

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
Lamdjed TOLBA

POLITIQUE DE CONTRÔLE DE PRODUCTION, DE QUALITÉ ET DE SÉLECTION DE
FOURNISSEURS

MONTRÉAL, LE 19 septembre 2014

© Tous droits réservés, Lamdjed TOLBA, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ali Gharbi, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Adnène Hajji, membre du jury
Département des opérations et systèmes de décision à la Faculté des sciences de
l'administration, Université Laval

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 septembre 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le docteur Ali Gharbi, qui s'est toujours montré à l'écoute tout le long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner, de noter mon travail et de l'enrichir avec leurs propositions.

Je remercie mes parents, mon épouse, mes deux enfants, ainsi que toute ma famille pour leurs soutiens incondtionnels et leurs supports moraux.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

POLITIQUE DE CONTRÔLE DE PRODUCTION, DE QUALITÉ ET DE SÉLECTION DE FOURNISSEURS

Lamdjed TOLBA

RÉSUMÉ

Le travail présenté dans ce mémoire traite le problème de commande des systèmes manufacturiers non fiable et complexes. Il comprend des politiques de contrôle de production, de la qualité et de sélection de fournisseurs. Généralement, un contrôle de la qualité est effectué par échantillonnage à la réception de la matière première. Le risque que les lots acceptés contiennent une proportion d'items défectueux est omniprésent, ce qui génère des coûts de rejet sur les produits finis. Dans le cas des lots rejetés après échantillonnage, ils sont retournés au fournisseur impliquant des délais et des coûts de pénurie plus grands, ou inspectés en totalité par un contrôle à 100%, générant ainsi des délais et des coûts de contrôle supplémentaires. Notre projet consiste à élaborer un modèle réactif, qui varie selon les niveaux d'inventaires en amont et en aval de la production, qui nous permettra de trouver une politique de commande qui minimisera le coût encouru. En premier lieu, une description du système à l'étude et une approche de résolution seront présentées, puis une comparaison entre la politique de contrôle à 100% et le retour au fournisseur est réalisée, suivi d'une analyse, pour ressortir les paramètres qui font qu'une politique est meilleure que l'autre. Ensuite, une étude comparative entre ces politiques de contrôle et une combinaison des deux que nous noterons politique hybride est menée pour savoir laquelle est la plus avantageuse et dans quel cas l'adopter. Finalement, nous proposons une nouvelle politique de commande combinée à une stratégie de sélection de fournisseurs et nous optimisons ses paramètres afin de minimiser le coût total encouru.

Vu la complexité des problèmes considérés, une approche expérimentale basée sur une combinaison des méthodes statistiques d'optimisation et d'outil de simulation est utilisée afin d'optimiser les paramètres de commande de chaque système étudié. Les modèles de simulations sont conçus en combinant des événements discrets et continus pour modéliser les flux continus ainsi que la nature dynamique et stochastique des systèmes de productions. L'efficacité de l'approche adoptée est vérifiée par des analyses de sensibilité.

Mots clés : systèmes manufacturiers non fiables, planification de la production, politique à seuil critique, contrôle de la qualité, contrôle à 100%, sélection de fournisseurs, simulation, plans d'expérience, méthodologie de surface de réponse.

POLITIQUE DE CONTRÔLE DE PRODUCTION, DE QUALITÉ ET DE SÉLECTION DE FOURNISSEURS

Lamdjed TOLBA

ABSTRACT

The work presented in this paper addresses the problem of control of unreliable and complex manufacturing systems. It includes policies to control production, quality and supplier's selection. Generally, a quality control is carried out by sampling at the reception of the raw material. The risk that accepted materials contain a proportion of defective items is omnipresent, which generates disposal costs on finished products. In the case of rejected materials after sampling, they are returned to the supplier involving time and cost shortage, or inspected by a full control, generating time and additional cost. Our project is to develop a reactive model, which varies according to the inventory levels upstream and downstream of production, allowing us to find control policies that minimize the cost. First, a description of the system under study and solving approach will be presented, and a comparison between the 100% control policy and return to the supplier policy is made, followed by an analysis to highlight the parameters that make a policy better than the other. Then, a comparative study between these controls policies and a combination of both called hybrid is conducted to find out which is the most advantageous. Finally, we propose a new policy control combined with a strategy of supplier's selection and we optimized its parameters to minimize the total cost incurred.

Given the complexity of issues considered, an experimental approach based on a combination of statistical methods of optimization and simulation tool is used to optimize the control parameters of each system studied. Simulation models are designed by combining discrete and continuous events, in order to modeled continuous flow, dynamic and stochastic nature of production system. The efficiency of the approach is verified by sensitivity analyzes.

