

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Politique de commande de production intégrant l'approvisionnement et le contrôle de la qualité des retours pour les systèmes de fabrication-refabrication non fiables

MORAD ASSID¹, ALI GHARBI², ADNÈNE HAJJI³

¹ Laboratoire de Conception et de Contrôle des Systèmes de Production, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (QC), Canada H3C 1K3, morad.assid@etsmtl.ca

² Département de génie de la production automatisée, École de Technologie Supérieure & CIRRELT, ali.gharbi@etsmtl.ca

³ Département des opérations et des systèmes de décision & CIRRELT, adnene.hajji@fsa.ulaval.ca

Résumé – Cet article traite le problème de contrôle et de planification de la production pour les systèmes hybrides de fabrication-refabrication (SHFR) évoluant dans un environnement stochastique et dynamique. La demande des clients est satisfaite par la fabrication de nouveaux produits ou la refabrication des produits d'occasion récupérés. Cependant, la matière première et les retours utilisés dans la production peuvent contenir une fraction d'unités défectueuses. Le problème considéré vise à proposer une politique de commande intégrant quatre décisions centrales pour coordonner la production, l'approvisionnement des retours et leur contrôle de la qualité. Ainsi, il étudie comment les entreprises pourraient bénéficier d'une telle politique de commande pour aider leurs gestionnaires à déterminer les taux de production, la séquence et la taille des commandes d'approvisionnement ainsi que la taille de leur échantillon à inspecter. Une approche d'optimisation basée sur la simulation est utilisée pour résoudre le problème. Elle vise à déterminer les valeurs optimales des paramètres de commande de la politique proposée minimisant le coût total. Les résultats fournissent des informations pertinentes et apportent des solutions efficaces pour aider les décideurs à gérer simultanément les activités de fabrication, de refabrication, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité.

Mots clés – planification et contrôle de la production, refabrication, approvisionnement, contrôle de la qualité, simulation.

1 INTRODUCTION

Sur la base de la variation du marché et de la sensibilisation du public aux problèmes environnementaux, un nombre croissant d'entreprises manufacturières intègrent la refabrication (en anglais, Remanufacturing) dans le cadre de leurs activités de production (Atasu, Sarvary, & Van Wassenhove, 2008). Ainsi, les systèmes hybrides de fabrication-refabrication (SHFR) résultants peuvent utiliser les produits récupérés (les retours) et la matière première comme intrants dans son processus de production afin de satisfaire la demande des clients. Cependant, la présence d'un flux des produits récupérés le long des étapes du processus de refabrication augmente la complexité liée à la planification de la production et au contrôle des stocks dans ces systèmes par rapport aux systèmes manufacturiers traditionnels. En effet, l'industrie de la refabrication a montré que les revenus dépendent fortement du volume et de la qualité des produits récupérés, et que l'inspection basée sur la qualité devrait faire partie des stratégies des entreprises. Compte tenu de la grande variabilité caractérisant ces retours, qui pourraient être collectés auprès de différentes sources (p. ex., les dommages, la location et la fin de l'utilisation), le processus d'inspection vise à décrire l'état réel de chaque élément inspecté. Ainsi, des coûts inutiles de production, de stockage et de remplacement peuvent être évités en éliminant les retours défectueux (non conformes aux

normes de la qualité exigée) avant la refabrication (Sonntag & Kiesmüller, 2017). De plus, l'incertitude élevée de la quantité et de la qualité des retours a une influence directe sur le taux et le coût de refabrication, qui à leur tour affectent de manière complexe les performances globales du système. Pour cette raison, les décideurs doivent coordonner conjointement et efficacement la fabrication, la refabrication, l'approvisionnement des retours et leurs activités de contrôle de la qualité.

Dans la littérature, les travaux portant sur le sujet de PCP et qui traitent les décisions de fabrication, de refabrication, d'approvisionnement des retours et de leur contrôle de la qualité sont nombreux. Cependant, ces décisions ont été principalement traitées comme des problèmes distincts, même si elles sont fortement liées (Zikopoulos, 2017).

La plupart des modèles existants et qui traitent le problème de PCP au sein des SHFRs sont généralement basés sur le concept de quantité de production économique et supposent que les installations de production sont fiables tout en utilisant des taux de production fixes (Kiesmüller, 2003; Reddy & Kumar, 2021). On y trouve plusieurs modèles de refabrication qui considèrent différentes stratégies d'inspection des retours. Dans la pratique, les entreprises de refabrication acquièrent souvent des produits récupérés auprès de fournisseurs externes et sont contraintes d'utiliser une inspection à 100% pour évaluer l'état de qualité de

tous ces retours sur la base de diverses techniques (p. ex., des données visuelles). Aras et al. (2004) ont indiqué que l'utilisation d'une inspection à 100% pour déterminer si les retours peuvent être refabriqués ou non pourrait réduire considérablement les coûts de production. En considérant deux catégories des retours, basées sur leurs conditions de qualité (mauvaises et bonnes), Wang et Han (2020) ont fourni des conseils sur l'adoption de certains niveaux pour la politique d'inspection pour stimuler la refabrication sur la base d'un compromis entre les avantages environnementaux et économiques. Ponte et al., (2021) ont montré que l'utilisation d'une politique de catégorisation des retours basée sur la qualité pour refabriquer les retours dans des lignes séparées implique une amélioration significative de la performance des stocks.

Dans l'industrie de la refabrication, seule une fraction des retours peut être constituée d'unités défectueuses. Dans ce cas, une politique d'inspection par échantillonnage peut constituer une alternative pour contrôler le niveau qualité des retours à moindre coût et dans des délais raisonnables (Panagiotidou et al., 2013). Elle consiste généralement à inspecter un échantillon du lot récupéré et à évaluer sa qualité globale. L'inspecteur, à la lumière de ce résultat, recommandera alors les mesures appropriées (p. ex., acceptation, rejet et passage à une inspection à 100 %). Nikolaidis (2009) a montré que la rentabilité de la refabrication s'améliore à mesure que les processus de catégorisation et d'approvisionnement des retours s'améliorent. Zikopoulos et al. (2009) ont pointé dans la même direction en déterminant la valeur optimale de la taille de l'échantillon et de la quantité d'approvisionnement. Panagiotidou et al. (2013) ont montré que l'utilisation d'un système d'inspection par échantillonnage approprié peut entraîner une amélioration des bénéfices. Cependant, comme indiqué dans ces travaux, même si l'échantillonnage réduit à la fois le temps et le coût de l'inspection, il existe toujours un risque que des produits récupérés défectueux soient transmis à l'étape de production (c'est-à-dire des erreurs d'inspection ou des retours défectueux qui ne faisaient pas partie de l'échantillon inspecté). Ces produits défectueux peuvent donc affecter la qualité perçue par le client. Ainsi, les paramètres de la stratégie d'inspection (p. ex., la taille de l'échantillon et la quantité d'approvisionnement des retours) devraient être utiles dans la modélisation de la production et de l'approvisionnement.

