

# Synchronisation et découplage du pilotage des usines d'une chaîne logistique dédiée à une production de masse de produits diversifiés

Carole Camisullis<sup>1</sup>, Vincent Giard<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. Lamsade Université Paris Dauphine, place de Lattre de Tassigny, F 75775 Paris Cedex 16, carole.camisullis@dauphine.fr, carole.camisullis-renexter@renault.com

<sup>2</sup>. Lamsade Université Paris Dauphine, place de Lattre de Tassigny, F 75775 Paris Cedex 16, vincent.giard@dauphine.fr

---

**RÉSUMÉ :** La synchronisation de la production d'un fournisseur fabriquant des composants alternatifs montés sur un poste d'assemblage de son client industriel, avec celle de ce client spécialisé dans la production de masse de produits fortement diversifiés, doit tenir compte de l'amélioration de la connaissance de la demande finale (déplacement du Point de Pénétration de Commande) et de l'éloignement de certains fournisseurs. Le client transmet périodiquement à son fournisseur des commandes fermes, calculées pour éviter tout arrêt de la ligne. Le fournisseur doit impérativement les honorer, ce qui assure le découplage du pilotage de ces deux entités de la chaîne logistique et définit l'efficacité de la synchronisation. Dans le contexte étudié, le fournisseur reçoit également l'ensemble des informations prévisionnelles dont dispose le client industriel (commandes finales, certaines sur le court terme, et caractéristiques structurelles de la demande au-delà). L'efficacité du fournisseur dépend du bon usage qu'il fait de ces informations, notamment lorsque le cycle de production des composants alternatifs est plus long que celui des réquisitions. Dans l'étude des réquisitions du client, il faut tenir compte de l'existence de contraintes de lotissement liées au transport, ce qui oblige le client à détenir des stocks de sécurité alors même que l'organisation mise en place garantit que les commandes seront correctement honorées. Les déterminants de ces stocks seront mis en évidence. De la même façon, chez le fournisseur des stocks de sécurité seront nécessaires si l'ordonnancement de la production implique des regroupements en lots.

**MOTS-CLÉS :** production de masse de produits diversifiés, usage optimal des informations du client, stocks de sécurité

---

## 1. Introduction

Quatre points définissent le cadre retenu pour cette analyse : les acteurs de la chaîne logistique étudiée, les conséquences d'une non-satisfaction de la demande, les principes de coordination de la chaîne logistique et le choix d'une méthode de gestion des approvisionnements.

Pour Burlat *et al.* (2001), « l'ensemble des entreprises liées par la fabrication d'un même produit constitue la chaîne logistique de ce produit ». Même si certains articles considèrent une chaîne logistique comportant un nombre important de maillons (Chen 1994), la majorité de la littérature traitant du *supply chain management* se focalise sur l'étude de deux maillons se suivant dans une chaîne logistique. On trouve davantage d'analyses portant sur les chaînes logistiques aval (c'est-à-dire sur les unités se trouvant en aval de la dernière unité contribuant à une transformation du produit), que sur des chaînes logistiques amont. Dans les chaînes logistiques aval, le cas d'un centre de distribution livrant N détaillants est le plus fréquent, N pouvant être restreint à 2 dans certaines études des mécanismes de concurrence entre détaillants (Zhang 2002). Les chaînes logistiques amont portent dans l'ensemble sur un fournisseur qui livre un

client industriel (B2B), ce qui constitue notre champ d'étude. Les relations entre un fournisseur et N clients, ou N fournisseurs pour un client, sont moins communes (Zou *et al.* 2004 placent leur étude dans ce contexte).

La commande d'un client industriel à son fournisseur doit être livrée à une date prévue contractuellement. Si elle ne peut l'être, la demande peut être différée ou perdue. Les modèles classiques de gestion des approvisionnements visent à définir la commande du système par une minimisation d'une fonction de coût intégrant un coût moyen de possession, un coût moyen de rupture (dont la définition varie selon que la demande non satisfaite est différée ou perdue) et, si la périodicité de commande n'est pas prédéterminée, un coût moyen de passation de commande. On s'intéressera ici au cas, peu étudié, de relations « client-fournisseur » impliquant une probabilité de rupture négligeable et une périodicité de prise de décision prédéfinie. Cette approche rejoint la précédente si le coût de rupture est relativement très élevé par rapport au coût de possession, le problème de la prédétermination de la périodicité étant liée à une organisation logistique d'ensemble.

Pour Kouvelis *et al.* (2006), la coordination d'une chaîne logistique se fonde sur « toute action ou approche qui pousse les partenaires d'une chaîne logistique à agir de manière favorable pour la chaîne logistique dans son ensemble ». Les deux modes principaux de coordination d'une chaîne logistique sont les contrats et le partage d'information.

- Les contrats déterminent les conditions de l'échange : quantités, prix, dates, conditions de retour (qui dépendent de la rapidité d'obsolescence ou de péremption du bien)... Les contrats étudiés concernent essentiellement la chaîne logistique aval. Dans un contrat de gestion partagée des approvisionnements (VMI, *vendor-managed-inventory*) (Disney *et al.* 2003), le fournisseur choisit combien d'unités livrer à son client, mais il n'est payé que pour les unités finalement vendues. Dans les contrats de partage des revenus (Cachon *et al.* 2005), une part des gains réalisés par le détaillant revient au fournisseur. Les contrats VMI et de partage des revenus peuvent être couplés. Les contrats de prix de gros négocié (*wholesale-price-based*) se passent en deux temps : tout d'abord le fournisseur choisit le prix, puis le détaillant choisit la quantité (Gerchak *et al.* 2004). Pour pouvoir coordonner une chaîne logistique, il faut y associer des contrats de rachat (buybacks), c'est-à-dire que les quantités non vendues sont retournées au fournisseur qui les reprend à un prix inférieur déterminé par avance (Emmons *et al.* 1998). La coordination de la chaîne logistique par les contrats suppose que le fournisseur ait la capacité de produire les quantités requises par le client. Cela ne pose pas de problème si le fournisseur travaille systématiquement en sous-capacité, mais ne correspond pas au cas où la capacité de production du fournisseur est juste suffisante pour couvrir la demande du client et où cette demande porte sur des produits différents.

Nous retiendrons comme principe de coordination de la chaîne logistique l'usage et la transmission d'informations, en appliquant les concepts usuels à une chaîne logistique amont.

- Dans les modèles de partage d'information, différents degrés de partage existent. Le spectre va de l'historique des commandes du maillon aval (Axsäter 1993) à la transmission en temps réel de l'état des stocks et des demandes finales reçues (Cachon *et al.* 1997), en passant par les prévisions de ventes finales (Forsslund *et al.* 2007) ou les paramètres de la politique de commande du client et la distribution de la demande finale (Gavirneni *et al.* 1999). Le partage des

informations a pour but la réduction de l'effet *Bullwhip* (Viswanathan *et al.* 2007) et certains auteurs considèrent que l'approche de la chaîne logistique a été initialement imaginée pour contrer cet effet (Medan et Gratacap, 2008). Les stratégies du *base stock* mises en place dans ce cadre se fondent ainsi sur deux idées principales : la répercussion le long de la chaîne logistique de toutes les informations disponibles et la détermination des commandes passées en fonction non plus d'un stock réel mais d'une position de stock, définie en fonction des stocks de base positionnés à chaque nœud du réseau. Le partage d'informations permet de diminuer les coûts de stock et de rupture dans la chaîne logistique (Hariharan *et al.* 1995), puisqu'elles permettent une amélioration des décisions du fournisseur sur les quantités qu'il commande (Lee et Tang 2000) et sur l'allocation des produits entre les clients (Chen *et al.* 2000).

Pour la plupart des auteurs, le partage d'informations permet de diminuer les coûts de la chaîne logistique : par exemple, Cachon *et al.* (2000) trouvent une baisse de 2,2 % et Chen (1998), une baisse de 1,8 % en moyenne. Le problème du partage des gains est très développé dans la littérature, par exemple pour Lee et Tang (2000) lorsque les demandes sont corrélées avec le temps, le bénéfice revient entièrement au fournisseur, les détaillants devant négocier avec le producteur pour obtenir quelques avantages en retour. Cette question n'entre pas dans notre cadre de recherche.