Keywords: unreliable manufacturing systems, production planning, hedging point policy, quality control, 100% inspection, supplier's selection, simulation, experimental design, response surface methodology.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE..... | 5 |
| 1.1 Politique de contrôle à seuil critique | 8 |
| 1.2 Contrôle de la qualité..... | 10 |
| 1.2.1 Plans d'échantillonnage..... | 10 |
| 1.2.2 Qualité moyenne après un contrôle à 100%..... | 15 |
| 1.2.3 Qualité moyenne après contrôle simple..... | 15 |
| 1.3 Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation..... | 16 |
| 1.4 Conclusion | 18 |
| CHAPITRE 2 POLITIQUE DE CONTRÔLE À 100 % ET DE RETOUR AU FOURNISSEUR D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION NON- FIABLE..... | 21 |
| 2.1 Politique de contrôle à 100%..... | 24 |
| 2.1.1 Formulation du problème..... | 26 |
| 2.1.2 Politique de commande..... | 29 |
| 2.1.3 Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation..... | 30 |
| 2.1.4 Modèle de simulation..... | 31 |
| 2.1.5 Validation du modèle de simulation..... | 34 |
| 2.1.6 Plan d'expériences et méthodologie de surface de réponse..... | 36 |
| 2.1.7 Analyse de sensibilité..... | 39 |
| 2.2 Politique de retour au fournisseur..... | 42 |
| 2.2.1 Formulation du problème..... | 43 |
| 2.2.2 Politique de commande..... | 45 |
| 2.2.3 Validation du modèle de simulation..... | 47 |
| 2.2.4 Plan d'expériences et méthodologie de surface de réponse..... | 49 |
| 2.3 Comparaison des deux politiques..... | 52 |
| 2.3.1 Variation du coût de contrôle de la qualité..... | 52 |
| 2.3.2 Variation du délai de livraison..... | 53 |
| 2.3.3 Sévérité des plans d'échantillonnage simple..... | 54 |
| 2.3.4 Variation du coût de pénurie..... | 56 |
| 2.3.5 Discussion générale..... | 57 |
| CHAPITRE 3 POLITIQUE HYBRIDE DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION..... | 59 |
| 3.1 Notation et formulation du problème..... | 60 |
| 3.1.1 Notation..... | 60 |
| 3.1.2 Formulation du problème..... | 61 |
| 3.2 Modèle de simulation..... | 66 |
| 3.2.1 Validation du modèle de simulation..... | 69 |
| 3.2.2 Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse..... | 70 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3.2.3 | Analyse de sensibilité pour la politique hybride | 74 |
| 3.3 | Comparaison des trois politiques..... | 76 |
| 3.3.1 | Variation du coût de contrôle de la qualité | 77 |
| 3.3.2 | Variation du délai de livraison | 78 |
| 3.3.3 | Sévérité des plans d'échantillonnage simple..... | 79 |
| 3.3.4 | Variation du coût de pénurie | 80 |
| | | |
| CHAPITRE 4 | POLITIQUE DE COMMANDE DE LA PRODUCTION ET DE SÉLECTION DE FOURNISSEURS D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER NON FIABLE..... | 83 |
| 4.1 | Notation et formulation du problème | 84 |
| 4.1.1 | Notation..... | 84 |
| 4.1.2 | Formulation du problème..... | 85 |
| 4.1.3 | Politique de commande | 89 |
| 4.2 | Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation..... | 91 |
| 4.2.1 | Modèle de simulation..... | 92 |
| 4.2.2 | Validation du modèle de simulation..... | 95 |
| 4.2.3 | Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse..... | 96 |
| 4.2.4 | Analyse de sensibilité..... | 100 |
| 4.3 | Influence de la variation de la qualité, du délai et du coût unitaire | 103 |
| 4.3.1 | Influence de la variation de la qualité effective | 104 |
| 4.3.1.1 | Cas d'un seul fournisseur | 105 |
| 4.3.1.2 | Cas des fournisseurs 1 et 2 | 106 |
| 4.3.1.3 | Cas des fournisseurs 1 et 3 | 107 |
| 4.3.1.2 | Cas de trois fournisseurs | 108 |
| 4.3.2 | Influence de la variation du délai de livraison | 109 |
| 4.3.2.1 | Cas d'un seul fournisseur..... | 109 |
| 4.3.2.2 | Cas des fournisseurs 1 et 2..... | 110 |
| 4.3.2.3 | Cas des fournisseurs 1 et 3..... | 111 |
| 4.3.2.4 | Cas de trois fournisseurs | 112 |
| 4.3.3 | Influence de la variation du coût unitaire..... | 113 |
| 4.3.3.1 | Cas d'un seul fournisseur..... | 114 |
| 4.3.3.2 | Cas des fournisseurs 1 et 2..... | 115 |
| 4.3.3.3 | Cas des fournisseurs 1 et 3..... | 116 |
| 4.3.3.4 | Cas de trois fournisseurs..... | 117 |
| 4.3.4 | Discussion générale..... | 118 |
| | | |
| CONCLUSION | | 121 |
| | | |
| ANNEXE I | MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC POLITIQUE DE CONTRÔLE À 100 %..... | 123 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| ANNEXE II | MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC RETOUR AU FOURNISSEUR..... | 133 |
| ANNEXE III | MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC LA POLITIQUE HYBRIDE..... | 141 |
| ANNEXE IV | MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC SÉLECTION DE FOURNISSEURS..... | 151 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | | 165 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | Page |
|---------------|---|------|
| Tableau 1. 1 | Calcul de la probabilité d'acceptation Pa | 13 |
| Tableau 2. 1 | Paramètre de validation de la politique..... | 34 |
| Tableau 2. 2 | Paramètres de coût du système | 36 |
| Tableau 2. 3 | Paramètres de simulation du système | 36 |
| Tableau 2. 4 | Niveaux des variables indépendantes | 37 |
| Tableau 2. 5 | Analyse de la variance pour la variable de réponse..... | 38 |
| Tableau 2. 6 | Analyse de sensibilité de la politique de contrôle à 100 % | 41 |
| Tableau 2. 7 | Valeurs considérées pour la validation du modèle | 47 |
| Tableau 2. 8 | Niveaux des variables indépendantes | 49 |
| Tableau 2. 9 | Analyse de la variance pour le coût total | 50 |
| Tableau 2. 10 | Valeurs du coût pour les deux politiques..... | 51 |
| Tableau 2. 11 | Variations des paramètres de comparaison..... | 52 |
| Tableau 2. 12 | Valeurs du coût total avec variation du coût de contrôle de la qualité | 53 |
| Tableau 2. 13 | Valeurs du coût total avec variation du délai de livraison..... | 54 |
| Tableau 2. 14 | Valeurs du coût total pour les différents plans..... | 55 |
| Tableau 2. 15 | Valeurs du coût total avec variation du coût de pénurie..... | 56 |
| Tableau 3. 1 | Valeurs de validation du modèle de simulation..... | 69 |
| Tableau 3. 2 | Paramètres de coût du système | 71 |
| Tableau 3. 3 | Paramètres de simulation du système | 71 |
| Tableau 3. 4 | Niveaux des variables indépendantes | 72 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tableau 3. 5 | Résumé des résultats pour les trois politiques | 73 |
| Tableau 3. 6 | Analyse de sensibilité pour la politique hybride..... | 76 |
| Tableau 3. 7 | Valeurs du coût total pour les différentes politiques avec variation du coût de contrôle de la qualité | 77 |
| Tableau 3. 8 | Valeurs du coût total pour les différentes politiques avec variation du délai de livraison | 79 |
| Tableau 3. 9 | Valeurs du coût total pour les différentes politiques en variant le plan d'échantillonnage simple | 80 |
| Tableau 3. 10 | Valeurs du coût total pour les différentes politiques en variant le coût de pénurie | 81 |
| Tableau 4. 1 | Valeurs des pondérations pour la politique de sélection entre trois fournisseurs | 95 |
| Tableau 4. 2 | Paramètres de coût du système | 97 |
| Tableau 4. 3 | Paramètres de simulation du système | 97 |
| Tableau 4. 4 | Niveaux des variables indépendantes | 98 |
