

Intégration des décisions de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité pour une chaîne d'approvisionnement à trois échelons

RACHED HLIOUI¹, ALI GHARBI¹, ADNÈNE HAJJI²

¹ DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, LABORATOIRE DE CONCEPTION ET CONTRÔLE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION
1100, Rue Notre-Dame Ouest, Montréal, QC, H3C 1K3, Canada
rached.hlioui.1@ens.etsmtl.ca, Ali.Gharbi@etsmtl.ca

² DÉPARTEMENT OPÉRATIONS ET SYSTÈMES DE DÉCISION ET CIRRELT
Pavillon Palasis-Prince 2325, Rue de la Terrasse, Québec, QC, G1V 0A6, Canada
Adnene.Hajji@fsa.ulaval.ca

Résumé – Cet article s'intéresse à la problématique de la coordination des décisions de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité de la matière première pour assurer la gestion d'une chaîne d'approvisionnement à trois échelons. Le manufacturier lance une commande de matière première de son fournisseur. Cette matière sera transformée en produit fini. Par la suite, elle sera livrée au client final. À la réception du lot, le manufacturier contrôle sa qualité par un plan d'échantillonnage simple et décide de l'accepter ou de le refuser. En cas de refus, le lot peut être soit inspecté à 100% (politique 100%) ou bien retourner chez le fournisseur (politique Retour). Ce travail a deux objectifs : le premier est de développer une politique de contrôle intégrant les décisions de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité qui minimise le coût total. Le deuxième est de déterminer la meilleure décision vis-à-vis le lot refusé. Pour résoudre ce problème, une approche expérimentale combinant la simulation, le plan d'expérience et la méthode des surfaces de réponse a été appliquée. Les résultats montrent que selon les paramètres de la chaîne, la politique 100% ou Retour peut être choisi.

Abstract – This article considers the problem of coordination of production, replenishment and quality inspection decisions in a three stage supply chain. The manufacturer orders a lot of raw materials from its supplier. This material will be transformed into finished product. Thereafter, it will be delivered to the customer. At the reception, the manufacturer applies a single sampling plan to control the quality of the lot and decides to accept or to reject it. When the lot is rejected, the lot may be 100% inspected (100% policy) or returned to supplier (Return policy). This work has two objectives: the first one is to determine control policy for an integrated production-replenishment- quality control decision that minimizes the total cost. The second one is to determine the best quality control policy when a lot is refused. To solve this problem, an experimental approach combining simulation, experimental design and Response Surface Methodology has been applied. The obtained results show that depending on the supply chain parameters, 100% or Return policy could be more preferred than the other.

Mots clés – commande optimale stochastique, plan d'échantillonnage, chaîne d'approvisionnement, simulation.

Keywords – stochastic optimal control, acceptance sampling, supply chain, simulation.

1 INTRODUCTION

Pour assurer une meilleure compétitivité, les industriels ont besoin d'une gestion adéquate de leur chaîne d'approvisionnement. Plusieurs études ont montré que les modèles de prise de décision intégrant les opérations d'approvisionnement en matière première avec les activités de fabrication assurent des performances meilleures qu'une planification séparée [Lee, 2005]. Dans ce contexte, [Mukhopadhyay and Ma, 2009] ont déterminé la structure

optimale des décisions d'approvisionnement et de production pour un système hybride de production retraitement « production/ remanufacturing ». [Pal et al., 2012] ont optimisé le taux de production et la taille du lot à commander pour une chaîne d'approvisionnement formée par un manufacturier, un fournisseur et un détaillant. [Sajadieh et al., 2013] ont considéré une chaîne d'approvisionnement à trois échelons avec des délais de livraison stochastiques. [Sana et al., 2014] ont étudié une chaîne d'approvisionnement à trois échelons formé par plusieurs fournisseurs, plusieurs manufacturiers et plusieurs détaillants.

Dans leur étude, ils ont montré qu'un système collaboratif « Collaborating system » assure un meilleur résultat que l'approche de Stakelberg. Cependant, malgré la précieuse contribution de ces travaux à la littérature scientifique, ces modèles ne considèrent pas l'évolution dynamique des activités de fabrication et son l'impact sur l'ensemble des décisions.

De nombreuses études ont abordé le problème dans un contexte stochastique dynamique où la théorie de commande était l'une des approches les plus importantes. Dans le cadre du problème de la planification des systèmes de fabrication non-fiables, plusieurs approches ont été développées en se basant sur la politique à seuil critique (HPP) [Kenné et Charbi, 2000]. Cette politique consiste à créer un stock de sécurité (surplus d'inventaires) et de le maintenir afin de satisfaire la demande lorsque le système n'est plus disponible. [Pellerin et al., 2009] ont développé une politique de production pour des systèmes de retraitement avec des taux de production multiples. [Kouedou et al., 2011] ont déterminé une politique de contrôle intégrant les décisions de maintenance préventive et corrective avec les activités de production. [Bouslah et al., 2012] ont étudié un système de production par lot avec des délais de transport des produits finis vers le stock final.

S'inspirant de travail de [Lee, 2005], [Hajji et al., 2009] ont considéré une chaîne à trois échelons, composée par un fournisseur et un manufacturier soumis à des périodes de disponibilité et de non-disponibilité et un client final. [Song, 2009] a déterminé la politique optimale intégrant les décisions d'approvisionnement et de production pour une chaîne d'approvisionnement dans le cas d'un délai de livraison, d'un délai de traitement et d'une demande stochastiques. [Berthaut et al., 2009] ont étudié un problème de coordination des décisions d'approvisionnement et de production pour des systèmes de retraitement. Ils ont montré que la politique optimale de production suit une politique de seuil critique multiple (MHP) et que la politique d'approvisionnement est de type (s, Q). [Hajji et al., 2011] ont traité l'impact des délais d'approvisionnement aléatoires sur les prises des décisions d'approvisionnement et de production. Ils ont démontré que la politique de commande optimale de la production est de type seuil critique (HPP) et que la politique d'approvisionnement est de type (s, Q). Dans son livre, [Song, 2013] a présenté les politiques optimales de production et d'approvisionnement pour plusieurs types de chaînes d'approvisionnement tel que des chaînes avec des opérations d'assemblage, des chaînes traitant plusieurs produits, etc. Cependant, ces auteurs ont assumé que la qualité de la matière première du lot reçu depuis le fournisseur est parfaite. En faite, cette hypothèse n'est pas réaliste comme il a été soutenu par de nombreuses études [Konstantaras et al., 2012] et [Khan et al., 2014]. Un lot livré peut contenir une fraction d'items non-conformes. Ainsi, une opération d'inspection à la réception d'un lot de matière première s'avère une étape très importante.