Dans tous les articles la demande finale est incertaine, aléatoire, parfois la distribution est connue et la demande totale est stable (Cachon *et al.* 2000). La quantité commandée (ou produite) doit permettre de couvrir cette demande aléatoire sur la période entre deux réapprovisionnements. Plusieurs raisons militent en faveur de l'utilisation de politiques calendaires d'approvisionnement. D'une part, elles facilitent l'organisation de la passation de commandes et celle des livraisons quand il s'agit de traiter de très nombreuses références acquises auprès de fournisseurs multiples. D'autre part elles facilitent la synchronisation des flux dans la chaîne logistique par un cadencement régulier des transactions qui n'est pas sans rappeler la technique du « Drum – Buffer – Rope » de la théorie des contraintes (Goldratt et Cox, 1984). Nous allons étudier l'usage des informations dans le cadre des politiques calendaires.

Les commandes du client sont des informations fermes pour le fournisseur. Elles peuvent ne pas se fonder sur une demande finale connue en raison d'une anticipation insuffisante si le fournisseur est éloigné. Celui-ci peut améliorer son efficacité en exploitant toutes les informations connues de son client au-delà de celles des réquisitions ; le bon usage de ces informations sera abordé ici. A notre connaissance, seuls Bourland *et al.* (1996) considèrent le cas où les clients communiquent les commandes chaque semaine à leur fournisseur pour les deux ou trois semaines à venir, ainsi que les prévisions pour les cinq ou six semaines au-delà. Ils expliquent que les deux usines ont besoin de stocks pour contrer les effets de commandes et de livraisons incertaines, mais ils ne considèrent que le cas d'un bien unique. La transmission d'informations fermes est abordée dans la littérature sous l'angle de la production à la commande et de l'analyse du point de pénétration de commande (Giard et Mendy, 2008). Nous montrerons que la remontée des informations le long de la chaîne logistique entraîne la création d'une pluralité de points de pénétration de commande, définis localement.

L'impact de contraintes de lotissement dans le pilotage de la chaîne logistique ne semble pas abordé dans la littérature. Le lotissement est pris en compte dans les problèmes d'ordonnement par son impact sur la capacité. La capacité est réduite par les temps de lancement d'une référence, éventuellement fonction de l'ordre des

références à fabriquer (White *et al.* 1977). Les tailles optimales de lots sont le résultat d'un programme de minimisation d'une fonction de coût qui intègre des coûts de possession et de lancement. La fixation ex-ante de la taille des lots à produire peut être liée à des contraintes de conditionnement des produits fabriqués ou à des contraintes de stockage en périphérie d'un poste de travail empêchant de disposer de la diversité requise des composants consommés. Le conditionnement est traité dans la littérature dans les problèmes de transport : il influe sur la capacité des moyens de transport, mais il n'est pas pris en compte dans la détermination des commandes à transmettre au fournisseur. On abordera ici l'impact de contraintes de lotissement sur le pilotage des flux de la chaîne logistique, à la fois sur la transformation des commandes à passer et sur la nécessité de détenir un stock de sécurité.

La suite de l'article est organisée de la façon suivante. Après avoir présenté le cadre d'analyse retenu dans une deuxième section, on déterminera dans une section 3 les politiques calendaires de réquisition du client et de production du fournisseur. Dans une section 4 on proposera une méthode de détermination des stocks de sécurité permettant de contrer les aléas induits par la prise en compte de contraintes de lotissement du transport dans le pilotage des flux.

## 2. Le cadre d'analyse

Nous nous intéressons à une chaîne logistique élémentaire composée d'une unité de production, désigné dans cet article comme le client, configurée en ligne d'assemblage permettant une production de masse de produits diversifiés (ligne de production automobile, par exemple) et d'une unité, désigné ensuite comme étant le fournisseur, produisant des composants alternatifs (moteur de voiture, par exemple) ou optionnels (toit ouvrant) assemblés sur un poste de cette ligne et contribuant à la diversité recherchée (Anderson *et al.* 1997) ; du point de vue de la problématique analysée, le cas des composants optionnels est un cas particulier des composants alternatifs. La figure 1 décrit les paramètres de transmission d'informations entre le client et le fournisseur, utilisées dans la commande du système.

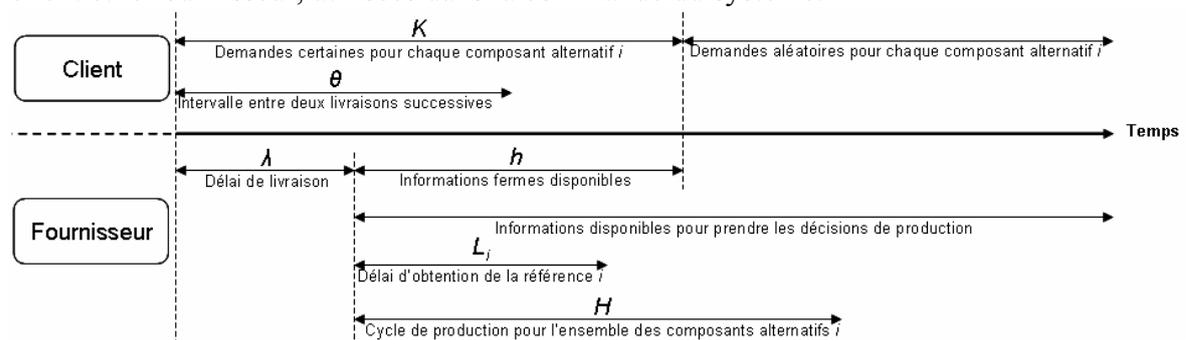


Figure 1. Paramètres du problème

À échéance de quelques semaines, la production quotidienne du client ( $= n$ ) est prédéterminée par la durée d'ouverture de la ligne (stable sur cet horizon) et le temps de cycle de la ligne. La demande quotidienne totale des composants alternatifs à commander au fournisseur est donc connue. À partir de la demande finale (commandes de véhicules), le client industriel détermine l'ordonnancement de sa production sur un horizon de  $K$  jours, ce qui détermine, sur cet horizon, la liste

ordonnée des composants alternatifs à monter chaque jour sur le poste de la ligne d'assemblage où ils sont montés. Au-delà de cet horizon  $K$ , le client ne dispose que d'une information sur la structure moyenne de la demande. Au début de chaque journée  $t$ , l'ordonnancement des jours  $t$  à  $t + K - 1$  est conservé et les nouvelles commandes du jour  $t + K$  sont ordonnancées, suivant une logique de planification glissante. La mise à jour de l'ordonnancement est immédiatement transmise au fournisseur.

La demande de livraison transmise par le client pour le début du jour  $t$ , est déterminée par le programme de montage des composants alternatifs, transmis au plus tard au début du jour  $t - \lambda$ , si le délai d'acheminement  $\lambda$  n'excède pas l'horizon  $K$ . Dans le cas contraire, la demande de livraison relève d'une politique d'approvisionnement calendaire qui sera présentée dans cet article. Quel que soit leur mode de détermination par le client (à partir d'informations fermes et/ou aléatoires), les réquisitions transmises sont des demandes certaines pour le fournisseur. Si l'organisation mise en place, relative à la production du fournisseur et au transport, garantit que les livraisons sont conformes aux réquisitions, il y a découplage entre le client et le fournisseur de la chaîne logistique.

Les réquisitions du client, qui sont dans tous les cas des informations fermes pour le fournisseur, permettent de déterminer un point de pénétration de commande chez ce fournisseur. Celui-ci envoie à son tour des réquisitions qui sont fermes à son propre fournisseur. Ces réquisitions, informations fermes pour le fournisseur de rang 2, sont à l'origine d'un nouveau point de pénétration de commande défini localement à partir du client industriel qu'il dessert et non du client industriel terminal ou du client final. En continuant de la sorte le long de la chaîne logistique, la propagation des informations crée, sur des bases locales, une série de points de pénétrations de commandes sans relation directe avec la **même** demande finale.

Si les références commandées sont encombrantes, la capacité des camions peut conduire à scinder la livraison en plusieurs envois se succédant dans la journée. Inversement, cette livraison peut couvrir les besoins du jour  $t$  et des  $\theta - 1$  jours suivants, si l'intervalle entre deux livraisons est de  $\theta$  jours ; dans ce cas, la réquisition porte sur une programmation transmise au plus tard au début du jour  $t - \lambda + 1 - \theta$ .