| Tableau 4. 5 | Analyse de variance pour le coût total | 99 |
| Tableau 4. 6 | Analyse de sensibilité de la politique de sélection de fournisseurs | 103 |
| Tableau 4. 7 | Influence de la qualité effective sur la politique de commande..... | 105 |
| Tableau 4. 8 | Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation de la qualité effective..... | 106 |
| Tableau 4. 9 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 2 avec variation de la qualité effective | 107 |
| Tableau 4. 10 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 3 avec variation de la qualité effective | 108 |
| Tableau 4. 11 | Coût total et gain avec la politique de sélection de trois fournisseurs avec variation de la qualité effective | 109 |
| Tableau 4. 12 | Influence du délai de livraison sur la politique de commande..... | 109 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tableau 4. 13 | Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation du délai de livraison..... | 110 |
| Tableau 4. 14 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 2 avec variation du délai..... | 111 |
| Tableau 4. 15 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 3 avec variation du délai..... | 112 |
| Tableau 4. 16 | Coût total et gain avec la politique de sélection des trois fournisseurs avec variation du délai..... | 113 |
| Tableau 4. 17 | Influence du coût unitaire sur la politique de commande..... | 114 |
| Tableau 4. 18 | Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation du coût unitaire . | 115 |
| Tableau 4. 19 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 2 avec variation du coût unitaire | 116 |
| Tableau 4. 20 | Coût total et gain avec la politique de sélection des deux fournisseurs 1 et 3 avec variation du coût unitaire | 117 |
| Tableau 4. 21 | Coût total et gain avec la politique de sélection des trois fournisseurs avec variation du coût unitaire | 118 |
| Tableau 4. 22 | Total des gains pour la politique de sélection..... | 119 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|--------------|---|------|
| Figure 0. 1 | Structure d'un système de production..... | 2 |
| Figure 0. 2 | Diagramme de l'approche de résolution utilisée | 3 |
| Figure 1.1 | Concept d'un plan d'échantillonnage simple..... | 11 |
| Figure 1. 2 | Courbe d'efficacité d'un plan d'échantillonnage..... | 14 |
| Figure 1. 3 | Courbe de la qualité moyenne des lots après contrôle..... | 16 |
| Figure 1. 4 | Approche expérimentale proposée..... | 17 |
| Figure 2. 1 | Structure du système étudié avec la politique de contrôle à 100%..... | 24 |
| Figure 2. 2 | Diagramme du modèle de simulation | 33 |
| Figure 2. 3 | Variations des inventaires et du taux de production | 35 |
| Figure 2. 4 | Diagramme de Pareto standardisé du coût..... | 37 |
| Figure 2. 5 | Contour de la variable de réponse..... | 38 |
| Figure 2. 6 | Structure du système manufacturier étudié sous la politique de retour au fournisseur..... | 42 |
| Figure 2. 7 | Trajectoires des niveaux des inventaires..... | 48 |
| Figure 2. 8 | Graphique de Pareto et surface de réponse pour le coût..... | 50 |
| Figure 2. 9 | Variations du cout de contrôle de la qualité..... | 53 |
| Figure 2. 10 | Variation du délai de livraison | 54 |
| Figure 2. 11 | Variation du plan d'échantillonnage simple..... | 55 |
| Figure 2. 12 | Variation du coût de pénurie..... | 56 |
| Figure 3.1 | Structure du système étudié avec la politique hybride..... | 61 |
| Figure 3. 2 | Diagramme du modèle de simulation | 67 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figure 3. 3 | Dynamiques des stocks sous la politique hybride..... | 70 |
| Figure 3. 4 | Graphique de Pareto pour le coût total | 72 |
| Figure 3. 5 | Surface de réponse du coût total | 73 |
| Figure 3. 6 | Comparaison des trois politiques en variant le coût de contrôle de la qualité..... | 78 |
| Figure 3. 7 | Comparaison des trois politiques en variant le délai de livraison..... | 79 |
| Figure 3. 8 | Comparaison des trois politiques en variant le plan d'échantillonnage simple | 80 |
| Figure 3. 9 | Comparaison des trois politiques en variant le coût de pénurie..... | 81 |
| Figure 4. 1 | Structure du système étudié | 85 |
| Figure 4. 2 | Diagramme du modèle de simulation | 93 |
| Figure 4. 3 | Dynamique des inventaires | 96 |
| Figure 4. 4 | Graphique de Pareto pour la politique | 98 |
| Figure 4. 5 | Surface de réponse du coût total | 99 |
| Figure 4. 6 | Structure du système étudié avec trois fournisseurs | 104 |
| Figure 4. 7 | Variation de p pour le cas du fournisseur 1 | 105 |
| Figure 4. 8 | Variation de p pour le cas des fournisseurs 1 et 2 | 106 |
| Figure 4. 9 | Variation de p pour le cas des fournisseurs 1 et 3 | 107 |
| Figure 4. 10 | Variation de p pour le cas de trois fournisseurs..... | 108 |
| Figure 4. 11 | Variation de D_l pour le cas du fournisseur 1..... | 110 |
| Figure 4. 12 | Variation de D_l pour le cas des fournisseurs 1 et 2..... | 111 |
| Figure 4. 13 | Variation de D_l pour le cas des fournisseurs 1 et 3..... | 112 |
| Figure 4. 14 | Variation de D_l pour le cas de trois fournisseurs | 113 |
| Figure 4. 15 | Variation de C_{unit} pour le cas du fournisseur 1 | 114 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Figure 4. 16 | Variation de C_{unit} pour le cas des fournisseurs 1 et 2 | 115 |
| Figure 4. 17 | Variation de C_{unit} pour le cas des fournisseurs 1 et 3 | 116 |
| Figure 4. 18 | Variation de C_{unit} pour le cas de trois fournisseurs..... | 117 |
| Figure 4. 19 | Comparaison des differents cas de sélection de fournisseurs | 119 |
| Figure A-I- 1 | Tableau de bord du modèle..... | 123 |
| Figure A-I- 2 | Modèle de simulation avec la politique de contrôle à 100% | 123 |
| Figure A-II- 1 | Modèle de simulation avec politique de retour au fournisseur | 133 |
| Figure A-III- 1 | Modèle de simulation avec la politique hybride | 141 |
| Figure A-IV-1 | Tableau de bord du modèle..... | 151 |
| Figure A-IV-2 | Modélisation section continu, données et panne/réparation | 151 |
| Figure A-IV-3 | Modélisation de la section évènement et sélection fournisseurs | 152 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|---------------|---|
| $x(t)$ | Niveau d'inventaire de la matière première |
| $y(t)$ | Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit fini |
| S | Stock de sécurité de la matière première |
| Q | Quantité économique à commander |
| Z_1 | Seuil critique de production |
| Z_2 | Seuil de choix de politique/sélection de fournisseur |
| d | Taux de la demande |
| dem | Taux de la demande réelle |
| u | Taux de production |
| U_{max} | Taux maximum de production |
| $MTTF$ | Temps moyen de fonctionnement du système |
| $MTTR$ | Temps moyen de réparation du système |
| θ_i | Instant de lancement de commande du lot i de matière première |
| D_i | Délai de livraison du fournisseur |
| ϑ_i | Temps d'arrivée du lot i de matière première en inventaire |
| C_{unit} | Coût unitaire de la matière première |
| C_{com} | Coût de passation de commande |
| C_0^+ | Coût unitaire d'inventaire de la matière première |
| C_1^+ | Coût unitaire d'inventaire de produit fini |
| C_1^- | Coût unitaire de la pénurie |
| C_{prod} | Coût unitaire de production |