Cet article propose d'étudier la question d'intégration de la production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité de la matière première pour une chaîne d'approvisionnement à trois échelons (fournisseur-manufacturier-client final). À la réception, le manufacturier applique un contrôle de qualité par un plan d'échantillonnage simple. En fait, une telle politique a été largement adoptée dans l'industrie [Schilling and Neubauer, 2009]. [Starbird, 1997] a examiné l'impact du plan d'échantillonnage simple par attribut sur la qualité et les décisions de production du fournisseur. [Ben-daya and Morman,

2008] ont appliqué un plan d'échantillonnage avec attribut pour contrôler la qualité de la matière livrée. Dans ce travail, ils ont considéré deux modèles : le premier est que les items seront écartés avec une décision de non-remplacement, alors que la deuxième est qu'ils seront remplacés par des produits de bonne qualité. [Hsu and Hsu, 2012] ont pour leur part conçu un modèle économique afin de déterminer le plan d'échantillonnage optimal, en présence des risques du vendeur et de l'acheteur. [Moussawi-Haidar et al., 2013] ont déterminé simultanément la taille de lot optimale à commander, le point de commande et les paramètres du plan d'échantillonnage. [Wan et al., 2013] ont considéré que la qualité des produits reçus par le fournisseur est mesurée par une variable continue qui suit une distribution normale. Plus récemment, quelques travaux ont étudié le problème de la chaîne d'approvisionnement avec de la matière première non conforme. Cependant, ils ont mis l'accent seulement sur une politique d'inspection complète à la réception. Lorsqu'un plan d'échantillonnage est appliqué, le lot de la matière première inspecté peut être refusé. Ce lot peut être soit inspecter à 100% ou bien retourner au fournisseur [Schilling and Neubauer, 2009]. Une décision d'inspection à 100 % assurera la présence continue de la matière première. Cependant, le décideur doit supporter des coûts additionnels d'inspection et de stockage en matière première. Une décision de retour au fournisseur d'un lot rejeté permettra au décideur d'exclure ces coûts, mais elle augmentera des délais de livraison de la matière première et ainsi le risque d'interruption du processus de production. Face à ce dilemme, nous proposons d'étudier ces deux politiques avec les activités de production et d'approvisionnement pour déterminer celle qui assure le meilleur contrôle à un coût minimal.

La structure de cet article est la suivante. La section 2 présente les notations et la chaîne d'approvisionnement à étudier. La section 3 décrit les politiques de contrôle. La section 4 décrit l'approche expérimentale de résolution. La section 5 présente un exemple numérique et une analyse de sensibilité. Nous présentons, dans la section 6, une analyse comparative. Enfin, nous terminerons par une conclusion dans la section 7.

2 FORMULATION DU PROBLEME

2.1 Notation

c	: Critère d'acceptation
c_R	: Coût unitaire d'achat de matière première
c_R^+	: Coût unitaire de stockage de matière première
c_{RF}^T	: Coût unitaire de production
c_F^+	: Coût unitaire de stockage du produit fini
c_F^-	: Coût unitaire de pénurie en produit fini
c_{insp}	: Coût unitaire d'inspection
c_{rect}^R	: Coût unitaire de rectification
c_{rep}^F	: Coût unitaire de remplacement d'item non-conforme vendu au client
dem	: Taux de la demande en produit fini
n	: Taille de l'échantillon
p	: Pourcentage d'items non-conformes de matière première dans un lot livré
p_s	: Pourcentage d'items non-conformes de produit fini produit
P_a	: Probabilité d'acceptation d'un lot de matière première après échantillonnage
Q	: Taille du lot de la matière première

- s : Point de commande de la matière première
- u^{max} : Taux de production maximal
- W : Coût de lancement de commande en matière première
- $x(t)$: Niveau d'inventaire de la matière première à l'instant t
- $y(t)$: Niveau d'inventaire du produit fini à l'instant t
- τ_{insp} : Temps unitaire d'inspection de la matière première
- τ_{rect} : Temps unitaire de rectification d'item non-conforme
- δ : Délai de livraison de la matière première

2.2 Description du problème

Nous étudierons une chaîne d'approvisionnement composée par un fournisseur, un système manufacturier et un client final (Figure 1). Le manufacturier lance une commande de matière première de son fournisseur. Cette matière sera transformée en produit fini. Par la suite, elle sera livrée au client final. Le fournisseur livre, sous forme d'un lot, la commande du manufacturier après un délai de livraison aléatoire. Il est assumé que chaque lot contient une proportion d'items non-conformes p et que le manufacturier peut être non-disponible en raison de défaillances et des opérations de réparation.

À la réception, le manufacturier applique un contrôle de qualité par un plan d'échantillonnage simple pour décider de l'accepter ou de le refuser. Ce plan est caractérisé par deux paramètres : la taille de l'échantillon n et le critère de l'acceptation c . La durée d'inspection d'un échantillon est $n \cdot \tau_{insp}$, avec τ_{insp} le délai d'inspection unitaire. Si le nombre des items non-conformes d dans l'échantillon dépasse le critère c , le lot est refusé. Sinon, le lot sera accepté. La décision d'acceptation ou de refus peut être exprimée par la probabilité d'acceptation P_a [Schilling and Neubauer, 2009] dont la formule est :

$$P_a = P\{d \leq c\} = \sum_{d=0}^c \frac{n!}{d!(n-d)!} p^d (1-p)^{n-d} \quad (1)$$

Dans cet article, nous considérons deux politiques de contrôle de qualité lorsqu'un lot est rejeté :

- Option 1 (Politique 100%): À la réception du lot, un échantillon n est inspecté. Si le lot est accepté, les d items non conformes seront rectifiés avec un délai $d \cdot \tau_{rect}$, avec τ_{rect} le délai de rectification unitaire. Si le lot est rejeté, le manufacturier procédera à un contrôle à 100% pour rectifier les $(p \cdot Q - d)$ restants. La durée totale de l'opération de contrôle à 100% est de $(Q - n) \tau_{insp}$ et celle de rectification est de $p \cdot Q \cdot \tau_{rect}$.
- Option 2 (Politique Retour): le lot rejeté est retourné au fournisseur pour être remplacé. On assume que le nouveau lot sera livré après un délai de livraison additionnel δ .