Les composants alternatifs sont très souvent fabriqués avec des moyens de production communs pouvant utiliser des outillages spécifiques. Pour des raisons d'efficacité (importance des coûts de lancement), le fournisseur peut avoir intérêt à produire successivement les références alternatives sur un cycle de  $H$  jours ( $H$  pouvant être égal à 1). La production périodique des références doit tenir compte du fait que les livraisons quotidiennes effectuées par le fournisseur intègrent toutes les références. Le délai séparant la date  $t'$  de début de la fabrication de la référence  $i$  de celle de sa livraison est noté  $L_i$ .

### **3. Détermination des politiques calendaires de réquisition du client et de production du fournisseur**

Nous nous appuyons sur l'exemple d'une ligne d'assemblage automobile dans lequel un poste monte le moteur désiré par le client final, celui-ci ayant le choix entre six moteurs (composants alternatifs). La production quotidienne de cette ligne d'assemblage est de 962 véhicules.

moteur $i$	1	2	3	4	5	6
$p_i$	54,46 %	13,29 %	3,58 %	21,51 %	5,13 %	2,03 %

**Tableau 1.** Répartition de la demande des moteurs

La structure observée pour un jour quelconque diffère nécessairement de cette structure moyenne, puisque nous sommes en présence d'une réalisation de la loi multinomiale de paramètres  $\{n = 962 ; p_i\}$ , avec  $\sum_{i=1}^6 X_i = 962$ ,  $X_i$  représentant la demande quotidienne du moteur  $i$  demandé. La détermination d'un intervalle de confiance de  $X_i$  passe par l'usage de la loi Binomiale  $\mathcal{B}(n, p_i)$  car l'analyse porte sur cette référence contre le regroupement de toutes les autres références.

## Détermination du niveau de reapprovisionnement d'une politique calendaire

La demande  $X_{iD}$  de la référence  $i$  sur  $D$  jours consécutifs suit la loi  $\mathcal{B}(nD, p_i)$  que nous pouvons approximer par la loi normale  $\mathcal{N}(nDp_i, \sqrt{nDp_i(1-p_i)})$ , en raison de la valeur élevée de  $nD$  et des valeurs prises habituellement par les  $p_i$  (si  $p_i$  est très faible, il peut être nécessaire de remplacer l'approximation par la loi Normale, par une approximation par la loi de Poisson, ce qui ne modifie pas la démarche exposée et implique d'adapter certains résultats analytiques).

Dans le cas général d'une variable aléatoire  $X$  suivant une loi normale de paramètres  $\bar{x}$  et  $\sigma$ , la valeur  $R$  de  $X$  telle que  $P(X > R) = \alpha$  est  $R = \bar{x} + t_\alpha \sigma$ , où  $\alpha$  est le risque retenu et  $t_\alpha$ , la valeur de la variable  $T$  suivant la loi  $\mathcal{N}(0, 1)$  telle que  $P(T > t_\alpha) = \alpha$ . Il s'ensuit que la valeur  $R_{iD}$  telle que  $P(X_{iD} > R_{iD}) = \alpha$  est donné par la relation 1.

$$R_{iD} = nDp_i + t_\alpha \sqrt{nDp_i(1-p_i)} = nDp_i \left(1 + t_\alpha \sqrt{\frac{1-p_i}{nDp_i}}\right) \quad \text{Relation 1}$$

La politique de gestion calendaire de l'approvisionnement d'un produit  $i$  se caractérise par la passation d'une commande  $q_{it}$  calculée comme la différence entre un niveau de reapprovisionnement  $R_i$  et une position de stock  $P_{it}$ ; l'intervalle entre deux décisions successives étant  $\theta$ . La détermination de la valeur optimale de  $R_i$  se fonde économiquement sur un arbitrage entre un coût de possession et un coût de rupture qui aboutit à la détermination d'une valeur optimale du risque  $\alpha$ . S'agissant de l'approvisionnement de composants alternatifs à monter sur une ligne d'assemblage, le coût de rupture lié à l'arrêt d'une ligne est sans aucune mesure avec le coût de possession; il est dès lors acceptable de retenir un risque  $\alpha$  très faible, par exemple 0,01 %. Dans la relation 1,  $R_{iD}$  s'analyse comme un niveau de reapprovisionnement et  $t_\alpha \sqrt{nDp_i(1-p_i)}$ , comme un stock de sécurité. Contrairement à ce que préconisent certains praticiens, ce stock de sécurité ne peut se définir comme un pourcentage constant de la demande moyenne; il dépend de 4 paramètres:  $\alpha, n, p$  et  $D$ .

Si le délai de livraison  $\lambda$  n'est pas nul, hypothèse retenue ici, c'est la demande aléatoire exprimée entre  $t$  et  $t+\theta+\lambda$  qu'il faut retenir pour déterminer le niveau de reapprovisionnement, (noté alors  $R_{i,\theta+\lambda}$ ). Si les demandes non satisfaites sont différées

et/ou si la probabilité de rupture de stock est négligeable, hypothèses également retenues, il y a indépendance entre les demandes observables sur deux périodes différentes. La demande sur la période  $\theta + \lambda$  suit alors la loi  $\mathcal{N}(n(\theta + \lambda)p_i, \sqrt{n(\theta + \lambda)p_i(1 - p_i)})$ , le niveau de recombplètement  $R_{i,\theta+\lambda}$  défini pour le risque  $\alpha$  étant :

$$R_{i,\theta+\lambda} = n(\theta + \lambda)p_i + t_\alpha \sqrt{n(\theta + \lambda)p_i(1 - p_i)} \quad \text{Relation 2}$$

Dans les conditions retenues, la position de stock à la passation de commande  $P_{it}$  est la somme du stock observé lors de la passation de la commande et des  $k$  livraisons attendues ( $k = \lfloor \lambda / \theta \rfloor$ , où  $\lfloor A \rfloor$  représente l'arrondi inférieur de A), d'où :

$$P_{it} = S_{it} + \sum_{j=1}^k q_{i,t-j\theta} \quad \text{Relation 3}$$

## Réquisitions périodiques du client à son fournisseur

Le client transmet à son fournisseur régulièrement (à intervalle  $\theta$ ) les spécifications de la prochaine livraison à effectuer. Nous supposons que cette transmission est quotidienne ( $\theta = 1$ ), et ce sans perte de généralité ( $\theta$  devenant l'unité de temps). Ce client commande à son fournisseur, au début de la journée  $t$ ,  $q_{it}$  unités du composant  $i$  à livrer au début de la journée  $t + \lambda$ .

Si  $\lambda \leq K$ , nous obtenons la relation 4 ; le fournisseur peut mobiliser les techniques de la production synchrone (Giard et al. 2008) sous certaines conditions ( $H \leq 2h$ ) :

$$\mathbf{q}_{it} = \mathbf{x}_{i,t+\lambda} \left( \sum_i q_{it} = \sum_i x_{i,t+\lambda} = n \right) \quad \text{Relation 4}$$

Dans le cas contraire ( $\lambda > K$  ;  $h = 0$ ), cette réquisition  $q_{it}$  est déterminée par la relation 5 qui est une adaptation des relations 2 et 3.

$$q_{it} = [n(1 + \lambda)p_i + t_\alpha \sqrt{n(1 + \lambda)p_i(1 - p_i)}] - [S_{it} + \sum_{j=1}^{\lambda} q_{i,t-j}] \quad \text{Relation 5}$$

La probabilité de rupture étant négligeable, le stock résiduel moyen avant livraison ( $SM_{it}$ ) se détermine à partir d'une relation classique de la théorie des stocks (voir, par exemple, Giard, 2003, p. 675), d'où la relation 6 :

$$SM_{it} = t_\alpha \sqrt{n(1 + \lambda)p_i(1 - p_i)} + [f(t_\alpha) - t_\alpha P(T > t_\alpha)] \sqrt{n(1 + \lambda)p_i(1 - p_i)} \quad \text{Relation 6}$$

$$\text{Avec } f(t_\alpha) = e^{-t_\alpha^2/2} / \sqrt{2\pi} \text{ et } P(T > t_\alpha) = \int_{t_\alpha}^{\infty} [e^{-t^2/2} / \sqrt{2\pi}] dt$$

Pour une probabilité de rupture négligeable, par exemple 0,01%, l'expression entre crochets de la relation 6 est égale à 0,0000238303, ce qui fait qu'en pratique, le stock résiduel moyen correspond au stock de sécurité  $t_\alpha \sqrt{n(1 + \lambda)p_i(1 - p_i)}$ . Par exemple, pour  $n = 962$ ,  $p_i = 13,29\%$ ,  $\lambda = 4$  et  $\alpha = 0,01\%$ , le stock résiduel moyen est égal à 39,16.