| | |
|-------------|---|
| C_{cq} | Coût unitaire de contrôle de la qualité |
| C_{rej} | Coût unitaire de rejet |
| p^i | Qualité effective du le lot i |
| P_a^i | Probabilité d'acceptation du lot i |
| n | Taille de l'échantillon |
| c | Critère d'acceptation |
| k | Nombre d'items non conformes dans l'échantillon n |
| τ_{cq} | Durée de contrôle de la qualité |
| QÉC | Quantité économique à commander |
| LÉP | Lot économique à produire |
| HJB | Hamilton-Jacobi-Bellman, équation |
| HPP | Seuil critique de production |

INTRODUCTION

La conjoncture et la réalité mondiale actuelles font du milieu manufacturier un terrain de concurrence féroce du fait de la mondialisation, de la demande croissante des produits, ainsi que des exigences très strictes de la clientèle. Koren et al. (1999), notent que pour surmonter ces difficultés, les entreprises doivent se configurer suivant leurs environnements instables. Les systèmes de production requièrent un contrôle et une surveillance continue pour arriver à une performance optimale (Whittle, 1996). Les environnements et systèmes industriels étant en développement continu, leur maintien est conditionné par la capacité d'offrir des produits à moindre coût et de bonne qualité, avec des délais de livraison concurrentielle. Pour cela, ils doivent avoir des choix de stratégies, qui passent par une gestion efficace de leurs ressources et activités.