Selon la politique de contrôle de la qualité adoptée, la qualité moyenne de la matière première après contrôle peut être déterminée par l'équation 2 [Schilling and Neubauer, 2009]. Dans ce travail, nous assumons que le système manufacturier peut produire une proportion p_s de produit fini non-conforme. Vu qu'une proportion d'items non-conformes peut être vendue au client final, nous assumons aussi que ce client peut détecter

ces produits et les retourner tout en exigeant un remplacement avec un coût c_{rep}^f par unité.

$$AOQ = \begin{cases} AOQ_{100\%} = \frac{P_a \cdot p(Q-n)}{Q} \\ AOQ_{Retour} = p \end{cases} \quad (2)$$

Étant donné l'aspect stochastique de notre système, nous devons caractériser son état à chaque instant t . Ainsi, nous aurons besoin de trois composantes : (1) Une composante discrète $\beta(t)$ pour décrire l'état du système manufacturier ($\beta(t) = 1$, si le système est disponible; $\beta(t) = 0$, si le système est non-disponible). (2) Une première composante continue $x(t)$ pour exprimer le niveau d'inventaire en matière première. Cette partie fait face en aval à une demande continue (le taux de production du manufacturier u) et en amont à la quantité commandée. (3) Une deuxième composante continue $y(t)$ pour exprimer le niveau de surplus cumulatif en produit fini (elle représente un inventaire si sa valeur est positive et une pénurie si sa valeur est négative).

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= u(t, \beta) - \frac{dem}{(1 - AOQ) \cdot (1 - p_s)}, \\ y(0) &= y_0 \quad \forall t \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{x}(t) = -u(t, \beta), x(0) = x_0 \quad \forall t \in]\xi_i, \xi_{i+1}[\quad (4)$$

$$x(\xi_i^+) = x(\xi_i^-) + Q_i \quad \forall i = 1 \dots N \quad (5)$$

y_0, x_0 représentent respectivement la valeur initiale du stock du produit fini et de matière première, dem représente la demande du client, $u(t, \beta)$ représente le taux de la production à un état donné de système β , AOQ représente la qualité moyenne de la matière première après contrôle, et ξ_i^-, ξ_i^+ représentent respectivement la borne inférieure et supérieure des N instants de réception du lot de matière première.

Dans un contexte stochastique et dynamique, [Hajji et al., 2011] ont étudié cette classe de problème, mais sans tenir en considération la qualité des produits. Vu la complexité de la structure des équations à optimiser, les auteurs ont appliqué : en premier lieu, une approche numérique pour déterminer la structure de la politique de contrôle d'un problème intégrant les décisions de production et d'approvisionnement. Et, en deuxième lieu, une approche de résolution expérimentale. Ils ont montré que la politique optimale de production est sous la forme d'une politique de seuil critique (HPP), alors que la politique d'approvisionnement est de la forme (s, Q) . La politique HPP consiste à maintenir la position d'inventaire en produit fini pour que ce stock continue à satisfaire la demande lorsque le système de production est non-disponible. La politique (s, Q) consiste à commander un lot économique de matière première de taille Q à chaque fois que le niveau d'inventaire en amant atteint le niveau s .

3 STRUCTURE DES POLITIQUES DE CONTROLE

L'objectif de ce travail est de déterminer la politique de production $u(\cdot)$, la politique d'approvisionnement $\Omega(\cdot)$ et la meilleure politique de contrôle de qualité à la réception (politique 100% ou Retour). Selon [Hajji et al., 2011], la politique de production est une politique de seuil critique (HPP),

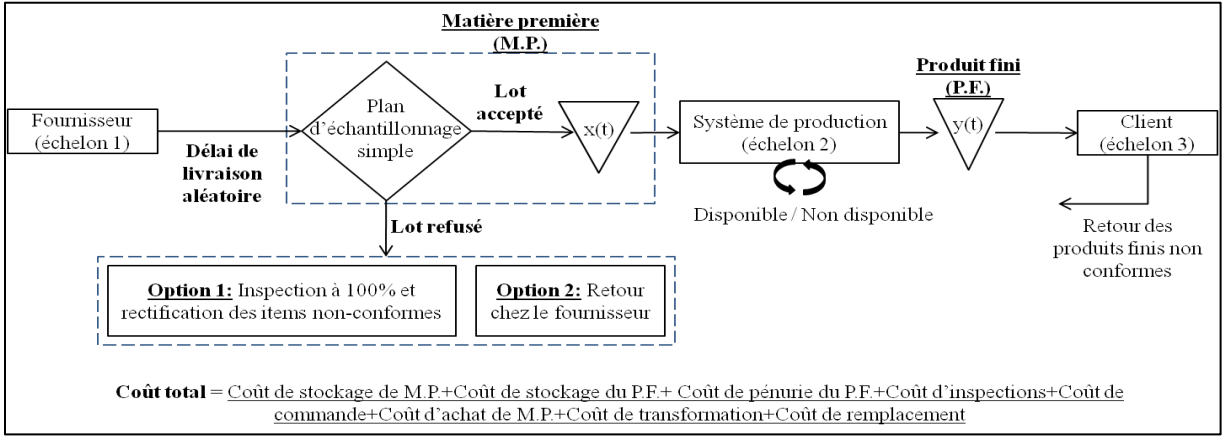


Figure 1. Structure de la chaîne d'approvisionnement à trois échelons

alors que la politique d'approvisionnement est de type (s,Q). Cependant, en considérant l'effet des proportions d'items non-conformes (matière première et produit fini) sur la demande, une politique modifiée de HPP sera plus appropriée. La structure des politiques de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité est :