Dans le cadre des systèmes de fabrication (c'est-à-dire sans la refabrication), des travaux ont montré comment les stratégies d'inspection basées sur la qualité réduisent l'influence des matières premières défectueuses sur la fabrication (Hlioui et al. 2015a), contrôlent la dégradation du système de production (Rivera-Gómez et al. 2020) et améliorent la qualité des produits finis (Ait-El-Cadi et al. 2021). Notre travail doit être considéré dans ce contexte coordonnant les décisions interdépendantes d'approvisionnement des retours, leur contrôle de la qualité et celles liées aux processus de production.

Pour les SHFRs non fiables, un grand nombre de modèles intégrés de fabrication et de refabrication développés dans la littérature ne considèrent toujours pas les stratégies d'inspection des retours, ignorant ainsi la dépendance entre le processus d'approvisionnement des ressources (la matière première et les retours), celui de leur transformation et le niveau de qualité des unités produites. Kenné et al. (2012) ont été les premiers à aborder la dynamique stochastique des installations de production au sein des SHFRs. En utilisant une méthode numérique, ils ont développé une politique de commande sous-optimale de fabrication et de refabrication, qui est de type seuil critique (en anglais, Hedging Point Policy type). Assid et al., (2019) ont proposé une politique de commande combinant la

fabrication, la refabrication et le rejet de certains retours en soulignant l'importance de considérer conjointement l'approvisionnement des retours et de la matière première. Ndhiaief et al., (2020) ont intégré la considération environnementale dans le but d'établir un compromis entre les exigences environnementales et l'efficacité économique pour un SHFR non fiable utilisant des solutions de sous-traitance.

Enfin, quelques exceptions ont, en effet, étudié l'impact à la fois des pannes des installations de production et de la variation de la qualité des retours sur le processus de production des SHFRs, sans toutefois considérer l'approvisionnement des retours ni l'optimisation des paramètres du contrôle de leur qualité. Par exemple, Korugan et al. (2013) ont analysé l'influence des taux d'inspection de la qualité par échantillonnage dans le processus de refabrication pour les SHFRs qui sont sujets à des pannes de qualité et de fonctionnement. Ouaret et al., (2018) ont étudié l'impact de la détérioration de l'installation de refabrication sur son processus de pannes ainsi que l'évolution de la qualité des produits refabriqués en utilisant une inspection à 100%. Assid et al., (2021) ont proposé une politique de commande de production pour les SHFRs où la variabilité du niveau de qualité des retours affecte les taux de refabrication.

Contrairement aux références citées ci-haut, l'objectif de notre travail est de caractériser une politique de commande intégrée combinant simultanément des décisions de production, d'approvisionnement des retours et de contrôle de leur qualité pour les SHFRs non fiables. Une technique d'optimisation pratique basée sur la simulation est ensuite utilisée pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de la politique de commande proposée qui minimisent le coût total. Le présent article étudie également la manière dont les gestionnaires doivent réagir face à certains changements de paramètres du système.

Le reste de l'article est structuré comme suit. La description du système et la formulation du problème de PCP sont présentées à la section 2. La section 3 présente la structure de la politique de commande proposée. La section 4 détaille l'approche expérimentale utilisée pour optimiser les paramètres de commande résultants minimisant le coût total et pour évaluer la performance économique de notre système. Une analyse de sensibilité, étudiant l'impact de plusieurs paramètres du système sur la politique de commande proposée, est présentée dans la section 5. La section 6 conclut l'article.

2 ÉNONCE ET FORMULATION DU PROBLEME

2.1 Notation

Les notations utilisées dans le document et leurs définitions sont présentées comme suit :

$AOQ_F(t)$: Qualité moyenne des produits finis à l'instant t .
c_R^+	: Coût d'inventaire des retours (\$/heure/produit)
c_F^+	: Coût d'inventaire des produits finis (\$/heure/produit)
c_F^-	: Coût de pénurie des produits finis (\$/heure/produit)
c_{ins}	: Coût d'inspection des articles retournés (\$/produit)
c_{rep}	: Coût de remplacement d'un produit fini défectueux (\$/produit)
c_{rej}	: Coût de rejet (\$/produit)
c_{cmd}	: Coût de commande des retours (\$/commande)
c_p^1	: Coût de fabrication (\$/produit)
c_p^2	: Coût de refabrication (\$/produit)
Dem	: Taux de demande des produits finis (produits/temps)

- n : Taille de l'échantillon
- p_i^r : Proportion des produits défectueux dans le $i^{\text{ème}}$ lot
- $p^m(t)$: Proportion des produits défectueux dans la matière première à l'instant t
- $P_a(p_i^r)$: Probabilité d'acceptation du $i^{\text{ème}}$ lot
- Q : Taille du lot des retours
- Q_{rej} : Quantité rejetée des retours après inspection
- s : Point de commande des retours
- U_1^{max} : Taux maximal de production de l'installation 1 (fabrication)
- U_2^{max} : Taux maximal de production de l'installation 2 (refabrication)
- $u_1(t)$: Taux de fabrication de l'installation 1 à l'instant t
- $u_2(t)$: Taux de refabrication de l'installation 2 à l'instant t
- $X_F(t)$: Niveau d'inventaire (pénurie si négative) des produits finis à l'instant t
- $X_R(t)$: Niveau d'inventaire des retours à l'instant t
- Z_F : Seuil d'inventaire des produits finis
- δ_i^R : Délai de livraison aléatoire du $i^{\text{ème}}$ lot (heure)
- θ_i : Instant de commande du $i^{\text{ème}}$ lot (heure)
- τ_{ins} : Délai d'inspection par produit récupéré (temps)