Un système est un ensemble d'éléments qui interfèrent mutuellement pour offrir des biens ou des services. Ces derniers doivent respecter les conditions de prix, de qualité, de quantité et de délai de livraison. Les activités de production sont sujettes à des événements aléatoires qui les perturbent telles que la fluctuation des délais de livraison, de la qualité de la matière première, des pannes et des réparations... etc. Cependant, les méthodes classiques de planification et la gestion de la production ne prennent pas en compte ces phénomènes aléatoires. La figure 0.1 représente la structure générale d'un système de production typique que nous traitons dans ce mémoire.

La première préoccupation des industriels étant la survie de leurs entreprises, ils sont continuellement condamnés à la maîtrise de l'ensemble des politiques de commande et de planification de leurs productions. Le constant développement des systèmes manufacturiers dans le temps, exige une maintenance rigoureuse des installations, une maîtrise sur le contrôle de qualité, une amélioration des méthodes de production et une bonne gestion des stocks tampons, afin de minimiser les coûts qui en découlent. Notre projet de recherche s'inscrit dans ce cadre général. Il a pour objectif l'étude des interactions entre les politiques

de commande de production, le contrôle de la qualité de la matière première et de sélection entre plusieurs fournisseurs.

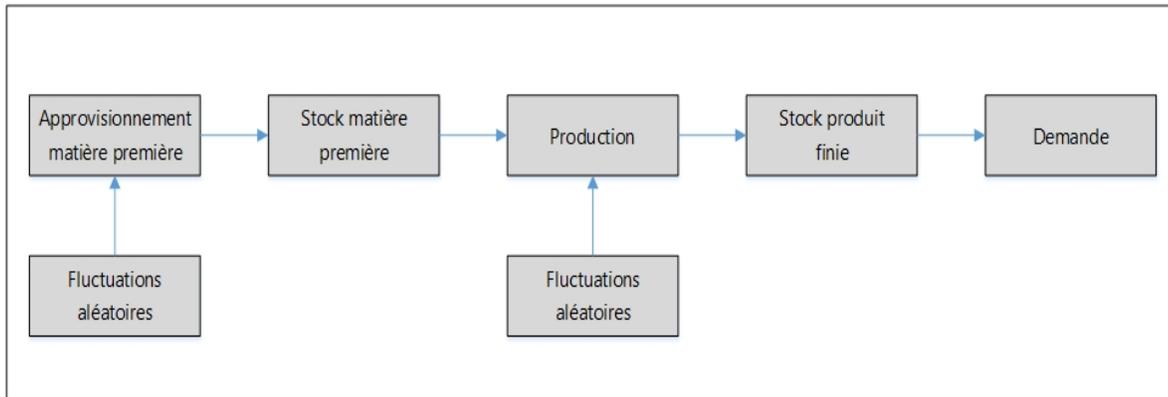


Figure 0. 1 Structure d'un système de production

Les politiques de commande et de planification rétroactive sont destinées aux systèmes de production à flux continu. La planification de la production des systèmes manufacturiers en présence de contrôle de la qualité en amont de la transformation de la matière première, des délais de livraison, des choix entre fournisseurs a été peu étudiée, car ces systèmes sont définis par une dynamique très complexe qui ne permet pas de les approximer par des flux continus, tout en démontrant des restrictions pour représenter leurs dynamiques réelles. Le développement de méthodes empiriques est incontournable vu les limitations mathématiques des approches de résolution analytique (Boukas et Haurie, 1990). L'optimisation des paramètres des politiques de commande, basée sur les outils de simulations combinés aux méthodes statistiques ont été proposés par Gharbi et Kenné (2000). En effet, cette combinaison permet de reproduire le comportement des systèmes de production complexe à l'aide de l'outil de simulation et d'optimiser leurs paramètres de commande. Nous avons opté pour cette approche pour déterminer les valeurs optimales des paramètres des politiques de commande étudiées dans ce mémoire, la figure 0.2 représente cette approche. Le comportement du système de production est déterminé puis il est représenté analytiquement suivant sa problématique de commande. Tous les paramètres de commande à optimiser sont ensuite incorporés dans un plan d'expériences avec le logiciel Statgraphics. La dynamique du

Le système est ensuite modélisé en utilisant le logiciel Arena avec une approche combinée par événements continus/discrets (Kelton et al., 2007). L'étape suivante est de faire une validation du modèle de simulation pour vérifier la reproduction fidèle du comportement du système étudié. Une analyse de la variance (ANOVA) et la méthodologie de réponse de surface sont menées par la suite, pour déterminer les interactions entre les facteurs et les effets significatifs qu'ils ont sur la variable de réponse (le coût total). Pour confirmer l'efficacité de l'approche utilisée, nous utiliserons une analyse de sensibilité en variant les paramètres du coût, puis nous interpréterons des résultats obtenus et des phénomènes observés.