Politique d'approvisionnement (s, Q):

$$\Omega(.) = \begin{cases} Q & \text{Si } x < s, Q \in \mathbb{N} \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Sous contrainte: } Z \geq 0, Q > s \geq 0. \quad (7)$$

Politique de production (MHPP):

$$u(.) = \begin{cases} u^{\max} & \text{Si } (y(t) < Z) \text{ et } (x(t) > 0) \text{ et } (\beta = 1). \\ \frac{\text{dem}}{1-(1-AOQ).(1-p_s)} & \text{Si } (y(t) = Z) \text{ et } (x(t) > 0) \text{ et } (\beta = 1). \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (8)$$

Politique de contrôle qualité (100% et Retour)

$$\text{Politique } \begin{cases} 100\% & \begin{cases} \text{Inspecter seulement l'échantillon } n, & \text{si } d \leq c. \\ \text{Inspecter à 100\% et rectifier les items} & \\ \text{non-conformes, sinon.} & \end{cases} \\ \text{Retour} & \begin{cases} \text{Inspecter seulement l'échantillon } n, & \text{si } d \leq c. \\ \text{Retourner le lot, Sinon.} & \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

Avec u^{\max} représente le taux de production maximal, s point de commande de la matière première, Q taille du lot de la matière première, Z seuil critique en produit fini.

Pour illustrer l'interaction entre ces politiques, la Figure 2 montre l'évolution graphique des niveaux de stock de la matière première $x(t)$ et du produit fini $y(t)$ lorsque la politique 100% est sélectionnée. Quand le système de production est disponible et $x(t) > 0$, la matière première est transformée en produit fini avec un taux de transformation $u(.)$. Ce taux est ajusté selon le

niveau du stock $y(t)$. Si $y(t)$ est inférieur à Z ①, le manufacturier produit au taux maximal. Si le processus de production est non-disponible ou $x(t) = 0$, le processus de transformation est stoppé jusqu'à ce que le système devienne disponible (après un délai de réparation ③) ou l'introduction de nouvelle matière première dans le stock $x(t)$. Au même moment, lorsque le niveau de stock de matière première $x(t)$ traverse le niveau s ②, le manufacturier lance une nouvelle commande. Après un délai δ , le lot est livré. Suite à l'inspection d'un échantillon n avec un délai ④, le manufacturier décide d'accepter ou de refuser le lot. Si le lot est accepté, il sera directement placé dans le stock $x(t)$ où on note une augmentation de niveau de l'ordre de Q ③. Sinon, le manufacturier effectue une inspection à 100% et rectifiera les items non-conformes. Cette opération nécessitera un délai égal à ⑤.

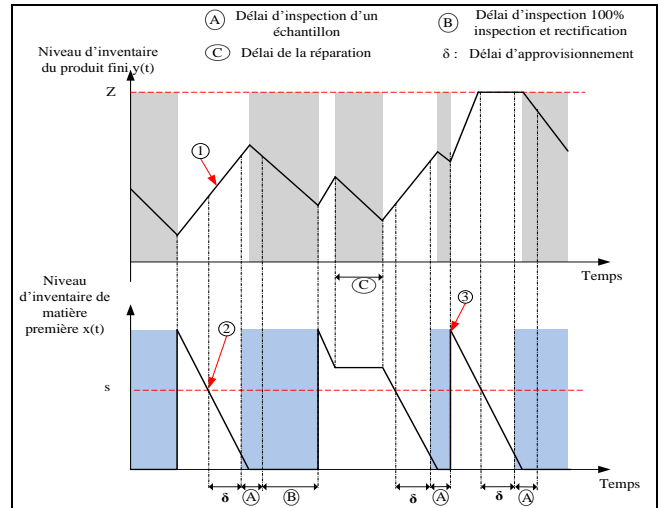


Figure 2. Dynamique des stocks $x(t)$ et $y(t)$ sous la politique de contrôle intégrant la production, l'approvisionnement et la politique qualité 100%

Dans ce travail, nos variables de décision sont le niveau de seuil critique Z , le point de commande s et la taille du lot Q . Vu la complexité de notre système, nous proposons une méthode de résolution expérimentale pour déterminer la valeur optimale des variables (s, Q, Z) permettant de minimiser le coût total composé

par : coût de stockage de matière première, coût de stockage de produit fini, coût de pénurie en produit fini, coût de lancement de commande, coût d'achat de matière première, coût d'inspection, coût de rectification (cas politique 100% seulement), coût de transformation et coût de remplacement des produits finis non-conformes.

4 APPROCHE DE RESOLUTION EXPERIMENTALE

L'approche expérimentale adoptée combine la simulation, l'analyse de variance et la méthode des surfaces de réponse. Pour plus de détails, nous référons le lecteur à [Assid et al., 2014]. Les étapes principales de cette approche sont :

4.1 Description des politiques de contrôle

La section 3 a présenté la structure de la politique de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité à la réception. Ces politiques sont utilisés comme entrée de nos modèles de simulation.

4.2 Modèles de simulation

Deux modèles de simulation combinée discrèt-continu seront développés en utilisant le langage de simulation SIMAN avec des routines C++ [Bouslah et al., 2013]. Ensuite, ils sont exécutés sous le logiciel ARENA. En effet, Chacun d'eux représentera la dynamique et l'évolution de la chaîne d'approvisionnement sous une politique de contrôle de qualité (100% ou Retour).

La (Figure 3) présente un schéma block simplifié du modèle de simulation.