2.2 Description du système

Le système étudié est présenté à la Figure 1. Il se compose de deux installations de production, une pour les opérations de fabrication (installation 1) qui utilisent de la matière première et une autre pour la refabrication des retours (installation 2). Les deux installations sont sujettes à des pannes aléatoires et sont capables de produire un seul type de produits finis pour répondre à la demande des clients. Deux stocks sont considérés dans notre problème. Les produits finis sont conservés dans le premier stock tandis que les produits récupérés (les retours) sont conservés dans le deuxième stock avant l'étape de la refabrication. Le producteur peut commander un lot i des retours auprès d'un fournisseur en amont. Chaque commande est caractérisée par la quantité Q et est reçue après un délai de livraison aléatoire $\delta_i^R(\cdot)$. Une stratégie de contrôle de la qualité est ensuite appliquée pour inspecter chaque lot livré des retours, qui contiennent une fraction ($p_i^r(\cdot)$) d'unités défectueuses. Ces unités, comme celles de la matière première (avec une fraction $p^m(\cdot)$ d'unités défectueuses) peuvent être transformées en produits finis défectueux, et donc vendus aux clients.

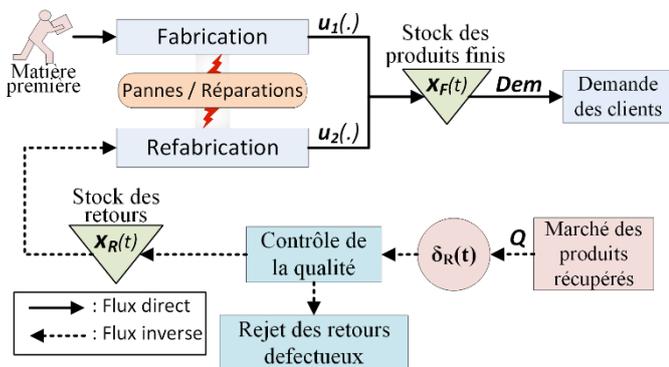


Figure 1. Structure du système considéré

Les principales hypothèses de notre système sont :

- La matière première est toujours disponible ;
- Le fournisseur des produits récupérés est connu et disponible afin de fournir les retours pour la refabrication ;
- Le taux de demande dans le temps est constant ;

- La refabrication et la fabrication produisent les mêmes produits finis, qui sont distribués comme neuf ;
- Les produits défectueux vendus seront détectés par les clients et retournés pour être remplacés par de produit de bonne qualité, ce qui implique un coût de remplacement (c_p^{rem}).

2.3 Formulation du problème

L'état de notre système de fabrication-refabrication est décrit par deux composantes à l'instant t comme suit :

- Une composante continue $X(t) = (X_F(t), X_R(t))$, $X_F(t) \in R$, $X_R(t) \geq 0$ qui décrit le niveau de surplus cumulé des stocks des produits finis et récupérés. Notez que $X_F(t)$ peut être négatif lors de situations de pénurie ;
- Une composante discrète $\alpha(t)$ qui décrit l'état de l'ensemble du système composé à la fois des installations de fabrication et de refabrication. L'état du système $\alpha(t) = (\alpha_1(t), \alpha_2(t))$ est formulé par deux variables aléatoires $\alpha_1(t)$ et $\alpha_2(t)$ de telle sorte que si l'installation de fabrication (refabrication) est disponible, $\alpha_1(t) = 1$ ($\alpha_2(t) = 1$), ou si elle n'est pas opérationnelle, $\alpha_1(t) = 0$ ($\alpha_2(t) = 0$).

La dynamique du système est alors formulée par les variables d'état $(X(t), \alpha(t))$. Les équations (1) et (2) décrivent l'évolution temporelle du système.

$$\dot{X}_F = u_1(t) + u_2(t) - \frac{Dem}{1-AOQ_F(t)} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_R = -u_2(t) \\ X_R((\theta_i + \delta_R(\theta_i))^+) = X_R((\theta_i + \delta_R(\theta_i))^-) + Q - Q_{rej}(\cdot) \end{cases} \quad (2)$$

Avec, $X_F(0) = X_F^0$ and $X_R(0) = X_R^0$ qui désignent respectivement les niveaux de stock initiaux des produits finis et des retours. $AOQ_F(t)$ désigne la qualité moyenne des produits finis à l'instant t (c'est-à-dire la quantité de produits finis défectueux dans le stock).

Noter que le niveau d'inventaire des retours (X_R) est formulé par une alimentation continue en aval des opérations de refabrication et de rejet ainsi qu'une alimentation impulsive en amont (voir équation (2)), lorsqu'un lot Q de retours est reçu à l'instant $(\theta_i + \delta_R(\theta_i))$. La commande de ce lot a été lancée à l'instant θ_i . $((\theta_i + \delta_R(\theta_i))^-)$ et $((\theta_i + \delta_R(\theta_i))^+)$ désignent respectivement les bornes négatives et positives du $i^{\text{ème}}$ instant de réception. La décision d'accepter le lot reçu Q de retours dépend du nombre d'unités défectueuses dans l'échantillon n inspecté ($0 \leq n \leq Q$), qui dépend à son tour du paramètre aléatoire $p^r(\theta_i)$. Si le lot est refusé, le producteur procédera alors à une inspection à 100% pour une durée totale de $Q \cdot \tau_{ins}$ unités de temps.

Les politiques de commande admissibles sont basées sur le processus stochastique $\alpha(t)$ comme suit :

$$A = \left\{ \begin{array}{l} (u_1(t), u_2(t), \theta_i, Q, n \geq 0), \\ 0 \leq u_1(t) \leq U_1^{max} \cdot I(\alpha_1(t) = 1), \\ 0 \leq u_2(t) \leq U_2^{max} \cdot I(\alpha_2(t) = 1), \\ n \leq Q \end{array} \right\} \quad (3)$$

Où $I(\omega) = 1$ si ω est vrai tandis que $I(\omega) = 0$ sinon.

Le problème PCP considéré est complexe. Ceci est principalement dû aux phénomènes stochastiques liés aux pannes et réparations aléatoires, au délai de livraison des retours et à la proportion d'unités défectueuses dans la matière première et les retours. De plus, la variation des niveaux des stocks est contrainte par l'état stochastique des installations de fabrication et de refabrication, la capacité de production et la disponibilité des retours en stock.