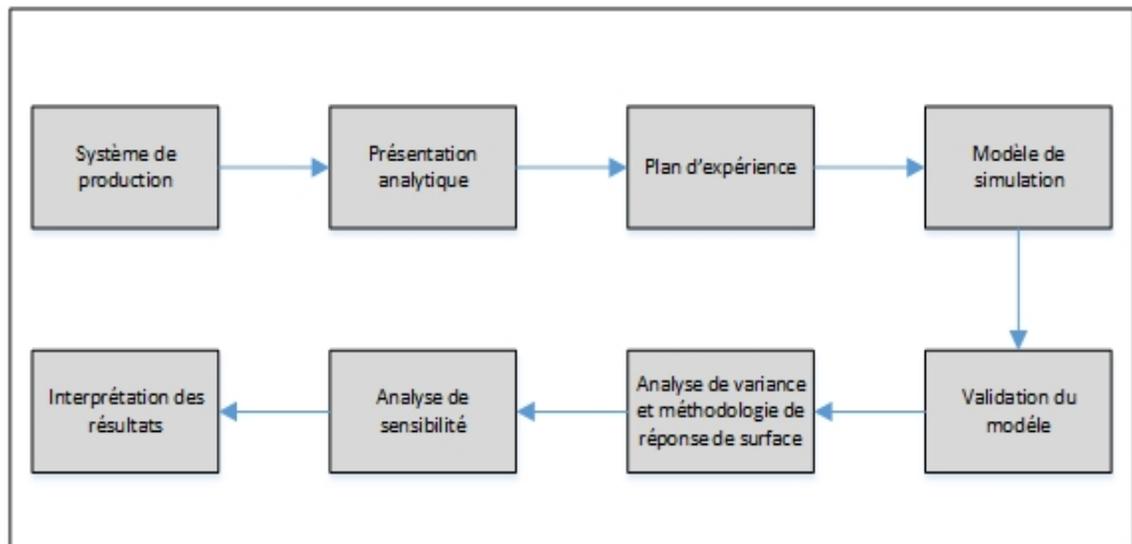


Figure 0. 2 Diagramme de l'approche de résolution utilisée

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le chapitre 1 est une revue de littérature qui décrit les différentes notions introduites dans le but de mener à bien notre recherche. Le chapitre 2, traite le problème de commande optimale d'un système manufacturier non-fiable approvisionné par un fournisseur dont les délais de livraison et la qualité effective sont variables. Nous y étudierons et comparons deux politiques basées sur le contrôle de la qualité à 100 % et le retour au fournisseur. Dans le chapitre 3, nous proposerons une troisième politique hybride qui combine le contrôle à 100 % et le retour au fournisseur, afin de

déterminer une loi de commande qui minimise le coût total encouru, puis nous ferons une étude comparative entre les trois politiques. Enfin, dans le chapitre 4, nous proposerons une nouvelle politique de commande et de sélection de fournisseurs pour un système de production non-fiable. Nous y ferons une étude sur la stratégie de sélection de fournisseurs pour démontrer que le recours à de multiples fournisseurs est économiquement plus intéressant.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette revue de la littérature a pour but de positionner notre projet de recherche par rapport aux plusieurs autres travaux, et d'introduire le lecteur aux principaux thèmes que nous traiterons. Nous y présenterons les politiques de contrôle des systèmes non-fiables, la politique de contrôle à seuil critique, les techniques de contrôle statistique de la qualité et l'approche de résolution basée sur la simulation.

On trouve dans la littérature plusieurs études de recherche et plusieurs théories sur les politiques de contrôle de la production ainsi que de l'approvisionnement de différents types de systèmes manufacturiers sujet à des pannes et réparations aléatoires. Ces études se basent principalement, sur les systèmes dont les états sont représentés par un processus Markovien. L'équation de programmation dynamique de la politique de commande optimale d'un système manufacturier fonctionnant dans un environnement stochastique selon un processus Markovien a été introduite par Olsder et Suri (Olsder et Suri, 1980) qui se sont basé sur la théorie de contrôle des systèmes de production sujet à des pannes et réparations aléatoires suivant des processus Markoviens homogènes (Richel, 1975). Les conditions optimales de la commande stochastique de la production sont caractérisées par les équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). Plusieurs études ont été menées pour trouver une solution à ces équations afin d'élaborer une politique rétroactive (feedback policies) qui permet un bon contrôle sur les systèmes de production. Caramanis et Sharifnia (1991) considèrent que les méthodes classiques de la gestion et la planification de la production telle que : la planification des ressources de production (Manufacturing Resources Planning (MRP)) et la planification des ressources de l'entreprise (Enterprise Resource Planning (ERP)) sont incapables d'anticiper les changements aléatoires de la capacité de production. Les politiques de commande stochastique et rétroactive peuvent prévenir les effets des phénomènes aléatoires qui perturbent l'ensemble du système de production et d'avoir un meilleur contrôle (Gershwin, 1994). Kimemia et Gershwin (1983), ainsi que Akella et Kumar (1986) ont introduit et démontré l'optimalité de la notion de politique de seuil critique (Hedging Point