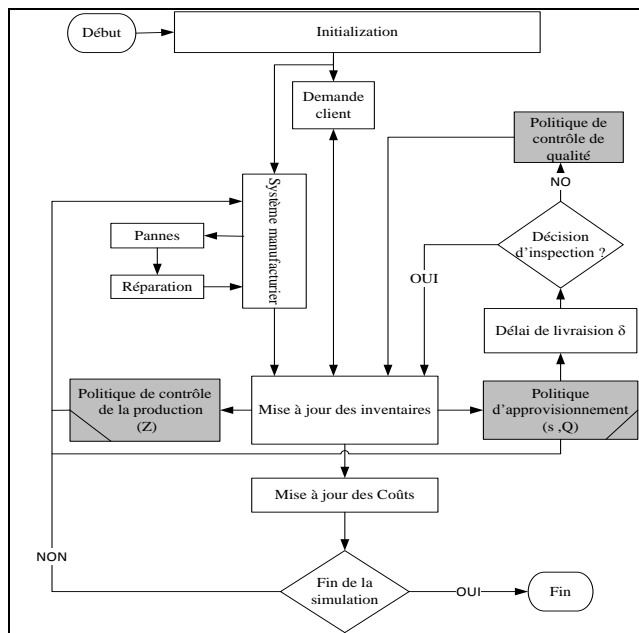


Figure 3. Diagramme de modèle de simulation

Les routines C++ permettent de mettre à jour le niveau de stock de la matière première et le niveau de stock ou de pénurie en produit fini chaque fois selon la valeur actuelle des variables (taux de la production, l'état du système manufacturier, etc.). De plus, les modèles de simulation sont développés de telle façon qu'ils peuvent accepter tout type de distribution de probabilité (le temps de bon fonctionnement (*TTF*), le temps de réparation (*TTR*), etc.).

4.3 Plan d'expérience et méthode des surfaces de réponse

Le plan d'expérience nous permet d'élaborer les combinaisons des différentes variables de contrôle. En utilisant le modèle de simulation, le coût total encouru pour chaque combinaison est déterminé. Après une analyse statistique, la méthode de surface de réponse est appliquée pour déterminer la relation entre le coût et les principaux facteurs et les interactions jugées comme significatifs. En se basant sur cette relation, la valeur optimale des variables de la politique de commande et le coût total est déterminée.

5 EXPERIMENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Dans cette section, nous appliquons l'approche de résolution pour développer l'équation de régression visant à déterminer la relation entre les variables d'entrée qui affectent la réponse, la relation entre le coût et les facteurs importants, et la valeur optimale des variables.

5.1 Exemple numérique

Les différents paramètres utilisés dans l'exemple de simulation sont : $u^{max} = 360$, $dem = 200$, $n = 125$, $c = 3$, $p = 2\%$, $p_s = 1\%$, $TTF = Expo(15)$, $TTR = Expo(1.65)$, $W = 4000$, $c_R = 0.5$, $c_R^+ = 1$, $c_{RF}^T = 0.5$, $c_F^+ = 1$, $c_F^- = 40$, $c_{insp} = 22$, $c_{rect}^R = 150$, $c_{rep}^F = 90$, $\tau_{insp} = 5 \times 10^{-4}$, $\tau_{rect} = 0.001$, $\delta = Expo(2)$, $T^\infty = 10^6$, où T^∞ est la durée totale de la simulation.

Vu qu'on a trois variables indépendantes (s, Q, Z) pour les politiques 100% et Retour, nous avons sélectionné un plan de surface de réponse de 3^3 afin de tenir compte des différents niveaux des facteurs avec les différentes combinaisons possibles [Montgomery, 2013]. Nous conduirons 5 réplifications pour chaque combinaison du plan expérimental d'où un total de 135 ($3^3 * 5$) simulations.

L'analyse statistique des résultats obtenus par la simulation a été réalisée avec le logiciel Statgraphics. Cette étude consiste dans l'analyse multifacteurs d'analyse de variance ANOVA. En se basant sur la valeur du «P-value» (Figure 4), nous notons que tous les facteurs (s, Q, Z), leurs quadratiques et leurs interactions sont significatifs pour les différentes politiques d'inspections. De plus, le R_{ajs}^2 des politiques Retour et 100% est supérieur à 95%. Ainsi, nous avons une explication de plus que 95% de la variabilité totale du modèle [Montgomery, 2013].

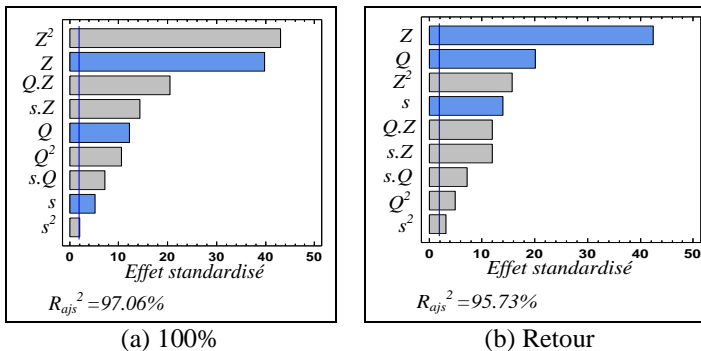


Figure 4. Graphique de Pareto standardisé

À partir de Statgraphics, les fonctions de surface de réponse des variables dépendantes du système sont comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Coût}_{\text{Ret}}(s, Q, Z) = & 22543.7 - 13.6879.s - 4.42874.Q \\ & - 7.60267.Z + 0.00335642.s^2 + 0.00146632.s.Q \\ & + 0.00245619.s.Z + 0.00039779.Q^2 \\ & + 0.000674917.Q.Z + 0.00125089.Z^2. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Coût}_{100\%}(s, Q, Z) = & 15579.3 - 9.00373.s - 3.02685.Q \\ & - 5.57326.Z + 0.00271516.s^2 + 0.00110381.s.Q \\ & + 0.00193854.s.Z + 0.000379891.Q^2 \\ & + 0.000461417.Q.Z + 0.00121795.Z^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Afin d'assurer la validité des solutions obtenues et le comportement de nos systèmes, nous avons déterminé l'intervalle de confiance (IC) à 95% défini par l'équation 12. En utilisant les valeurs optimales (s^* , Q^* , Z^*), nous avons conduit $\beta = 20$ réplifications additionnelles. Le Tableau 1 montre que la valeur de coût minimal C^* sous chaque politique est à l'intérieur de son IC (95%).

$$\bar{C}^*(\beta) \pm t_{\frac{\rho}{2}, \beta-1} \cdot \sqrt{\frac{S^2(\beta)}{\beta}} \quad (12)$$

Avec \bar{C}^* coût total moyen, S l'écart type et $(1 - \rho)$ le niveau de confiance

5.2 Analyse de sensibilité

Cette analyse permet de vérifier la robustesse de l'approche de résolution expérimentale. En effet, elle étudie l'effet de variation des paramètres du système sur le comportement du modèle. Le Tableau 2 présente l'effet de variation des paramètres de délai de livraison, de coût d'inventaire, de pénurie et de proportion de non-conformité sur les valeurs optimales (s^* , Q^* , Z^* , C^*) lorsque la politique 100% est adoptée.