Notre approche de résolution adaptera d'abord certaines politiques de commande existantes afin d'en établir une efficace intégrant simultanément la fabrication, la refabrication, l'approvisionnement des retours et leur contrôle de la qualité (voir la section suivante). Ensuite, une technique d'optimisation basée sur la simulation est utilisée pour calculer la valeur optimale des paramètres de commande résultants, qui minimisent le coût total encouru. Le coût total comprend les opérations de commande, de stockage des retours et des produits finis, de pénurie, d'inspection, de rejet et de remplacement.

3 STRUCTURE DE LA POLITIQUE DE COMMANDE PROPOSEE

Cette section présente notre politique de commande de production et d'approvisionnement intégrant une stratégie d'inspection par échantillonnage pour un SHFR non fiable, qui évolue dans un environnement stochastique et dynamique. Notre proposition s'appuie sur des résultats antérieurs comme (Bouslah et al., 2014; Hajji et al., 2011; Hlioui et al., 2015; Kenné et al., 2012) en adaptant la structure de leurs politiques de commande à notre système (voir section 2.2) et en appliquant plusieurs adaptations comme la prise en compte des unités défectueuses dans les stocks de matières premières et des retours. Ces travaux ont généralement montré que pour les systèmes de production non fiables, la politique de commande optimale se trouve être de type quantité de commande économique dans la littérature sur le contrôle des stocks et de type seuil critique dans la littérature sur le contrôle de la production.

3.1 Politique de commande de la production

La politique de commande de production considérée est basée sur (Kenné et al., 2012) et consiste à maintenir un stock de sécurité pour répondre à la demande des clients même pendant les périodes de panne des installations de fabrication et de refabrication. Notre politique de production est formulée par les équations (6) et (7). L'équation (6) montre que si le niveau d'inventaire des produits finis (X_F) est inférieur au seuil Z_F ($X_F < Z_F$), l'installation de fabrication doit produire au taux maximum. Puis, dès que ce stock est plein (X_F atteint Z_F), le taux de fabrication change pour maintenir ce niveau de stock. Ceci est réalisé en considérant les valeurs du taux de demande Dem , celui de la refabrication u_2 (pour prioriser la refabrication compte tenu de son coût de production inférieur) et la qualité moyenne des produits finis $AOQ_F(t)$, qui montre la quantité d'unités défectueuses susceptibles d'atteindre les clients. En fait, $AOQ_F(t)$ dépend de la quantité d'unités défectueuses produites en utilisant les deux installations de production.

En supposant que la qualité des matières premières et des retours est équivalente à celle des produits finis, $AOQ_F(t)$ peut être formulée comme suit :

$$AOQ_F(t) = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N(t)} a^i p^{r(Q-n)}}{\sum_{i=1}^{N(t)} Q} \cdot u_2(t) \right) + (p^m \cdot u_1(t))}{u_2(t) + u_1(t)} \quad (4)$$

Où $N(t)$ désigne le nombre de lots inspectés à l'instant t . $a^i = 1$ si le $i^{\text{ème}}$ lot est accepté et $a^i = 0$ sinon. Le système peut également calculer la limite de la qualité moyenne (AOQL), qui est formulée comme suit :

$$AOQL = \max_{\substack{0 \leq p^r \leq 1 \\ 0 \leq p^m \leq 1 \\ 0 \leq n \leq Q}} \{AOQ_F(t)\} \quad (5)$$

L'équation (7) met l'accent sur la priorité donnée à la refabrication afin que l'installation de refabrication fonctionne au taux maximum (U_2^{max}) tant qu'elle est opérationnelle et que les retours sont disponibles en stock. Si ce n'est pas le cas, l'installation de refabrication doit être arrêtée.

$$u_1 = \begin{cases} U_1^{max} & \text{si } X_F < Z_F \text{ et } \alpha_1 = 1 \\ \frac{Dem}{1-AOQ_F} - u_2 & \text{si } X_F = Z_F \text{ et } \alpha_1 = 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_2 = \begin{cases} U_2^{max} & \text{si } X_F \leq Z_F \text{ et } X_R > 0 \text{ et } \alpha_2 = 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (7)$$

3.2 Politique de commande d'approvisionnement

Notre politique de commande d'approvisionnement des produits récupérés est adaptée à partir de travaux tels que (Hajji et al., 2011), qui a considéré un système de fabrication (sans la refabrication) non fiable avec des délais de livraison aléatoires de la matière première. Ce dernier travail a montré numériquement que la politique optimale de fabrication et d'approvisionnement est une combinaison d'une politique de production de type seuil critique et de la politique (s, Q) pour l'approvisionnement. Nous l'utiliserons également pour contrôler la décision d'approvisionnement des retours. Cette politique est présentée par l'équation (8) et consiste à commander un lot Q de produits récupérés lorsque le volume des stocks des retours en amont atteint le niveau s . Cela signifie que le stock des retours doit être maintenu à un niveau donné pour faire face aux délais de livraison aléatoires ou à une capacité de production réduite lors des pannes.

$$\Omega = \begin{cases} Q & \text{si } X_R < s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (8)$$

3.3 Politique de contrôle de la qualité

Notre politique de contrôle de la qualité des retours est décrite par l'équation (9). Elle est basée sur la stratégie d'inspection par échantillonnage illustrée à la Figure 2. Dans un contexte différent, Bouslah et al. (2014) et Hlioui et al. (2015) ont également combiné une politique de fabrication de type seuil critique avec un plan d'inspection par échantillonnage pour inspecter respectivement chaque lot de produits finis et chaque lot de matières premières livrées.

$$\varphi = \begin{cases} n \\ Q & \text{si le nombre d'unités défectueuses} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

La Figure 2 présente la dynamique des activités conjointes de production, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité. Elle montre que la politique de contrôle de la qualité considérée (voir équation (9)) a un impact direct sur le niveau de qualité des produits finis (équation (4) définit $AOQ_F(t)$ résultante). En effet, les unités de matières premières qui sont transformées en produits finis pendant la période de fabrication seront mélangées avec ceux résultant du processus de refabrication. Lorsqu'une commande d'un lot Q est lancée à l'instant t_{ord} , elle sera livrée après un délai aléatoire $\delta_R(t_{ord})$. Dès sa réception (au temps $t_{ord} + \delta_R(\cdot)$), il est inspecté selon un plan d'échantillonnage lot par lot avec un critère d'acceptation c égal à zéro ($c = 0$). La durée d'inspection de l'échantillon n ($n < Q$) est $n \cdot \tau_{ins}$. Après l'inspection, si l'échantillon ne contient aucune unité défectueuse, le lot sera immédiatement réacheminé vers le stock des retours. Dans ce cas, la probabilité d'acceptation ($P_a(\cdot)$) d'un lot reçu est exprimée par : $P_a(t_{ord}) = (1 - p^r(t_{ord}))^n$ (Schilling & Neubauer, 2017).