Policy (HPP)), pour le contrôle du taux de la production dans un système manufacturier composé d'une seule machine produisant un seul type de produit (M_1P_1) où la dynamique du système est décrite par une chaîne de Markov homogène (taux de transition constants). Cette notion consiste à produire et à maintenir un niveau de produit final déterminé, lorsque les machines sont opérationnelles, pour éviter de tomber en pénurie lors d'avènements de pannes. Sharifnia (1988) a pris en compte les différents états d'une machine pour introduire la structure de multiples seuils critiques (MHPP). Des études ont été menées par Feng et Yan (2000), sur la politique de contrôle de la production des systèmes non fiables qui font face à une demande stochastique. Pour les systèmes produisant plusieurs types de produits Caramanis et Sharifnia (1991) ont décomposé le problème de commande complexe à plusieurs types de produits (M_1P_n), en plusieurs problèmes de commande simple avec un seul type de produit (M_1P_1) qui peut être traité analytiquement. En négligeant le temps de mise en course (Setup) d'un système de production composé d'une seule machine produisant plusieurs types de produits, Sethi et Zhang (1999) ont formulé explicitement le problème de la commande optimale. Dans la même veine, Gharbi et Kenné (2003) ont traité le problème de commande de la production d'un système manufacturier avec de multiples machines et multiples produits. Bai et Elhafsi (1997) ont considéré la durée et les coûts de mise en course pour un système de production non flexible (M_1P_2), pour élaborer les conditions d'optimalités énoncés par les équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman, pour ensuite présenter une structure dite Hedging Corridor Policy (HCP) adaptée à la politique de commande. Une commande sous-optimale améliorée de la HCP appelée MHCP (Modified Hedging corridor Policy) a été généralisée par Gharbi et al. (2006). La politique de production et de la mise en course des systèmes manufacturiers non-fiables, a été développée par Hajji et al. (2004).

Barlow et Hunter (1960) sont les premiers à travailler sur les politiques de maintenance en introduisant deux concepts pour les stratégies de maintenance. La première politique de maintenance préventive de type âge (Age Replacement Preventive maintenance policy (ARP)) qui se traduit par le remplacement des unités après une durée constante de fonctionnement ou lors d'avènement de panne. La deuxième politique de maintenance de type bloc (Bloc Replacement Preventive maintenance policy (BRP)) qui repose sur le remplacement des unités suivant des intervalles fixes dans le temps ou lors de panne. Boukas

et Haurie (1990) ont étudié l'influence de la maintenance préventive sur le contrôle de la production. Les interventions de maintenance se divisent en deux grandes catégories : la maintenance corrective (CM), lorsque le système est en panne et la maintenance préventive (PM) pendant le fonctionnement du système.

Le contrôle de la production et de l'inventaire des systèmes de production par lot repose sur les modèles classiques du lot économique à produire (LÉP), qui permettent le calcul de la taille optimale du lot à produire qui minimise le coût total encouru (MC Clain et al. 1985). Ce modèle est applicable seulement aux systèmes de production parfaitement fiables et de qualité parfaite. Groenevelt et al. (1992a) sont les premiers à déterminer la taille du lot économique à produire, pour les systèmes manufacturiers non-fiables et parfaits soumis à des pannes aléatoires. Des extensions ont été faites pour des temps d'inter pannes différentes (Kim et al., 1997). En considérant que la détérioration de la qualité d'un système est un processus aléatoire, Rosenblatt et Lee (1986) ont démontré que le modèle du LÉP des systèmes manufacturiers fiables et imparfaits est moindre que le LÉP classique. Dans le cas des systèmes de productions non-fiables et imparfaits, des recherches récentes ont été menées pour déterminer le temps de production du modèle de LÉP soumis à des pannes aléatoires (Chiu et al., 2007). L'intégration des stratégies de maintenance préventive et corrective à ce dernier modèle a été élaborée par Liao et al. (2009).

Le concept de contrôle de la détérioration de la qualité introduite par Lee et Rosenblatt (1987) a pour but l'inspection des produits pour déterminer si le système de production est « en contrôle » ou « hors contrôle », sans considération au traitement des items défectueux qui risquent d'être livrés aux clients. Étant donné que le contrôle à 100 % de tous les lots produits est très coûteux en point de vue économique (Chin et Harlow, 1982), des techniques de contrôle statistique de la qualité ont été adoptées, afin d'assurer une qualité optimale pour les clients. Ces techniques de contrôle de qualité sont généralement appliquées sur les produits finis. Le modèle de quantité économique à commander (QÉC) fut introduit par Harris (1913), pour minimiser les coûts de commande et de maintien de l'inventaire. Ce modèle n'est pas réaliste du fait qu'il suppose que la qualité est parfaite ($P_a = 100\%$), ce qui

n'est pas le cas dans la plupart des industries. Plusieurs recherches ont été faites sur des cas réalistes où la qualité est imparfaite et les fournisseurs non fiables. Porteus (1986) a étudié l'effet de la qualité imparfaite sur la quantité économique à commander en présence d'un approvisionnement aléatoire. De leurs parts, Salameh et Jaber (2000) ont présenté un modèle mathématique du modèle QÉC modifié qui prend en considération la qualité imparfaite du lot commandé.

Les stratégies de l'organisation de la chaîne d'approvisionnement ont été mises à jour par Tan et al. (1998) dans le but d'une coordination étroite entre les différents organes de la chaîne d'approvisionnement. Pour les manufacturiers la fonction de fourniture est largement considérée comme une clé importante dans l'amélioration des performances de toute la chaîne d'approvisionnement (Chuang, 2004). Pour leurs parts, Lee et al. (2001), Chan et Chan (2010) considèrent qu'un système d'échanges d'informations et de coopération est primordial, afin de coordonner les activités des systèmes manufacturiers et les organismes externes tels que les fournisseurs. L'article de Hajji et al. (2010) traite le contrôle de l'approvisionnement et de la production. Les auteurs déterminent qu'un contrôle optimal est obtenu par le contrôle du stock de sécurité S , de la taille de la quantité économique à commander Q et du niveau d'inventaire de produit fini désiré Z . De leurs parts, Hajji et al. (2010) ont traité le contrôle de l'approvisionnement et de la production. Ils ont déterminé un contrôle optimal en présence de plusieurs fournisseurs qui peuvent être disponibles ou non et qui sont chacun caractérisés par des coûts unitaires, des coûts de passation de commande et des délais de livraison différents.