- Variation du coût de stockage de matière première : Quand le coût c_R^+ augmente, le modèle réagit de façon à réduire le niveau de stock en matière première en réduisant la fréquence de lancement de commande s^* et la taille du lot Q^* . En même temps, le niveau de seuil critique Z^* augmente pour assurer la présence de produit fini et satisfaire la demande du client et pour faire face à l'augmentation du risque de rupture en matière première. Quand c_R^- diminue, on remarque une variation contraire.
- Variation du coût de stockage de produit fini : Quand le coût c_F^+ augmente, nous notons que le niveau de seuil critique Z^* diminue. En effet, cette variation permet de réduire le coût d'inventaire. En baissant ce niveau, le modèle augmente la fréquence de commande s^* et la taille du lot Q^* pour réduire le risque de rupture en matière première et assurer la continuité du processus de transformation. Quand c_F^- diminue, on remarque une variation contraire.
- Variation du coût de pénurie en produit fini : Quand le coût c_F^- augmente, le modèle réagit de façon à augmenter le niveau de seuil critique Z^* pour assurer une meilleure réponse à la demande de client final. En même moment, on note une augmentation de fréquence de lancement de commande (s^* augmente) avec une taille de lot moins importante (Q^* diminue). Cette variation a comme objectif de réduire le coût total de contrôle de qualité. Quand c_F^- diminue, on remarque une variation contraire.

- Variation de la proportion de non-conformité de matière première : Quand la proportion p augmente, la probabilité d'acceptation P_a diminue entraînant la baisse du nombre de lot accepté à la réception. Ainsi, le modèle réagit en augmentant la valeur de seuil critique Z^* pour assurer une meilleure réponse à la demande de client final et en augmentant la fréquence de lancement de commande (s^* augmente) avec une taille de lot moins importante (Q^* diminue) pour réduire le coût total de contrôle de qualité. Quand p diminue, on remarque une variation contraire.
- Variation du délai de livraison : Quand le délai δ augmente, le modèle réagit de façon à augmenter la valeur de lancement de commande, de taille de lot et du niveau de seuil critique. s^* et Q^* augmente pour réduire le risque de rupture en matière première. Z^* augmente pour assurer la présence de produit fini et satisfaire la demande du client et pour faire face à l'augmentation du risque de rupture en matière première. Quand δ diminue, on remarque une variation contraire.

En conclusion, les résultats obtenus confirment que toutes les variations sont logiques, d'où la robustesse de l'approche de résolution. Au cours de cette étude, nous avons également réalisé une analyse de sensibilité lorsque la politique Retour est adoptée. Le Tableau 2 montre les valeurs de coût optimal obtenues. En comparant ces valeurs à ceux de la politique 100%, nous avons constaté que la politique Retour est plus préférable que celle 100%. Cependant, selon la valeur de paramètre du système, nous pouvons avoir la situation inverse, la politique 100% est meilleure que Retour (Tableau 2, cas 4, $p = 3.5\%$). Face à cette situation, nous présentons dans la section suivante une analyse comparative entre ces deux politiques.

6 ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LES POLITIQUES 100% ET RETOUR

Cette section présente une comparaison entre les politiques 100% et Retour pour différentes valeurs de p , c et δ . Toutes les Figures (5-9) montrent la présence de deux points spécifiques de pourcentage d'items non-conformes de matière première p_1 et p_2 . Selon ces points, le choix d'une politique de contrôle qualité est :

- Si $p < p_1$: Lorsque la qualité de lot livré est bonne, la probabilité d'acceptation P_a est très élevée favorisant alors une décision d'acceptation qu'une décision de rejet d'un lot. Dans cette situation, il n'y a pas une importante préférence entre les politique 100% et Retour, car les opérations de contrôle sont moins fréquentes.
- Si $p > p_2$: Lorsque la qualité de lot livré est très mauvaise, la probabilité d'acceptation P_a devient très faible. Dans cette situation, il est préférable de choisir la politique 100% que Retour pour augmenter la présence de la matière première et réduire le risque de tomber en pénurie en produit fini.
- Si $p_1 < p < p_2$: Dans cette situation, il est préférable de choisir la politique Retour que 100%. En effet, la politique Retour permet d'éviter des coûts importants de contrôle de qualité et de commande générer sous la politique 100%. Cependant, l'intervalle où la politique Retour est plus préférable que 100% varie selon les valeurs des paramètres de la chaîne. Par rapport au cas de base (Figure 5), cet intervalle diminue (resp. augmente) lorsque le plan

Tableau 1. Valeurs optimales et intervalle de confiance

Politique	Valeur optimale				IC (95%)
	s^*	Q^*	Z^*	C^*	
100%	781.96	2075	1272.6	5372.4	[5370, 5396.17]
Retour	956.96	2622	1392.03	4896.6	[4895.1, 4916.4]

Tableau 2. Analyse de sensibilité, cas politique 100%

Cas	Paramètre	Variation	Variable			$C^*_{100\%}$	C^*_{Retour}	Effet sur la politique 100%
			s^*	Q^*	Z^*			
Base	-	-	781.96	2075	1272.6	5372.4	4896.6	-
1	c_R^+	1.1	769.1	2016	1293.93	5506.5	5067.17	$s^* \downarrow Q^* \downarrow Z^* \uparrow C^* \uparrow$
		0.9	795.16	2132	1251.27	5234.24	4721.55	$s^* \uparrow Q^* \uparrow Z^* \downarrow C^* \downarrow$
2	c_F^+	1.1	797.17	2082	1219.4	5482.83	5017.07	$s^* \uparrow Q^* \uparrow Z^* \downarrow C^* \uparrow$
		0.9	767.09	2068	1325.78	5257.01	4770.67	$s^* \downarrow Q^* \downarrow Z^* \uparrow C^* \downarrow$
3	c_F^-	50	799.87	2066	1342.26	5469.68	5034.42	$s^* \uparrow Q^* \downarrow Z^* \uparrow C^* \uparrow$
		30	753	2084	1156.97	5245.87	4731.52	$s^* \downarrow Q^* \uparrow Z^* \downarrow C^* \downarrow$
4	p	3.5%	839.98	1994	1301.12	7487.95	8208.62	$s^* \uparrow Q^* \downarrow Z^* \uparrow C^* \uparrow$
		1%	607.4	2250	1221.04	4220.28	4148.23	$s^* \downarrow Q^* \uparrow Z^* \downarrow C^* \downarrow$
5	δ	Expo(3)	1140.55	2240	1623.73	6190.98	6013.78	$s^* \uparrow Q^* \uparrow Z^* \uparrow C^* \uparrow$
		Expo(1)	271.39	1912	1108.39	4692.48	3983.7	$s^* \downarrow Q^* \downarrow Z^* \downarrow C^* \downarrow$