Par ailleurs, avec  $R_{i,1+\lambda} = q_{it} + [S_{it} + \sum_{j=1}^{\lambda} q_{i,t-j}] = q_{i,t-1} + [S_{i,t-1} + \sum_{j=1}^{\lambda} q_{i,t-1-j}]$  et  $S_{it} = S_{i,t-1} - x_{i,t-1} + q_{i,t-1-\lambda}$ , nous obtenons la relation 7 valable en régime de croisière sous les conditions énoncées

$$\mathbf{q}_{it} = \mathbf{x}_{i,t-1} \left( \sum_i q_{it} = \sum_i x_{i,t-1} = n \right) \quad \text{Relation 7}$$

Cependant, à l'initialisation et chaque fois que nous prenons en compte un changement de caractéristiques du régime de croisière, la relation 5 doit être utilisée.

En résumé, si le délai de livraison est inférieur à l'horizon de programmation du client, la réquisition porte sur la consommation certaine à venir (relation 4) ; dans le cas contraire, elle correspond à la consommation de la période précédente pour ramener la position de stock au niveau de rechargement (relation 7). S'agissant de composants alternatifs montés sur un même poste de la ligne d'assemblage et tous approvisionnés avec le même délai de livraison chez le même fournisseur, le niveau de la commande quotidienne globale de ces composants alternatifs est constant ( $=n$ ) puisque nous sommes en présence d'une loi multinomiale.

Le tableau 2 illustre la passation de commande du moteur 2 dans l'hypothèse d'un approvisionnement lointain ( $\lambda > K$ ), à partir du jour 100. Les demandes ont été générées aléatoirement et le stock initial du début du jour 100 a été fixé arbitrairement (usage de la relation 5 pour le jour 100). Les jours suivants, l'usage des relations 5 et 7 conduit aux mêmes résultats.

Jour	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	
Stock initial					125	101	95	90	74	77	80	100	115	Demande Quotidienne: E(962; 13,29%) $\lambda = 4$
Commande	111	126	132	118	115	135	132	137	134	112	132	112	122	
Livraison					111	126	132	118	115	135	132	137	134	Demande sur 5 jours: N(639.25, 23.54) $\alpha = 0,01\% \rightarrow R = 727$
Demande					135	132	137	134	112	132	112	122	146	
Stock final					101	95	90	74	77	80	100	115	103	

Tableau 2. Exemple de politique calendaire d'approvisionnement

## Programmation périodique du fournisseur

Le fournisseur doit faire en sorte que les livraisons quotidiennes demandées par son client soient honorées de manière quasi-certaine. Il organise la production des composants alternatifs sur un cycle de  $H$  jours au cours duquel chacun des composants est successivement produit. Si  $H$  est inférieur ou égal à  $2h$  (voir figure 1), alors le fournisseur peut produire au cours d'un cycle les quantités exactes qui seront expédiées au cours du cycle suivant et travailler en production synchrone. Dans le cas contraire, qui nous intéresse ici, il doit exploiter au mieux les informations certaines qui lui sont parvenues ( $x_{i,t+\lambda+1}$  à  $x_{i,t+\lambda+h}$ ) et les informations structurelles (probabilités  $p_i$  et niveau  $n$  de production quotidienne du client).

Cette politique calendaire tient compte d'un délai d'obtention moyen  $L_i$  pour le composant  $i$ , la production du composant  $i$  n'étant réputée disponible qu'à la fin de ce délai. Sans perte de généralité, nous supposons que  $L_i$  est un nombre entier de jours et qu'au cours d'une journée plusieurs références peuvent se succéder, un délai d'obtention étant alors partagé par plusieurs références. Dans un cycle commençant en  $t$ , la production du composant  $i$  débute au début en  $t' > t$  si d'autres composants ont été produits avant dans ce cycle (le précédent lancement en production de ce composant avait commencé en  $t'-H$ ). La quantité lancée en production doit garantir qu'entre deux mises à disposition de la production, il n'y ait pratiquement aucune chance de tomber en rupture de stock.

Deux règles de détermination de la production  $q_{it}$  sont possibles. La première utilise toutes les informations disponibles en  $t'_i$  (relations 8)<sup>1</sup> :

$$\text{Règle 1} \quad R_{i,H-h+L_i} = n(H-h+L_i)p_i + t_\alpha \sqrt{n(H-h+L_i)p_i(1-p_i)} \quad \text{Relations 8}$$

$$q_{it'_i} = \sum_{j=1}^h x_{i,t'_i-1+j} + R_{i,H-h+L_i} - S_{it'_i} = \sum_{j=-(H-h)}^{h-1} x_{i,t'_i+j}$$

Cette relation établit qu'en régime de croisière, la quantité à lancer est égale à la somme des  $h$  prochaines livraisons certaines et des  $H-h$  dernières livraisons de valeurs inconnues lors de la précédente décision de lancement prise au début du jour  $t'_i - H$ . Le stock de sécurité que constitue le fournisseur pour le même risque  $\alpha$  pour chacune des références est alors :

$$SS_{i,H-h+L_i} = t_\alpha \sqrt{n} \sum_i \sqrt{(H-h+L_i)p_i(1-p_i)} \quad \text{Relation 9}$$

Cette règle a pour conséquence de conduire à une quantité totale lancée en production variable d'un cycle à un autre ce qui complique l'organisation de la production, alors que les quantités totales expédiées chaque jour sont constantes. Les quantités produites correspondent à un cumul de quantités expédiées sur  $H$  jours consécutifs mais cet ensemble de jours consécutifs n'est pas le même pour toutes les références. Pour stabiliser la production, il faut que cet ensemble de jours consécutifs soit le même pour toutes les références, ce que nous obtiendrons avec la règle 2 qui détermine ces productions au début de la période  $t$  et donc sans tenir compte des informations disponibles entre  $t$  et  $t'_i$ . Soit  $J_i$  le délai d'obtention de la quantité produite du composant  $i$  à partir de  $t$ , nous obtenons les relations 10 en modifiant les relations 8 et 9. La contrepartie de ce lissage de la production est un accroissement du stock de sécurité.

$$R_{i,H-h+J_i} = n(H-h+J_i)p_i + t_\alpha \sqrt{n(H-h+J_i)p_i(1-p_i)}$$

$$\text{Règle 2} \quad q_{it'_i} = \sum_{j=1}^h x_{i,t-1+j} + R_{i,H-h+J_i} - S_{it} = \sum_{j=-(H-h)}^{h-1} x_{i,t+j} \quad \text{Relations 10}$$

$$SS_{i,H-h+J_i} = t_\alpha \sqrt{n} \sum_i \sqrt{(H-h+J_i)p_i(1-p_i)}$$

Avec cette règle 2, le cumul des stocks en  $t$  est constant car la demande totale quotidienne est constante ( $n$ ) et que la relation précédente permet d'écrire :

$$\sum_i S_{it} = \sum_i \sum_{j=1}^h x_{i,t-1+j} + \sum_i R_{i,H-h+J_i} - \sum_i \sum_{j=-(H-h)}^{h-1} x_{i,t+j} = hn + \sum_i R_{i,H-h+J_i} - Hn = \sum_i R_{i,H-h+J_i} - (H-h)n$$

Cette constance du cumul des stocks se poursuit au début des périodes suivantes, tant qu'aucune livraison n'est faite.

