sur une meilleure coopération entre les différents acteurs et sur une diminution des stocks (plus le niveau de stock est important et plus l'horizon de l'information est important). Cette tendance n'est pas sans rappeler celle observée depuis une dizaine d'années dans la partie aval de la chaîne logistique avec la mise en place de politiques collaboratives⁵ du type CPFR (*Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*) mises en oeuvre dans la grande distribution

⁵ Cette démarche, encouragée par les pouvoirs publics nord-américains, est formalisée dans [3], 2004. Parmi les nombreux écrits disponibles sur ce thème on peut noter l'article de synthèse sur la collaboration dans la chaîne logistique écrit par Holweg et al. ([10], 2005) et celui de Schwarz ([11], 2004) décrivant l'état de l'art des pratiques dans les chaînes logistiques aux États-Unis.

où distributeurs et industriels élaborent en commun leurs prévisions⁶ et définissent conjointement les stratégies d'approvisionnement faisant ou non appel aux approches de type VMI (*Vendor Managed Inventory*). Ce retard s'explique en grande partie par un niveau de complexité plus fort : il ne s'agit pas seulement de gérer des approvisionnements dans un réseau mais en plus de produire à la commande. Travailler dans ce sens est un enjeu important, susceptible de renforcer les défenses de notre tissu industriel.

En matière d'informations transmises par le client à son fournisseur, on observe de plus en plus qu'à première situation, caractérisée par le passage tardif d'une absence d'information à une information précise, succède une seconde situation dans laquelle le client s'engage progressivement et relativement tôt vis-à-vis de son fournisseur, sur une demande de plus en plus précise au fur et à mesure que l'on s'approche de la livraison. L'analyse de la sensibilité de l'algorithme de production synchrone face à ce problème de fiabilité progressive de l'information a été explorée pour le cas A. Une adaptation de l'algorithme de production synchrone, combinant l'utilisation d'informations séquencées pour les premières périodes de 90 minutes (amplitude correspondant à l'intervalle séparant deux décisions successives) et d'informations agrégées pour les périodes suivantes, donne des indications intéressantes. Avec ces nouvelles hypothèses de travail, une décision additionnelle doit être prise s'il reste une capacité résiduelle quand la simulation dépasse l'horizon des informations séquencées et si les dernières ruptures prévisionnelles se produisent au cours d'une période au cours de laquelle les ruptures de stock prévisionnelles portent sur plus de référence que Ton est en mesure d'en lancer avec la capacité résiduelle définie en début de période; dans ce cas, l'adaptation de l'algorithme a consisté à départager aléatoirement les ex aequo. Les simulations réalisées montrent la bonne robustesse de l'algorithme : il suffit d'informations séquencées pour les trois premières périodes et agrégées pour les périodes suivantes pour éviter les ruptures de stock (qui se produisent si Ton dispose d'informations séquencées sur un horizon plus court). S'il est difficile de généraliser ce résultat précis au-delà du système étudié, on peut raisonnablement penser que l'algorithme s'accommode d'une information lointaine moins précise.

6. Bibliographie

- [i] B. Agard, *Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité*, thèse de doctorat en génie industriel de l'INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), 2002.

⁶ Cachon & Fisher, 2000, [4].

- [2] D. M. Anderson, J. Pine II, *Agile Product Development for Mass Customization: How to Develop and Deliver Products for Mass Customization, Niche Markets, JIT, Build-to-Order and Flexible Manufacturing*, McGraw-Hill, 1997.
- [3] CPFR: an overview, <http://www.vics.org/committees/cpfr/CPFR-Overview-US-A4.pdf>, Voluntary Interindustry Commerce Standards, 2004.
- [4] G. P Cachon, M. Fisher, «Supply chain inventory management and the value of shared information», *Management Science*, août, 2000, Vol. 46, n° 8.
- [5] F. Danjou, V. Giard et E. Le Roy, «Analyse de la robustesse des ordonnancements/réordonnements sur ligne de production et d'assemblage dans l'industrie automobile», *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 19, n° 1, 2000.
- [6] V. Giard. *Gestion de la production et des flux*, Economica, Paris, 2003.
- [7] V. Giard et J. Jeunet, «Modélisation du problème général d'ordonnement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage», *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APIJESA)*, 2005.
- [8] V. Giard et G. Mendy, «Production à flux tirés dans une chaîne logistique», *6e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, Rabat*, Avril 2006.
- [9] V. Giard et G. Mendy, «Le passage de l'approvisionnement synchrone à la production synchrone dans la chaîne logistique», à paraître dans la *Revue Française de Gestion*, 2006.
- [10] M. Holweg, S. Disney, J. Holmström, J. Smâros, «Supply Chain Collaboration: Making Sense of the Strategy Continuum», *European Management Journal*, avril 2005, Vol. 23, n° 2.
- [11] L. B. Schwarz, «The state of practice in supply chain management: a research perspective», in *Applications of Supply Chain Management and E-Commerce Research*, sous la direction de J. Geunes, E. Akçali, P.M. Pardalos, H. E. Romeijn, Z.-J. Shen, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [12] JC Tarondeau. *Produits et technologies, Choix politiques de l'entreprise industrielle*, Dalloz, 1982.
- [13] T. E. Vollmann, W. L. Berry, D. C. Whybark, *Manufacturing planning and control system*, McGraw-Hill, 4e édition, 1997.