d'inspection devient plus sévère (Figure 6) (resp. relâché (Figure 7)) ou le délai de livrai augmente (Figure 8) (resp. diminue (Figure 9)).

7 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé, dans un contexte dynamique et stochastique, une politique de contrôle intégrant les décisions de production, d'approvisionnement et de contrôle de qualité de matière première pour une chaîne d'approvisionnement à trois échelons où le délai de livraison est aléatoire et le manufacturier est non-fiable. À la réception d'un lot de matière première, un contrôle par plan d'échantillonnage simple est appliqué. Si le lot est rejeté, le décideur devra choisir entre une politique axée sur une inspection à 100% (politique 100%) ou sur le retour chez le fournisseur (politique Retour). Étant donnée la complexité du système étudié, une approche expérimentale basée sur la simulation a été appliquée pour déterminer les valeurs optimales qui minimisent le coût total.

La comparaison entre la politique 100% et Retour montre que le décideur doit étudier ces deux dernières avant une prise de décision définitive. En fait, selon les paramètres de la chaîne d'approvisionnement, une politique pourrait être plus préférée que l'autre. Toutefois, lorsque le pourcentage d'items non-conformes de matière première est élevé, effectuer une inspection à 100% sur un lot rejeté assure moins de frais que la décision retour.

Dans les prochains travaux, nous développerons une politique de prise de décision de qualité, cherchant à combiner l'avantage d'une décision de retour chez le fournisseur et d'inspection à 100% lorsqu'un lot est refusé.