Le tableau 3 illustre l'application des règles 1 et 2 en supposant que  $\lambda = 2$ ,  $K = 5$  ou  $6$  ( $h = 3$  ou  $4$ ),  $n = 962$ ,  $H = 5$ . Dans la règle 1, les stocks de sécurité varient en sens inverse de  $h$  : dans l'exemple, l'accroissement d'un jour de la visibilité des demandes fermes permet au fournisseur de gagner 16 % sur le niveau des stocks de sécurité, ce qui fournit des bases à l'évaluation de la valeur de l'information transmise au fournisseur. Le passage de la règle 1 à la règle 2 conduit à un accroissement de 26 %

<sup>1</sup> La seconde formulation de  $q_{it'_i}$  est obtenue en tenant compte du fait que :

$$R_{i,H-h+L_i} = q_{it'_i} + [S_{it'_i} - \sum_{j=1}^h x_{i,t'_i-1+j}] = q_{i,t'_i-H} + [S_{i,t'_i-H} - \sum_{j=1}^h x_{i,t'_i-1-H+j}] \text{ et } S_{it'_i} = S_{i,t'_i-H} - \sum_{j=1}^H x_{i,t'_i-1-H+j} + q_{i,t'_i-H}$$

des stocks de sécurité mais l'augmentation du coût de possession peut être compensée par les économies permises par le passage à une production quotidienne constante.

Moteur $i$	$p_i$	$L_i$	$J_i$	Règle 1 - $h = 3$			Règle 1 - $h = 4$			Règle 2 - $h = 3$		
				$H+L_i-h$	$R_{i,H+L_i}$	$SS_{i,H+L_i}$	$H+L_i-h$	$R_{i,H+L_i}$	$SS_{i,H+L_i}$	$H+L_i-h$	$R_{i,H+L_i}$	$SS_{i,H+L_i}$
1	54.46 %	2	2	4	2211	115.38	3	1672	100.28	4	2211	115.38
2	13.29 %	1	4	3	452	68.45	2	312	56.30	6	864	96.90
3	3.58 %	1	4	3	141	37.68	2	100	31.12	6	260	53.36
4	21.51 %	1	3	3	703	82.22	2	481	67.15	5	1141	106.37
5	5.13 %	1	4	3	193	44.95	2	135	36.30	6	359	62.90
6	2.03 %	1	4	3	87	28.41	2	63	23.94	6	158	40.83
				$\Sigma$	377.09		$\Sigma$	315.09		$\Sigma$	475.74	

Tableau 3. Paramètres des politiques d'approvisionnement testées, niveaux de reapprovisionnement et stock de sécurité

Une simulation des règles 1 et 2 est proposée dans les tableaux 4 et 5, pour  $h = 3$

Période $t$	Moteur 1			Moteur 2			Moteur 3			Moteur 4			Moteur 5			Moteur 6			$\Sigma(\text{Dit})$	$\Sigma(\text{SDit})$	$\Sigma(\text{Qit})$						
	SD1t	Q1t	D1t	SF1t	SD2t	Q2t	D2t	SF2t	SD3t	Q3t	D3t	SF3t	SD4t	Q4t	D4t	SF4t	SD5t	Q5t				D5t	SF5t	SD6t	Q6t	D6t	SF6t
1	1200	2555	520	680	600	0	137	463	200	0	32	168	700	0	204	496	350	0	46	304	90	0	23	67	962	3140	
2	680	0	508	172	463	0	121	342	168	0	35	133	496	0	233	263	304	0	49	255	67	0	16	51	962	2178	
3	2727	0	516	2211	342	0	146	196	133	0	38	95	263	1062	192	71	255	0	51	204	51	0	19	32	962	3771	
4	2211	0	531	1680	196	628	137	59	95	150	30	65	1133	0	205	928	204	146	46	158	32	108	13	19	962	3871	4649
5	1680	0	511	1169	687	0	109	578	215	0	36	179	928	0	225	703	304	0	64	240	127	0	17	110	962	3941	
6	1169	2594	518	651	578	0	126	452	179	0	38	141	703	0	210	493	240	0	47	193	110	0	23	87	962	2979	
7	651	0	534	117	452	0	133	319	141	0	36	105	493	0	203	290	193	0	44	149	87	0	12	75	962	2017	
8	2711	0	500	2211	319	0	137	182	105	0	35	70	290	1058	224	66	149	0	52	97	75	0	14	61	962	3649	
9	2211	0	514	1697	182	628	107	75	70	174	38	32	1124	0	228	896	97	239	50	47	61	86	25	36	962	3745	4779
10	1697	0	550	1147	703	0	119	584	206	0	36	170	896	0	193	703	286	0	50	236	122	0	14	108	962	3910	
11	1147	2653	524	623	584	0	132	452	170	0	29	141	703	0	213	490	236	0	43	193	108	0	21	87	962	2948	
12	623	0	555	68	452	0	120	332	141	0	19	122	490	0	203	287	193	0	49	144	87	0	16	71	962	1986	
13	2721	0	510	2211	332	0	138	194	122	0	33	89	287	1021	205	82	144	0	56	88	71	0	20	51	962	3677	
14	2211	0	526	1685	194	646	132	62	89	164	31	58	1103	0	211	892	88	246	43	45	51	89	19	32	962	3736	4819
15	1685	0	544	1141	708	0	117	591	222	0	41	181	892	0	189	703	291	0	52	239	121	0	19	102	962	3919	
16	1141	2625	509	632	591	0	139	452	181	0	40	141	703	0	213	490	239	0	46	193	102	0	15	87	962	2957	
17	632	0	526	106	452	0	134	318	141	0	33	108	490	0	206	284	193	0	42	151	87	0	21	66	962	1995	
18	2731	0	520	2211	318	0	126	192	108	0	35	73	284	1037	212	72	151	0	48	103	66	0	21	45	962	3658	
19	2211	0	549	1662	192	641	134	58	73	178	23	50	1109	0	201	908	103	213	39	64	45	102	16	29	962	3733	4796
20	1662	0	527	1135	699	0	129	570	228	0	47	181	908	0	205	703	277	0	37	240	131	0	17	114	962	3905	
21	1135	2656	510	625	570	0	118	452	181	0	40	141	703	0	220	483	240	0	47	193	114	0	27	87	962	2943	
22	625	0	521	104	452	0	119	333	141	0	28	113	483	0	222	261	193	0	53	140	87	0	19	68	962	1981	

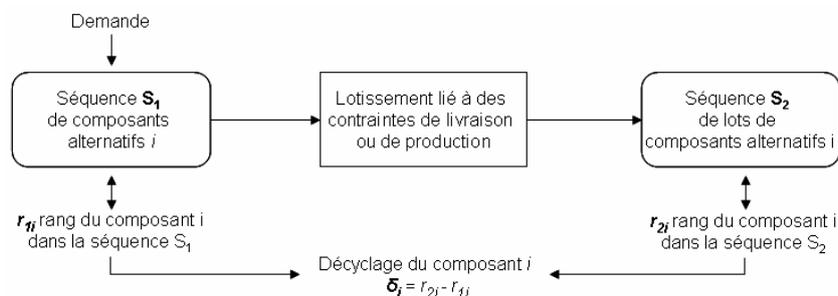
Tableau 4. Simulation de l'utilisation de la règle 1, avec  $h = 3$