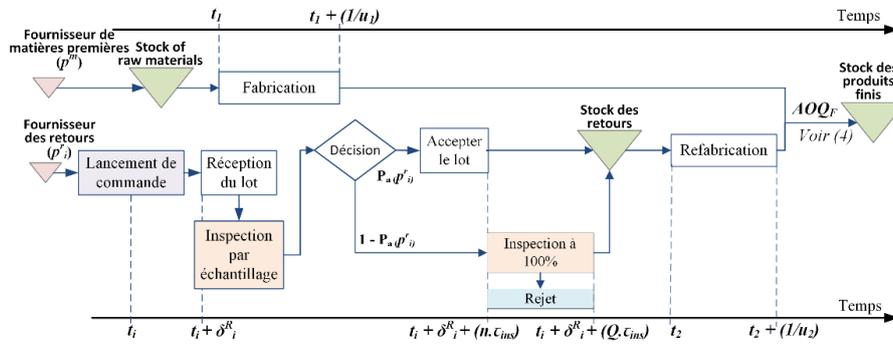


Figure 2. Dynamique du contrôle intégré de la production, d'approvisionnement et de la qualité

Néanmoins, avec une probabilité de $(1 - P_a)$, le lot est refusé et le producteur procédera alors à une inspection à 100% pour une durée totale de $Q \cdot \tau_{ins}$ unités de temps. De plus, après une inspection à 100 %, toutes les unités défectueuses $Q \cdot p^r(t_{ord})$ sont supposées être éliminées. Par conséquent, lorsque la politique d'inspection par échantillonnage est appliquée, certains retours défectueux peuvent passer l'inspection. La proportion de retours stockés défectueux est alors égale à $\frac{\sum_{i=1}^{N(t)} p^r(Q-n)}{\sum_{i=1}^{N(t)} Q}$, $a^i = 1$, si le $i^{\text{ème}}$ lot est accepté, et $a^i = 0$ sinon. Compte tenu de la capacité de production limitée et des pannes éventuelles des installations, ces retours défectueux ainsi que ceux de la matière première pourraient être transformés en produits finis défectueux (voir équation (4)) et seront vendus au client.

En conclusion, les paramètres de commande considérés caractérisant la politique proposée sont le seuil d'inventaire des produits finis Z_F , les paramètres d'approvisionnement s et Q et la taille de l'échantillon à inspecter n .

variation de certains paramètres de coût et du système affecte la politique proposée.

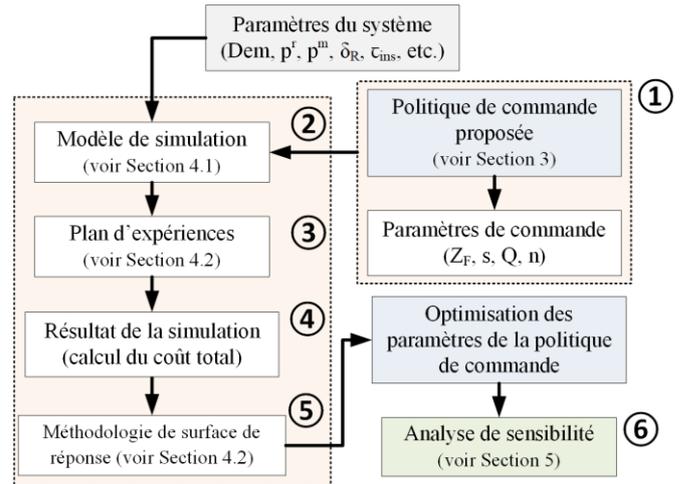


Figure 3. Étapes de l'approche de résolution adoptée

4 APPROCHE DE RESOLUTION

L'approche de résolution utilisée pour optimiser les paramètres de la politique de commande proposée minimisant le coût total est présentée dans la Figure 3. Elle combine la simulation, les plans d'expériences et la méthodologie des surfaces de réponses. Ce choix est justifié par sa précision face à un problème aussi complexe, qui intègre conjointement les décisions de production, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité pour un SHFR évoluant dans un contexte stochastique et dynamique. La modélisation par simulation (② dans la Figure 3) est utilisée comme un outil puissant pour représenter fidèlement la dynamique du système lorsqu'il est contrôlé par la politique de commande proposée (① dans la Figure 3). Ainsi, le coût total encouru est calculé (④ dans la Figure 3) pour évaluer la performance économique du système en fonction de la combinaison des valeurs des paramètres de commande. Un plan d'expérience (③ dans la Figure 3) est également établi pour distinguer les effets des principaux paramètres de commande, leurs effets quadratiques et leurs interactions sur la réponse de notre problème d'optimisation, à savoir le coût total. La méthodologie des surfaces de réponses (⑤ dans la Figure 3) est ensuite utilisée pour déterminer la relation entre le coût total et les principaux paramètres significatifs, leurs interactions et leurs effets quadratiques. À partir de cette relation estimée, nous déterminons les valeurs optimales du coût total et des paramètres de commande associés. Notre approche de résolution est également utilisée pour effectuer une analyse de sensibilité (⑥ dans la Figure 3) pour confirmer la robustesse de notre politique proposée et pour comprendre comment la

4.1 Modèle de simulation

Le modèle de simulation est construit à l'aide du langage SIMAN et est exécuté par le logiciel de simulation ARENA. Notre modèle combiné d'événements continus et discrets vise à imiter le comportement dynamique du système tout en réduisant le temps d'exécution de la simulation.