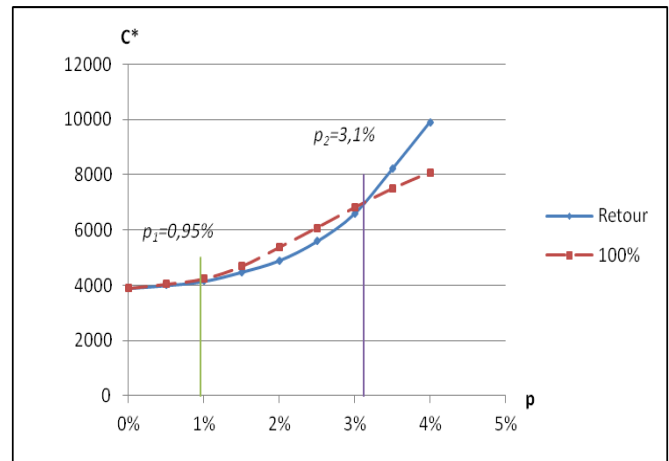


Figure 5. $C^* = f(\%p)$, Cas Base $\delta = \text{Expo}(2)$, $c = 3$

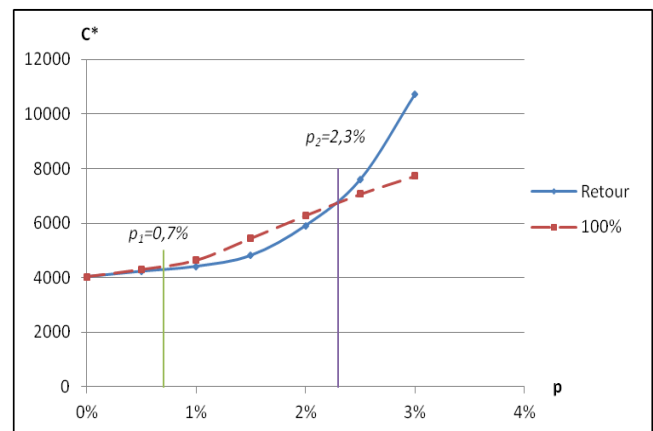


Figure 6. $C^* = f(\%p)$, Cas $\delta = \text{Expo}(2)$, $c = 2$

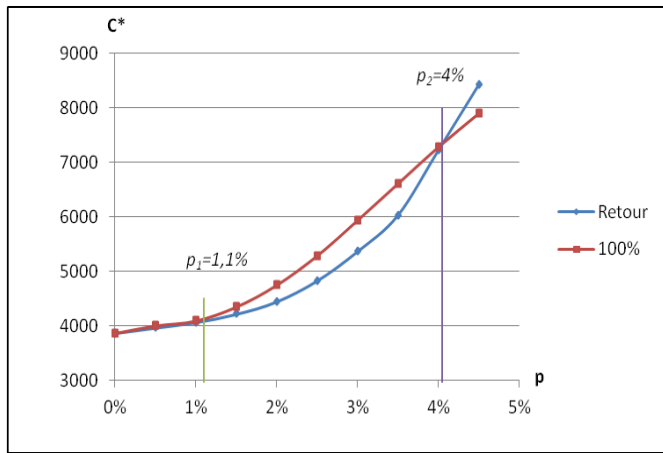


Figure 7. $C^* = f(\%p)$, Cas $\delta = \text{Expo}(2)$, $c = 4$

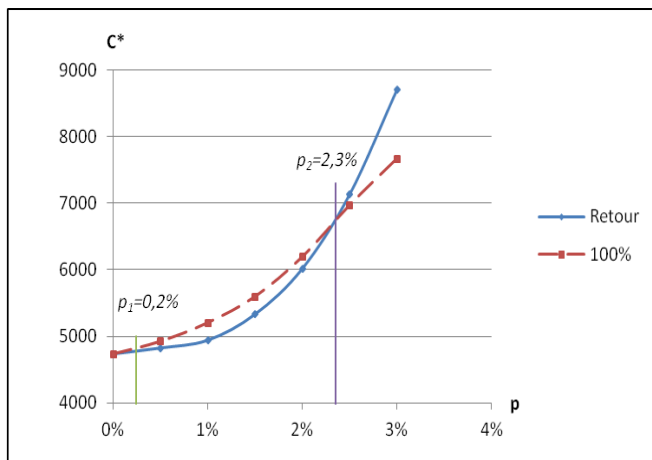


Figure 8. $C^* = f(\%p)$, Cas $\delta = \text{Expo}(3)$, $c = 3$

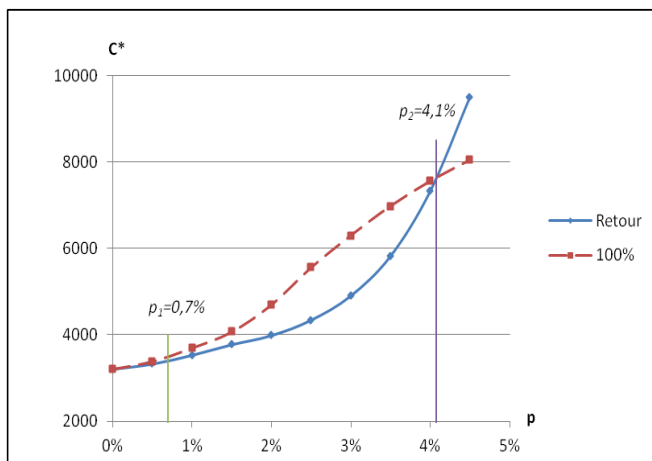


Figure 9. $C^* = f(\%p)$, Cas $\delta = \text{Expo}(1)$, $c = 3$

8 REFERENCES

- Assid, M., Gharbi, A., Hajji, A., (2014) Joint production and setup control policies: an extensive study addressing implementation issues via quantitative and qualitative criteria. *Int J Adv Manuf Technol*, 1-18.
- Ben-Daya, M., Noman, S.M., (2008) Integrated inventory and inspection policies for stochastic demand. *European Journal of Operational Research* 185, 159-169.
- Berthaut, F., Gharbi, A., Pellerin, R., (2009) Joint hybrid repair and remanufacturing systems and supply control.

- International Journal of Production Research* 48, 4101-4121.
- Bouslah, B., Gharbi, A., Pellerin, R., (2013) Joint optimal lot sizing and production control policy in an unreliable and imperfect manufacturing system. *International Journal of Production Economics* 144, 143-156.
- Bouslah, B., Gharbi, A., Pellerin, R., Hajji, A., (2012) Optimal production control policy in unreliable batch processing manufacturing systems with transportation delay. *International Journal of Production Research* 51, 264-280.
- Hajji, A., Gharbi, A., Artiba, A., (2011) Impact of random delay on Replenishment and production control strategies, *Logistics (LOGISTIQUA)*, 2011 4th International Conference on, pp. 341-348.
- Hajji, A., Gharbi, A., Kenne, J.P., (2009) Joint replenishment and manufacturing activities control in a two stage unreliable supply chain. *International Journal of Production Research* 47, 3231-3251.
- Hsu, L.F., Hsu, J.T., (2012) Economic Design of Acceptance Sampling Plans in a Two-Stage Supply Chain. *Advances in Decision Sciences* 2012.
- Kenné, J.P., Gharbi, A., (2000) Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control* 11, 581-588.
- Khan, M., Jaber, M.Y., Ahmad, A.R., (2014) An integrated supply chain model with errors in quality inspection and learning in production. *Omega* 42, 16-24.
- Konstantaras, I., Skouri, K., Jaber, M.Y., (2012) Inventory models for imperfect quality items with shortages and learning in inspection. *Applied Mathematical Modelling* 36, 5334-5343.
- Kouedeu, A.F., Kenné, J.P., Songmene, V., (2011) Production, preventive and corrective maintenance planning in manufacturing systems under imperfect repairs, *Dependable Control of Discrete Systems (DCDS)*, 2011 3rd International Workshop on. IEEE, pp. 59-64.
- Lee, W., (2005) A joint economic lot size model for raw material ordering, manufacturing setup, and finished goods delivering. *Omega* 33, 163-174.
- Montgomery, D.C., (2013) Design and analysis of experiments, 8th ed.. ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Moussawi-Haidar, L., Salameh, M.K., Nasr, W., (2013) An instantaneous replenishment model under the effect of a sampling policy for defective items. *Applied Mathematical Modelling* 37, 719-727.
- Mukhopadhyay, S.K., Ma, H., (2009) Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics* 120, 5-17.
- Pal, B., Sana, S.S., Chaudhuri, K., (2012) Three-layer supply chain – A production-inventory model for reworkable items. *Applied Mathematics and Computation* 219, 530-543.
- Pellerin, R., Sadr, J., Gharbi, A., Malhamé, R., (2009) A production rate control policy for stochastic repair and remanufacturing systems. *International Journal of Production Economics* 121, 39-48.
- Sajadieh, M.S., Fallahnezhad, M.S., Khosravi, M., (2013) A joint optimal policy for a multiple-suppliers multiple-manufacturers multiple-retailers system. *International Journal of Production Economics* 146, 738-744.
- Sana, S.S., Chedid, J.A., Navarro, K.S., (2014) A three layer supply chain model with multiple suppliers, manufacturers

- and retailers for multiple items. *Applied Mathematics and Computation* 229, 139-150.
- Schilling, E.G., Neubauer, D.V., (2009) Acceptance sampling in quality control, 2nd ed. ed. CRC Press, Boca Raton.
- Song, D.P., (2009) Optimal integrated ordering and production policy in a supply chain with stochastic lead-time, processing-time, and demand. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 54, 2027-2041.
- Song, D.P., (2013) Optimal Control and Optimization of Stochastic Supply Chain Systems. Springer London, London.
- Starbird, S.A., (1997) Acceptance sampling, imperfect production, and the optimality of zero defects. *Naval Research Logistics (NRL)* 44, 515-530.
- Wan, H., Xu, X., Ni, T., (2013) The incentive effect of acceptance sampling plans in a supply chain with endogenous product quality. *Naval Research Logistics (NRL)* 60, 111-124.