Période $t$	Moteur 1			Moteur 2			Moteur 3			Moteur 4			Moteur 5			Moteur 6			$\Sigma(\text{Dit})$	$\Sigma(\text{SDit})$	$\Sigma(\text{Qit})$						
	SD1t	Q1t	D1t	SF1t	SD2t	Q2t	D2t	SF2t	SD3t	Q3t	D3t	SF3t	SD4t	Q4t	D4t	SF4t	SD5t	Q5t				D5t	SF5t	SD6t	Q6t	D6t	SF6t
1	1200	2555	520	680	600	668	137	463	200	165	32	168	700	1070	204	496	350	155	46	304	90	126	23	67	962	3140	4739
2	680	0	508	172	463	0	121	342	168	0	35	133	496	0	233	263	304	0	49	255	67	0	16	51	962	2178	
3	2727	0	516	2211	342	0	146	196	133	0	38	95	263	0	192	71	255	0	51	204	51	0	19	32	962	3771	
4	2211	0	531	1680	196	0	137	59	95	0	30	65	1141	0	205	936	204	0	46	158	32	0	13	19	962	3879	
5	1680	0	511	1169	727	0	109	618	230	0	36	194	936	0	225	711	313	0	64	249	145	0	17	128	962	4031	
6	1169	2594	518	651	618	642	126	492	194	175	38	156	711	1067	210	501	249	253	47	202	128	79	23	105	962	3069	4810
7	651	0	534	117	492	0	133	359	156	0	36	120	501	0	203	298	202	0	44	158	105	0	12	93	962	2107	
8	2711	0	500	2211	359	0	137	222	120	0	35	85	298	0	224	74	158	0	52	106	93	0	14	79	962	3739	
9	2211	0	514	1697	222	0	107	115	85	0	38	47	1141	0	228	913	106	0	50	56	79	0	25	54	962	3844	
10	1697	0	550	1147	757	0	119	638	222	0	36	186	913	0	193	720	309	0	50	259	133	0	14	119	962	4031	
11	1147	2653	524	623	638	616	132	506	186	155	29	157	720	1042	213	507	259	248	43	216	119	96	21	98	962	3069	4810
12	623	0	555	68	506	0	120	386	157	0	19	138	507	0	203	304	216	0	49	167	98	0	16	82	962	2107	
13	2721	0	510	2211	386	0	138	248	138	0	33	105	304	0	205	99	167	0	56	111	82	0	20	62	962	3798	
14	2211	0	526	1685	248	0	132	116	105	0	31	74	1141	0	211	930	111	0	43	68	62	0	19	43	962	3878	
15	1685	0	544	1141	732	0	117	615	229	0	41	188	930	0	189	741	316	0	52	264	139	0	19	120	962	4031	
16	1141	2625	509	632	615	648	139	476	188	180	40	148	741	1031	213	528	264	231	46	218	120	95	15	105	962	3069	4810
17	632	0	526	106	476	0	134	342	148	0	33	115	528	0	206	322	218	0	42	176	105	0	21	84	962	2107	
18	2731	0	520	2211	342	0	126	216	115	0	35	80	322	0	212	110	176	0	48	128	84	0	21	63	962	3770	
19	2211	0	549	1662	216	0	134	82	80	0	23	57	1141	0	201	940	128	0	39	89	63	0	16	47	962	3839	
20	1662	0	527	1135	730	0	129	601	237	0	47	190	940	0	205	735	320										

La demande de composants alternatifs du client est exprimée sous la forme d'une liste ordonnée de composants, mise à jour de manière continue. Le client est livré périodiquement (périodicité  $\theta$ ) de la commande de  $M$  composants passée antérieurement (décalage  $\lambda$ ). Les contraintes de conditionnement peuvent conduire à imposer de regrouper les références livrées par lots de  $m$  composants identiques, ce qui conduit à une livraison de  $\gamma = M/m$  lots. Ce lotissement a deux conséquences. A l'arrivée de chaque livraison, un travail de reconstitution de la séquence de  $M$  composants alternatifs respectant l'ordre de montage doit être réalisé. L'ensemble des  $M$  composants livrés n'a pratiquement aucune chance de coïncider avec celui qui sera monté ; le nombre de composants manquants correspondant à celui des composants excédentaires. Il faudra donc disposer, pour chaque composant, d'un stock de sécurité. Il est utile, pour comprendre les résultats que nous allons trouver, d'explicitier la distribution de probabilité du décyclage d'un composant, la variable étudiée correspondant au nombre de rangs gagnés ou perdus à la livraison pour un composant alternatif quelconque, par rapport à la demande du montage.

Avant de passer à cette étude, il convient de noter qu'un mécanisme identique peut être observé chez le fournisseur. Sa demande à satisfaire porte sur  $\gamma$  lots. Certaines contraintes techniques peuvent conduire à une programmation de la production du fournisseur en une succession de séquences de  $\nu$  lots ne portant pas nécessairement sur le même composant alternatif mais partageant tous une même caractéristique comme celle de comporter un même composant élémentaire (par exemple, même carter utilisé par plusieurs moteurs). Ce lotissement est un peu plus complexe, puisqu'il n'implique pas l'homogénéité mais il se traduit, comme précédemment, par l'observation d'un décyclage et la nécessité, pour le fournisseur cette fois, de disposer d'un stock de sécurité de produits finis lui permettant de répondre exactement à la demande.

Dans les deux cas, l'application de règles de lotissement pour répondre à une demande certaine conduit à des décyclages (figure 2) et à l'obligation d'utiliser des stocks de sécurité pour éviter toute rupture de stock. Un phénomène de décyclage similaire a été modélisé par Giard *et al.* (2001a, 2001b) lors du traitement de problème de qualité sur une ligne de production de véhicules conduisant au retrait des véhicules à retoucher pendant une durée variable avant réinjection sur la ligne. Nous retenons leur définition du décyclage comme étant « la différence, positive, négative ou nulle, entre le rang final d'une unité à la sortie du poste de contrôle et son rang initial à l'entrée de ce poste (un décyclage négatif correspondant alors à une avance) ».



**Figure 2.** Origine des décyclages

Il importe de préciser que tout décyclage n'entraîne pas systématiquement une rupture de stock chez le client et donc la constitution d'un stock de sécurité : les livraisons du fournisseur au client se font par tournées (livraisons de  $\gamma$  lots à intervalle  $\theta$ ), ce n'est donc pas la séquence  $S_2$  qui détermine les ruptures mais la constitution du groupe

formé par les  $\gamma$  lots produits et en stock, des permutations à l'intérieur étant possibles sans conséquence.

Le mécanisme de lotissement peut se faire de deux façons : soit nous ne prenons en compte que la partie ferme de  $S_1(K)$ , c'est-à-dire que nous attendons d'avoir un lot complet de demandes connues de façon certaine pour positionner celui-ci dans  $S_2$  ; soit nous décidons de lancer un lot dès qu'une demande d'un composant est présente dans  $S_1$ , ce qui revient implicitement à prendre en considération un film de longueur infinie. Si nous nous limitons à la prise en compte de  $K$ , la probabilité pour le premier composant alternatif  $i$  non encore lancé que nous ne puissions pas compléter son lot de  $m$  composants (i.e. sa probabilité d'être en rupture de stock) avec des demandes connues sur un film ferme restant de  $\omega$  composants est donné par la loi binomiale négative  $\mathcal{BN}(m-1, \omega, p_i)$ . Elle peut être significative (par exemple le risque de ne pas pouvoir compléter un lot de 6 moteurs 4,  $p_4 = 0.9\%$ , avec un film restant de 1000 véhicules est de 11,3 %) et conduire, en toute logique, à retarder la passation de commande, provoquant alors une rupture de stock. Cette situation étant inacceptable pour le client la seconde technique de lotissement est nécessairement retenue.

## Analyse des décyclages induits par un lotissement

Les simulations de ce second exemple industriel, réalisées avec le logiciel Simul8, portent sur une séquence générée aléatoirement de trois millions de moteurs respectant la distribution de probabilité du tableau 1. Les 12000 premiers composants sont exclus de la simulation car ils représentent le régime transitoire avant le régime de croisière qui nous intéresse. La règle de création de  $S_2$  est la suivante concernant le traitement du véhicule de rang  $y$  dans la séquence  $S_1$  :

- Si le moteur de ce véhicule est en stock, le moteur demandé est pris dans le stock dont le niveau baisse de 1
- Sinon, un lot de 6 moteurs correspondant au moteur de ce véhicule est lancé en fabrication, le moteur demandé est pris dans le stock dont le niveau passe à 5
- Passer au véhicule de rang  $y + 1$  de  $S_1$ .