Une première étape d'initialisation est effectuée concernant les valeurs des paramètres de commande établis par le plan d'expériences et les variables du problème (p. ex., le taux de demande, la capacité de production, les paramètres d'inspection et d'approvisionnement). Un bloc "politique d'approvisionnement" définit les délais et les quantités de commandes (voir section 3.2). Il est en attente continue d'un signal du capteur, qui surveille le niveau d'inventaire des retours (X_R). Ce capteur libère un signal à chaque fois que X_R franchit le seuil s . Un bloc "politique de production" fixe les taux de fabrication et de refabrication contrôlant le fonctionnement des opérations de production (voir section 3.1). Il dépend donc des données fournies par les capteurs qui surveillent l'état des installations de production et X_F . Un autre bloc définit la "politique de contrôle de la qualité" : lorsqu'un lot Q de retours est reçu après un délai aléatoire, les opérations d'inspection sont modélisées en fonction de la stratégie présentée dans la section 3.3. Une fois l'inspection terminée, la quantité acceptée des retours est transmise à leur stock tout en mettant à jour son niveau d'inventaire. La simulation est arrêtée lorsque son temps atteint la durée d'exécution de la simulation, qui est fixée de manière à s'assurer que le régime permanent du système est atteint. À la fin de la simulation, le coût total (la performance économique du système) est calculé.

4.2 Plans d'expériences et méthodologie des surfaces de réponses

En utilisant les résultats de la simulation, la combinaison des plans d'expériences et de la méthodologie des surfaces de réponses permet d'établir une relation entre le coût total et les paramètres de commande (s, Q, X_F, n) caractérisant la politique de commande proposée. L'objectif est alors de calculer les valeurs optimales de ces paramètres de commande minimisant le coût total.

À des fins d'illustration, notre exemple numérique utilise les valeurs suivantes des paramètres du système (voir le Tableau 1). T_F et T_R définissent respectivement le temps de bon fonctionnement d'une installation de production et le temps de sa réparation.

Tableau 1. Paramètres du système

Paramètres	c_R^+	c_F^+	c_F^-	p^m	p^r
Valeurs	0.5	1	50	1%	NORM (0,05;0,005)
Paramètres	c_p^1	c_p^2	c_{rej}	c_{ins}	τ_{ins}
Valeurs	50	5	50	70	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Paramètres	c_{cmd}	U_1^{max}	U_2^{max}	Dem	δ_R
Valeurs	5000	180	170	200	NORM(6,1)
Paramètres	T_F		T_R		
Valeurs	LOGN(60;6)		LOGN(10;5)		

Les plans des expériences déterminent la façon dont les paramètres de commande (s, Q, X_F, n) doivent être modifiés tout en assurant un nombre minimal d'expériences de simulation. Pour le problème étudié, nous considérons un plan factoriel complet à trois niveaux chacun 3^k , où $k \in N^*$ représente le nombre de paramètres de commande de la politique proposée. Montgomery (2012) explique qu'un tel plan peut évaluer les différentes combinaisons de paramètres, ce qui donne des résultats plus précis. Ainsi, avec $k = 4$ et cinq répliquations utilisées, le nombre total des expériences de simulation est égal à 405. Noter qu'un nouveau paramètre β est utilisé pour remplacer le paramètre de commande s , avec $\beta \in [0,1]$ et donc $s = \beta \cdot Q$. Par conséquent, la contrainte $s < Q$ est toujours respectée. Nous avons utilisé le logiciel statistique STATGRAPHICS pour le plan d'expériences et pour effectuer une analyse de variance multifactorielle. Par exemple, le diagramme de Pareto présenté à la Figure 4 montre que tous les facteurs, leurs interactions et leurs effets quadratiques sont statistiquement significatifs pour le coût total. Ces résultats mettent en évidence la relation interconnectée entre les décisions de fabrication, de refabrication, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité. La figure 4 présente également le coefficient R-carré ajusté (R^2) pour la réponse du coût total

montrant ainsi que le modèle obtenu explique plus de 95 % de la variabilité observée dans le coût total estimé.

Nous avons également utilisé STATGRAPHICS pour déterminer le modèle de régression du second ordre reliant le coût total aux principaux paramètres de commande significatifs, leurs effets quadratiques et leurs interactions. Il est exprimé comme suit :

$$CT = 31015.1 - 6.468.Z_F - 9963.12.s - 3.83.Q + 2.40612.n + 9.391.10^{-4}.Z_F^2 + 2.549Z_F.s + 3.533.10^{-4}.Z_F.Q - 1.362.10^{-2}.Z_F.n + 4050.98.s^2 + 1.212.s.Q - 79.151.s.n + 4.148.10^{-4}.Q^2 - 1.173.10^{-2}.Q.n + 1.094.n^2 \quad (10)$$

La fonction de coût total (10) est ensuite minimisée en déterminant les valeurs optimales des paramètres de commande. La solution optimale est présentée dans le Tableau 2. La validation de notre modèle est également vérifiée en effectuant 30 expériences de simulation supplémentaires tout en utilisant les valeurs optimales obtenues comme entrées. Le but est de s'assurer que le coût total optimal se trouve dans l'intervalle de confiance (IC).

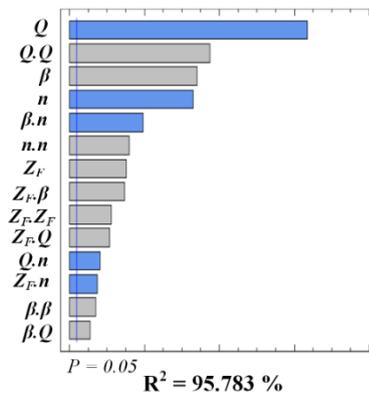


Figure 4. Diagramme de Pareto pour le coût total

5 ANALYSE DE SENSIBILITE

Notre analyse de sensibilité est réalisée pour comprendre comment la variation des paramètres du système affecte la solution (Z_F^*, s^*, Q^*, n^*) et pour s'assurer que la réaction du système a du sens. Par conséquent, elle montre l'efficacité de la politique de commande proposée et comment les gestionnaires doivent réagir face à certains changements de paramètres du système.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 5. Ils présentent comment les changements de divers paramètres du système influencent les paramètres de commande optimaux. Deux indices de performance supplémentaires sont également calculés pour aider à mieux comprendre les résultats. Ils sont constitués des proportions satisfaites par la fabrication ($P_1^{\%} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (E [\int_0^T \frac{u_1(t)}{u_1(t)+u_2(t)} dt])$) et la refabrication ($P_2^{\%} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} (E [\int_0^T \frac{u_2(t)}{u_1(t)+u_2(t)} dt])$) par rapport à la production totale.