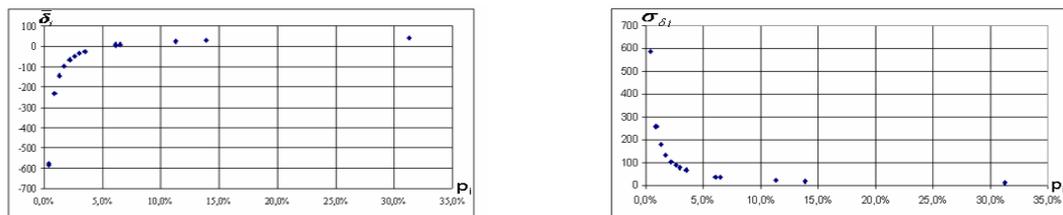
Nous pouvons dresser le tableau récapitulatif, pour chaque moteur  $E_i$  des probabilités d'utilisation  $p_i$ , des moyennes  $\bar{\delta}_i$  des décyclages pour chaque moteur, des écarts-types  $\sigma_{\delta_i}$  des décyclages pour chaque moteur et des stocks de sécurité  $SS_i$  nécessaires pour ne pas être en rupture de stock :

Moteur $E_i$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$	$E_{15}$	$E_{16}$	$E_{17}$	$E_{18}$	$E_{19}$
$p_i$	1.7%	6.1%	2.2%	0.9%	0.9%	31.3%	13.9%	1.3%	0.9%	0.4%	0.4%	0.9%	3.0%	6.5%	6.1	3.5	6.1%	11.3%	2.6%
$\bar{\delta}_i$	-98,73	6,99	-65,20	-230,57	-230,57	39,40	29,44	-145,72	-230,45	-576,22	-586,68	-229,12	-36,57	8,95	7,52	-24,64	6,40	25,20	-48,29
$\sigma_{\delta_i}$	134,62	36,88	103,10	257,68	258,46	9,13	16,75	178,10	259,09	585,75	588,51	256,36	76,30	34,62	36,12	65,44	36,80	20,18	87,62
$SS_i$	5	10	6	4	4	33	17	5	4	3	3	5	8	11	11	8	10	16	8

**Tableau 6.** Données, espérances, écarts-types des décyclages et stocks de sécurité par moteur

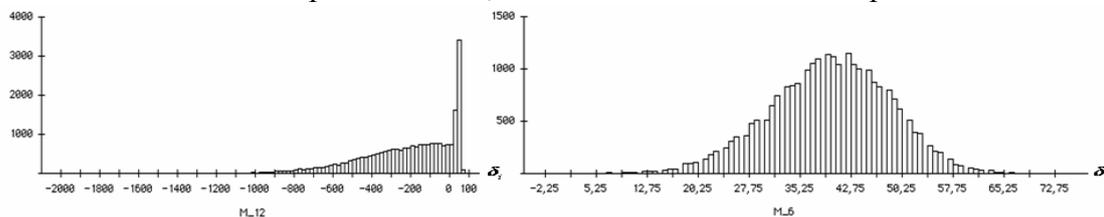
Avec les notations de la figure 2, une valeur négative de  $\delta_i$  signifie que le moteur venant d'arriver est en avance par rapport à l'arrivée du véhicule sur lequel il doit être monté ; une valeur positive signifie que le moteur est arrivé en retard par rapport au véhicule sur lequel il est monté, ce qui a conduit à faire appel au stock de sécurité. En univers certain avec des livraisons conformes aux réquisitions, le lotissement génère des décyclages et des stocks de sécurité sont nécessaires pour éviter tout arrêt de ligne. Ces stocks sont alimentés par les moteurs arrivant trop tôt (qui viennent

diminuer le stock de sécurité à constituer) et par les moteurs arrivant en retard (qui viennent reconstituer le stock de sécurité). La somme pondérée des décyclages moyens  $\overline{\delta}_i$  par probabilités d'utilisation  $p_i$  est nulle<sup>2</sup>. Les courbes de décyclage des moteurs ne sont pas identiques : on observe que l'espérance mathématique du décyclage des moteurs varie dans le même sens que la probabilité de montage d'un moteur tandis que les écarts-types des décyclages varient en sens inverse de la probabilité de montage d'un moteur (figure 3). Les moteurs peu demandés sont donc livrés plutôt en avance, tandis que ceux fortement demandés sont livrés plutôt en retard. Il s'ensuit que les moteurs peu demandés sont livrés plutôt en avance mais l'importance de leurs dispersions conduit à créer des stocks de sécurité ; les moteurs fortement demandés sont livrés plutôt en retard mais la faible dispersion observée limite le besoin en stock de sécurité.



**Figure 3.** Evolution de l'espérance mathématique et de l'écart-type des décyclages des moteurs en fonction de leurs probabilités  $p_i$  de montage

Les fonctions de décyclage dépendent à la fois du nombre  $I$  de moteurs ( $i = 1, \dots, I$ ) et de la distribution des probabilités  $p_i$  ; la figure 4 illustre le cas d'un moteur peu demandé et du moteur le plus demandé, les échelles utilisées n'étant pas les mêmes.



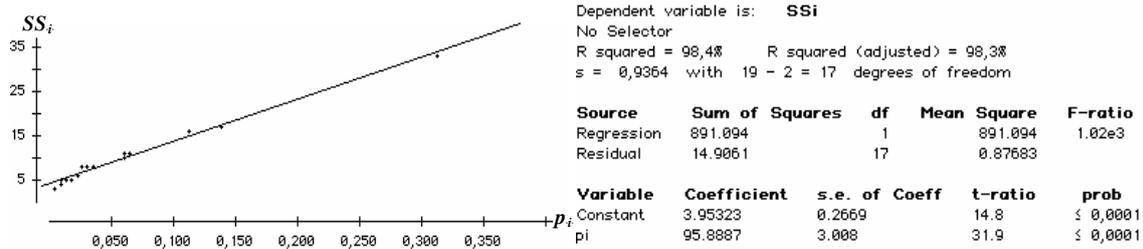
**Figure 4.** Courbes de décyclages des moteurs  $E_{12}$  ( $p_{12} = 0,9\%$  ;  $\overline{\delta}_{12} = -229$ ) et  $E_6$  ( $p_6 = 31,3\%$  ;  $\overline{\delta}_6 = 39,4$ )

## Détermination des stocks de sécurité du client destinés à contrer les effets du lotissement de ses approvisionnements

En univers certain, les stocks de sécurité sont fonction des décyclages et de l'intervalle de livraison  $\theta$ , les décyclages étant eux-mêmes fonction de la variété  $I$  des moteurs et des probabilités de montage  $p_i$  ; il n'existe pas de solution analytique au calcul des stocks de sécurité. Une évaluation de leurs niveaux ne peut se faire que par une approche par simulation du régime de croisière. Au début de la simulation, les quantités disponibles des composants alternatifs chez le client sont fixées à une valeur  $W$ . La première livraison s'effectue immédiatement avant le prélèvement du premier composant, cette première livraison correspond aux  $\theta$  premiers composants de la

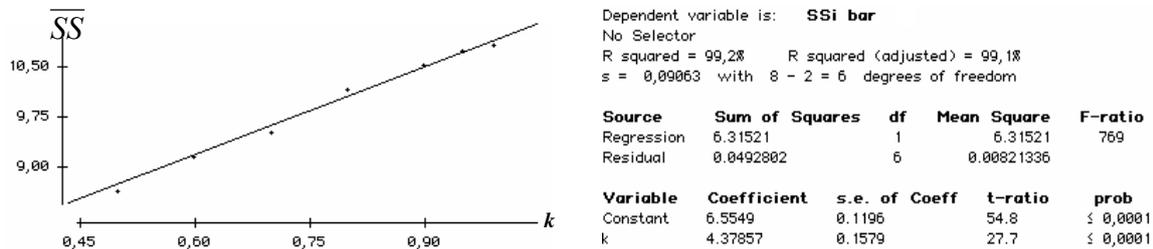
<sup>2</sup> En régime de croisière, il y a nécessairement compensation entre les rangs gagnés et les rangs perdus. Sur un échantillon, la moyenne observée (ici  $\overline{\delta}_i$ ) ne coïncide qu'exceptionnellement avec l'espérance mathématique (0).

séquence  $S_2$  et le premier composant prélevé correspondant au premier composant de la séquence  $S_1$ . Chaque simulation a porté sur le montage de six millions de composants, afin d'obtenir empiriquement des stocks de sécurité  $SS_i$  ayant une probabilité négligeable de conduire à une rupture de stock. Le niveau de chaque stock de sécurité est calculé comme la différence entre  $W$  et la position de stock la plus faible au cours de la simulation, étant entendu que  $W$  doit être assez grand pour que cette position de stock ne devienne jamais nulle. On observe que le stock de sécurité varie dans le même sens que les probabilités (figure 5), ce qui n'avait rien d'évident a priori. Dans l'exemple industriel utilisé, nous constatons une relation approximativement linéaire ( $\hat{\rho}^2 = 0.983$  ;  $SS_i = 0.95889 p_i + 3.008$ )



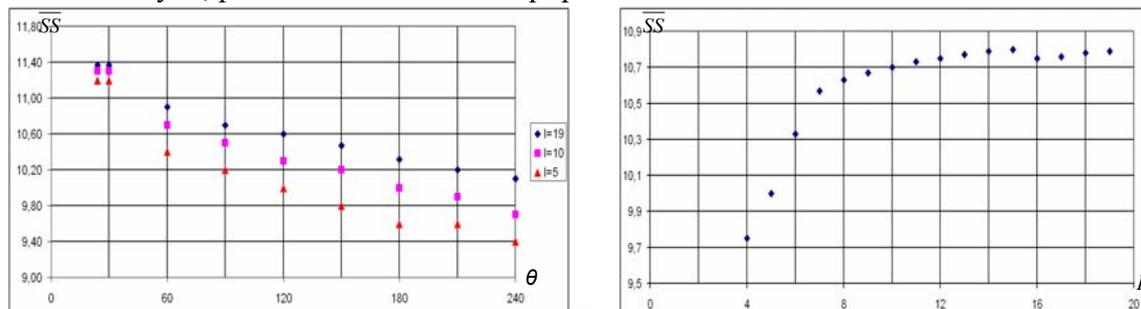
**Figure 5.** Evolution du stock de sécurité  $SS_i$  en fonction des probabilités  $p_i$  de montage des moteurs

On peut penser que la dispersion des probabilités a une influence sur le niveau de stock de sécurité. Nous avons donc procédé à de nouvelles simulations en remplaçant les probabilités du tableau 6 par des distributions du type  $p_i = p_1 \times k^{i-1} + b$  avec  $b = 0.005$  (asymptote),  $k$  étant le coefficient de décroissance sous contrôle (plus  $k$  est proche de 1, plus il y a équirépartition). Nous obtenons une relation approximativement linéaire ( $\hat{\rho}^2 = 0.991$  ;  $\overline{SS} = 0.0438 k + 0.1579$ )



**Figure 6.** Evolution du stock de sécurité moyen  $\overline{SS}$  en fonction de  $k$

Nous avons procédé ensuite à une étude de l'impact de la périodicité d'approvisionnement en effectuant successivement la même simulation pour différentes valeurs de  $\theta$ . Cette analyse a été conduite en utilisant trois structures de demande avec 5, 10 et 19 composants alternatifs et équiprobabilité. Nous avons enfin effectué une analyse plus approfondie de l'impact de la variété  $I$  sur le stock de sécurité moyen, pour des distributions équiprobables.



**Figure 7.** Evolution du stock de sécurité moyen  $\overline{SS}$  en fonction de  $\theta$  pour différentes valeurs de  $I$

Les stocks de sécurité sont également fonction d'autres sources d'aléas : des problèmes de qualité si nous nous plaçons dans un contexte de production, d'aléas de transport ou de perturbations de la séquence certaine des demandes finales dans un contexte de livraison... Une combinaison de perturbations se traduit par une mutualisation des risques ; donc le stock de sécurité pour faire face à plusieurs perturbations est inférieur à la somme des stocks de sécurité nécessaires si les perturbations sont prises indépendamment les unes des autres.

## 5. Conclusion

Nous avons étudié la coordination entre les deux derniers maillons d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. L'exploitation de l'information ferme séquencée combinée à celle de la connaissance de la structure de la demande modifie les politiques classiques de pilotage des flux et permet d'en améliorer l'efficacité et l'efficience. La prise en compte de contraintes de lotissement oblige à créer des stocks de sécurité ; les facteurs explicatifs de leur importance ont été analysés et la démarche de leur détermination a été exposée. Tous ces éléments prennent de l'importance dans le contexte de la dispersion géographique croissante des maillons des grandes chaînes logistiques mondiales.

## 6. Références bibliographiques

Axsäter S. (1993), Exact and approximate evaluation of batch-ordering policies for two-level inventory systems, *Operations research*, vol. 41, issue 4, p777-785.

Anderson D. & Pine J. (1997), *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.

Bourland K., Powell S. & Pyke D. (1996), Exploiting timely demand information to reduce inventories, *European journal of operational research*, vol.92, p239-253.

Burlat P. & Campagne JP. (2001), *Performance industrielle et gestion des flux*, Hermès-Lavoisier.

Cachon G. & Fisher M. (1997), Campbell Soup's continuous product replenishment program : evaluation and enhanced decision rules, *Production and operations management*, vol.6, issue 3, p. 266-276.

Cachon G. & Fisher M. (2000), Supply chain inventory management and the value of shared information, *Management science*, vol. 46, issue 8, p1032-1048.

Cachon G. & Lariviere M. (2005), Supply chain coordination with revenue sharing : strength and limitations, *Management science*, vol. 51, issue 1, p30-44.

Chen F. (1998), Echelon reorder points, installation reorder points, and the value of centralized demand information, *Management science*, vol.44, issue 12, pS221-S234.

Chen F. & Samroengraja R. (2000), A staggered ordering policy for one-warehouse, multiretailer systems, *Operations research*, vol.48, issue 2, p281-293.

- Disney S. & Towill D. (2003), The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains, *International journal of production economics*, vol.85, issue 2, p199-215.
- Emmons H. & Gilbert S. (1998), The role of returns policies in pricing and inventory decisions for catalogue goods, *Management science*, vol. 44, issue 6, p276-283.
- Forslund H. & Jonsson P. (2007), The impact of forecast information quality on supply chain performance, *International journal of operations & production management*, vol. 27, issue 1, p90-107.
- Gavirneni S., Kapuscinski R. & Tayur S. (1999), Value of information in capacitated supply chains, *Management science*, vol.45, issue 1, p16-24.
- Gerchak Y. & Wang Y. (2004), Revenue-sharing vs. wholesale price contracts in assembly systems with random demand, *Production and operations management*, vol. 13 issue 1, p23-33.
- Giard V., Danjou F. & Boctor F. (2001a), Rank changes in production/assembly lines : impact and analysis, *3<sup>e</sup> congrès international de Génie Industriel*.
- Giard V., Danjou F. & Boctor F. (2001b), Analyse théorique des décyclages sur lignes de production, *Journal européen des systèmes automatisés*, vol. 35, issue 5, p623- 45.
- Giard V.(2003), *Gestion de la production et des flux*, Economica.
- Giard V. & Mendy F. (2008), Exploitation of the knowledge of the final demand in the piloting of a logistics chain, *Production planning and control*. (à paraître)
- Goldratt E. & Cox J. (1984), *The goal*, North river press.
- Graves S. (1996), A multiechelon inventory model with fixed replenishment intervals, *Management science*, vol. 42, issue 1, p1-18.
- Hariharan R. & Zipkin P. (1995), Customer-order information, lead-times and inventories, *Management science*, vol. 41, issue 10, p1599-1607.
- Kouvelis P., Chambers C. & Wang H. (2006), Supply chain management research and production and operations management : review, trends, and opportunities, *Production and operations management*, vol. 15, issue 3, p449-469.
- Lee H. & Tang K. (2000), The value of information sharing in a two-level supply chain, *Management science*, vol. 46, issue 5, p626-643.
- Lee H. & Whang S. (2000), Information sharing in a supply chain, *International journal of technology management*, vol.20, issue 3/4, p373-387.
- Medan M. & Gratacap A. (2008), *Logistique et supply chain management*, Dunod.
- Viswanathan S., Widiarta H. & Piplani R. (2007), Value of information exchange and synchronization in a multi-tier supply chain, *International journal of production research*, vol. 45, issue 21, p5057-5074.
- White C. & Wilson R. (1977), Sequence dependent set-up times and job sequencing, *International journal of production research*, vol. 15, issue 2, p191-202.
- Zhang H. (2002), Vertical information exchange in a supply chain with duopoly retailers, *Production and operations management*, vol. 11, issue 4, p531-546.
- Zou X., Pokharel S. & Piplani R. (2004), Channel coordination in an assembly system facing uncertain demand with synchronized processing time and delivery quantity, *International journal of production research*, vol.42, issue 22, p4673-4689.