Tableau 2. Solution optimale

	Paramètres de commande optimaux				Coût total optimal	AOQL	Intervalle de confiance (95%)
	Z_F^*	s^*	Q^*	n^*			
Valeurs	2723	954	3718	45	13862.00	2.908%	[13859,93 ; 13868,03]

Tableau 3. Analyse de sensibilité

Cas	Paramètre	Variation	Paramètres de commande optimaux				Autres paramètres		Coût total optimal	Impact sur les paramètres de commande
			Z_F^*	s^*	Q^*	n^*	$P_1^{\%}$	$P_2^{\%}$		
Base	-	-	2723	954	3718	45	49,66%	50,34%	13862,00	-
1	c_R^+	0,3	2593	1340	3792	47	47,17%	52,83%	13682,80	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \uparrow, n^* \uparrow$
		0,7	2810	709	3655	44	51,67%	48,33%	14150,70	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \downarrow, n^* \downarrow$
2	c_F^+	0,8	2883	786	3716	44	50,89%	49,11%	13438,20	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \downarrow, n^* \downarrow$
		1,2	2549	1171	3718	46	48,43%	51,57%	14394,50	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \uparrow, n^* \uparrow$
3	c_F^-	40	2692	627	3816	44	52,00%	48,00%	13769,30	$Z_F^* \downarrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
		60	2732	1196	3651	46	48,45%	51,55%	14051,30	$Z_F^* \uparrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
4	c_{ins}	60	2678	1115	3711	47	48,94%	51,06%	13774,90	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
		80	2754	834	3725	43	50,48%	49,52%	14081,50	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
5	c_{rej}	40	2704	1021	3715	46	49,40%	50,60%	13879,20	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
		60	2729	928	3720	45	49,98%	50,02%	13981,50	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
6	c_{rep}	550	2709	962	3705	44	49,66%	50,34%	13850,60	$Z_F^* \downarrow, s^* \downarrow, Q^* \downarrow, n^* \downarrow$
		650	2724	946	3731	46	49,63%	50,37%	14008,40	$Z_F^* \uparrow, s^* \uparrow, Q^* \uparrow, n^* \uparrow$
7	c_{cmd}	4500	2677	1116	3624	46	49,23%	50,77%	13803,30	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
		5500	2751	845	3795	45	50,37%	49,63%	14050,80	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
8	c_p^1	45	2817	658	3740	44	51,85%	48,15%	13449,00	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
		55	2610	1309	3700	47	47,61%	52,39%	14390,10	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
9	c_p^2	3	2675	1105	3709	46	48,82%	51,18%	13714,00	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
		7	2758	845	3727	45	50,50%	49,50%	14143,70	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
10	δ_R	5	2683	642	3656	43	50,94%	49,06%	13862,12	$Z_F^* \downarrow, s^* \downarrow, Q^* \downarrow, n^* \downarrow$
		7	2744	1725	3866	50	45,65%	54,35%	14023,24	$Z_F^* \uparrow, s^* \uparrow, Q^* \uparrow, n^* \uparrow$
11	p^r	4%	2752	916	3724	44	50,04%	49,96%	13913,30	$Z_F^* \uparrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$
		6%	2668	1285	3709	52	48,22%	51,78%	14491,70	$Z_F^* \downarrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
12	MTTF	55	2808	1324	3640	47	47,01%	52,99%	14184,80	$Z_F^* \uparrow, s^* \uparrow, Q^* \downarrow, n^* \uparrow$
		65	2679	819	3722	43	51,22%	48,78%	13779,70	$Z_F^* \downarrow, s^* \downarrow, Q^* \uparrow, n^* \downarrow$

En plus des paramètres de coûts, différents paramètres du système sont sélectionnés pour l'analyse de sensibilité. Ces paramètres sont le délai moyen de livraison des lots de retours (δ_R), la proportion moyenne de retours défectueux (p^r) et le temps moyen avant la panne (MTTF).

Tous les cas testés mettent en évidence la forte interaction entre l'approvisionnement des retours, le contrôle de leur niveau qualité et la gestion des stocks et des opérations de production. Par exemple, lorsque c_R^+ augmente (voir cas 1), le système réagit en diminuant la quantité de retours dans le stock. Par conséquent, il commande moins fréquemment et réduit la quantité commandée des retours, de sorte que la valeur de s^* et Q^* est diminuée. En conséquence, le risque de pénurie des retours est plus élevé. La valeur optimale de la taille de l'échantillon n^* est alors diminuée pour favoriser la décision d'acceptation des lots livrés. Pour la même raison, le système augmente la valeur de Z_F^* dans le but d'avoir plus de produits finis prêts à être vendus aux clients. De même, l'augmentation de c_F^+ (voir cas 2) réduit la quantité de produits finis stockés (Z_F^* diminue). Cette situation augmente le risque de pénuries permettant au système d'augmenter à la fois s^* et Q^* , ce qui augmente la proportion de produits refabriqués ($P_2^{\%}$ augmente). L'augmentation de c_F^- (voir cas 3) a un impact inverse sur Z_F^* par rapport à celui de c_F^+ car plus de produits finis doivent être conservés dans le stock (Z_F^* augmente) pour assurer une meilleure protection contre des pénuries qui coûtent plus cher. Le système se protège également contre l'augmentation de δ_R (voir cas 10) en augmentant la valeur de tous les paramètres de commande.

La situation d'utiliser plus de refabrication est à aussi observée lorsque c_p^1 augmente (voir cas 8) parce que le système vise à réduire la proportion de produits fabriqués par l'installation 1 qui coûtent plus cher ($P_1^{\%}$ diminue). Ainsi, le système commande plus de retours (s^* augmente) tout en augmentant leur qualité dans le système (n^*). Par conséquent, la capacité de production globale est plus élevée, ce qui entraîne une diminution de Z_F^* . L'augmentation de c_p^2 (voir cas 9) a un impact inverse par rapport à celle de c_p^1 afin de réduire $P_2^{\%}$.

D'autres résultats logiques sont observés. Par exemple, lorsque le coût d'inspection des retours (c_{ins}) (voir cas 4) ou leur coût de rejet (c_{rej}) (voir cas 5) est augmenté, n^* diminue accroître la probabilité d'acceptation des lots reçus. En effet, cela implique plus de lots acceptés (c'est-à-dire moins d'opérations d'inspection) et moins de retours rejetés. Ce phénomène est observé également lorsque p^r diminue (voir cas 11) puisque le niveau de qualité des retours est amélioré. De même, étant donné que le stock des retours contient plus d'unités défectueuses, le système diminue à la fois s^* et Q^* pour réduire la proportion des produits refabriqués ($P_2^{\%}$ diminue) et augmenter celle des produits fabriqués ($P_1^{\%}$ augmente). En conséquence, Z_F^* est diminué car la fabrication implique un niveau de qualité supérieure des produits finis. Le système diminue également Z_F^* lorsque MTTF augmente (voir cas 12). Cela est dû principalement à l'augmentation de la capacité de production, qui réduit le risque de pénurie. Dans cette situation, le coût total diminue.

La variation du coût de remplacement c_{rep} influence aussi les paramètres de commande optimaux. En effet, lorsque c_{rep} augmente (voir cas 6), le système vise à améliorer la qualité des produits finis. Par conséquent, il augmente n^* pour inspecter plus de retours et réduire le nombre des retours défectueux en stock. Face au nombre croissant de rejets et d'opérations d'inspection (qui nécessite plus de temps), le système augmente Z_F^* pour améliorer la capacité de stockage ainsi que s^* et Q^* pour limiter l'impact de la pénurie des retours. Cette situation augmente la proportion des produits refabriqués ($P_2\%$ augmente), qui sont de meilleure qualité. Cependant, lorsque c_{cmd} augmente (voir cas 7), le système commande moins fréquemment (s^* diminue) pour éviter des coûts de lancement de commande supplémentaires, mais en commandant une plus grande taille de lot (Q^* augmente). Ainsi, le système augmente n^* pour améliorer la qualité des retours stockés.

6 CONCLUSION

Cet article propose une politique de commande intégrée de fabrication, de refabrication, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité pour les SHFRs sujets à des pannes aléatoires et évoluant dans un contexte stochastique dynamique. Notre travail est motivé par le besoin d'une coordination efficace entre les opérations de production, d'approvisionnement des retours et de contrôle de leur niveau de qualité dans plusieurs applications industrielles où l'incertitude de la quantité et de la qualité des retours a un impact significatif sur le processus de production et la performance globale du système. La politique de commande proposée consiste en une combinaison de type seuil critique pour le processus de production, de quantité de commande économique dépendant de l'état du système pour les décisions d'approvisionnement et d'une stratégie d'inspection par échantillonnage pour le contrôle de la qualité. L'outil de la simulation est combiné avec les plans d'expériences et la méthodologie des surfaces de réponses pour calculer les paramètres de commande optimaux minimisant le coût total et pour effectuer une analyse de sensibilité détaillée. Les résultats ont montré la pertinence de l'approche de résolution adoptée qui fournit une technique robuste pour contrôler un tel système. Ils ont également confirmé qu'il existe une forte interaction entre les quantités de produits finis et des retours à conserver en stock, les paramètres de commande de l'approvisionnement et le contrôle qualité, soulignant ainsi l'importance de prendre ces décisions centrales dans leur ensemble à des fins de contrôle efficace.

Notre travail peut être étendus dans diverses directions. Par exemple, différentes stratégies d'inspection et politiques d'échantillonnage telles que le plan d'échantillonnage double pourraient être étudiées. Il pourrait également être intéressant de considérer différents seuils d'acceptation pour le lot d'échantillonnage en optimisant des paramètres du plan d'échantillonnage. De plus, nous pouvons consolider notre travail avec la considération de fournisseurs distincts où le choix d'utiliser l'un plutôt qu'un autre est basé sur différents critères tels que le délai de livraison, le coût et le niveau de qualité des produits.

7 REFERENCES

Aras, N., Boyaci, T., & Verter, V. (2004). The effect of categorizing returned products in remanufacturing. *IIE Transactions*, 36(4), 319–331. <https://doi.org/10.1080/07408170490279561>

Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2021). Production planning and control of unreliable hybrid manufacturing-

remanufacturing systems with quality-based categorization of returns. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127800. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127800>

Assid, Morad, Gharbi, A., & Hajji, A. (2019). Production planning of an unreliable hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainties and supply constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 136(July), 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.061>

Atasu, A., Sarvary, M., & Van Wassenhove, L. N. (2008). Remanufacturing as a Marketing Strategy. *Management Science*, 54(10), 1731–1746. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1080.0893>

Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2014). Joint production and quality control of unreliable batch manufacturing systems with rectifying inspection. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4103–4117. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.746481>

Hajji, A., Gharbi, A., Kenne, J. P., & Pellerin, R. (2011). Production control and replenishment strategy with multiple suppliers. *European Journal of Operational Research*, 208(1), 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.010>

Hlioui, R., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Replenishment, production and quality control strategies in three-stage supply chain. *International Journal of Production Economics*, 166, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.015>

Kenné, J. P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of a hybrid manufacturing/remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.026>

Kiesmüller, G. P. (2003). Optimal control of a one product recovery system with leadtimes. *International Journal of Production Economics*, 81–82, 333–340. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00329-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00329-8)

Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.

Ouaret, S., Kenné, J.-P., & Gharbi, A. (2018). Stochastic optimal control of random quality deteriorating hybrid manufacturing/remanufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 49(September), 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.002>

Reddy, K. N., & Kumar, A. (2021). Capacity investment and inventory planning for a hybrid manufacturing – remanufacturing system in the circular economy. *International Journal of Production Research*, 59(8), 2450–2478. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1734681>

Schilling, E. G., & Neubauer, D. V. (2017). *Acceptance sampling in quality control* (Third Edit). Boca Raton, FL: CRC Press.

Sonntag, D., & Kiesmüller, G. P. (2017). The Influence of Quality Inspections on the Optimal Safety Stock Level. *Production and Operations Management*, 26(7), 1284–1298. <https://doi.org/10.1111/poms.12691>

Zikopoulos, C. (2017). Remanufacturing lot sizing with stochastic lead-time resulting from stochastic quality of returns. *International Journal of Production Research*, 55(6), 1565–1587. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1150616>