1.1 Politique de contrôle à seuil critique

Kimemia et Gershwin (1983) ont élaboré la politique de contrôle à seuil critique, qui consiste à maintenir un stock de sécurité de l'inventaire de la matière finale à un certain niveau optimal dit : seuil critique, et ce, pendant les périodes de fonctionnement du système de production, pour satisfaire la demande lorsque ce dernier devient indisponible (non fonctionnel). La programmation dynamique et stochastique leur a permis de modéliser le problème de contrôle et d'approximée le seuil critique par une heuristique, dans le but de

minimiser le coût total de l'inventaire et de rupture de stock. La résolution analytique des équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman pour un problème de contrôle d'une M_1P_1 (une seule machine un seul type de produit), sujette à des pannes et réparations exponentielles, a été faite par Akella et Kumar (1986), en démontrant la réalité d'un seuil critique optimal Z^* , qui minimise le coût total. La formulation de cette politique de contrôle est la suivante :

$$u(x(t), \alpha(t)) = \begin{cases} \alpha(t) u_{max} & \text{si } y(t) < Z^* \\ \alpha(t) d & \text{si } y(t) = Z^* \\ 0 & \text{si } y(t) > Z^* \end{cases} \quad (1.1)$$

Sachant que :

$u(x(t), \alpha(t))$: Le taux de production.

$y(t)$: Le niveau instantané d'inventaire à l'instant t .

$\alpha(t) \in \{0,1\}$: Le processus stochastique Markovien de disponibilité ou non du système.

Bielecki et Kumar (1988) ont confirmé cette politique rétroactive qui permet de contrôler le taux de production en fonction de l'état instantané de l'inventaire $y(t)$. Le taux de production est maximal si $y(\cdot)$ est inférieur au seuil critique Z^* , et est égale au taux de la demande si le niveau d'inventaire est maintenu au niveau du seuil critique, sinon la production est arrêtée pour ne pas avoir un surplus de produits qui génère des coûts supplémentaires. Sharifnia (1988) a étendu le modèle de Bielecki et Kumar (1988) en considérant une machine avec plusieurs états.

La résolution analytique des équations HJB étant impossible pour les systèmes manufacturiers complexes, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour déterminer la meilleure commande en se basant sur les hypothèses du modèle d'Akella et Kumar (1986). Caramanis et Sharifnia (1991) ont décomposé le problème de contrôle de production de plusieurs produits en un ensemble de problèmes de contrôle d'un seul type de produit analytiquement facile à aborder, et ce en se basant sur les résultats de Sharifnia (1988). Pour les systèmes ayant des états qui sont décrits par des processus Markoviens non homogènes, Boukas et Haurie (1990) ont élaboré une solution des équations HJB, basée sur

la méthode de Kushner (Kushner et Dupuis, 2001). Pour leurs parts, Kenné et al. (2003) ont utilisé cette dernière approche pour résoudre le problème de commande optimale d'un système avec plusieurs machines identiques produisant plusieurs types de produits. La politique de production à seuil critique, dans le cas où les pannes et les réparations sont non-markoviens et/ou la demande est aléatoire a été généralisée par Kenné et Gharbi (2000). Le modèle de contrôle optimal non-markovien ne pouvant pas être décrit par la théorie de contrôle classique, ils ont pu développer et valider un modèle de simulation permettant de déterminer le seuil critique pour n'importe quelles distributions de probabilité qui caractérisent les pannes, les réparations et la demande.

1.2 Contrôle de la qualité

Afin de déterminer le rendement de la qualité des systèmes de production et des services, des techniques de contrôle de la qualité ont été adoptés afin de suivre en temps réel l'état de la qualité des systèmes et d'assurer la conformité des biens et des services, selon les besoins des consommateurs (Besterfield, 2009). Ces techniques contribuent au maintien et au développement des améliorations continues (Montgomery, 2009).

1.2.1 Plans d'échantillonnage

Afin de remplacer les activités du contrôle à 100 % de tous les lots fabriqués dans les laboratoires de Bell téléphonie, H.F. Dodge et H.G. Romig (1928) ont introduits la méthode d'acceptation des lots produits par un plan d'échantillonnage. Cette méthode s'avère incontournable surtout dans les cas où le contrôle à 100 % est impossible à réaliser par exemple dans un système à haute cadence de production, ainsi que sur les produits où le contrôle devient destructif ou très coûteux. Le contrôle de la qualité par échantillonnage est applicable à la réception de la matière première (contexte d'approvisionnement) ou sur les produits finis destinés aux clients afin de s'assurer de l'exigence de qualité demandée (contexte de satisfaction client). Il existe plusieurs types de plans d'échantillonnage dans la

littérature, nous notons quatre types : le plan d'échantillonnage simple, double, multiple et progressif. Le plan d'échantillonnage simple est défini comme :

Un plan d'échantillonnage simple est caractérisé par deux nombres : n , la taille de l'échantillon; c , le critère d'acceptation. La méthode de contrôle est donc la suivante : on veut contrôler un lot de pièces identiques d'effectif N , un échantillon de taille n est prélevé au hasard de ce lot. Les n pièces sont contrôlées une à une et le lot est accepté si le nombre k de pièces non conformes dans l'échantillon ne dépasse pas le critère d'acceptation c , sinon le lot n'est pas accepté. (Baillargeon, 1995, p.10)

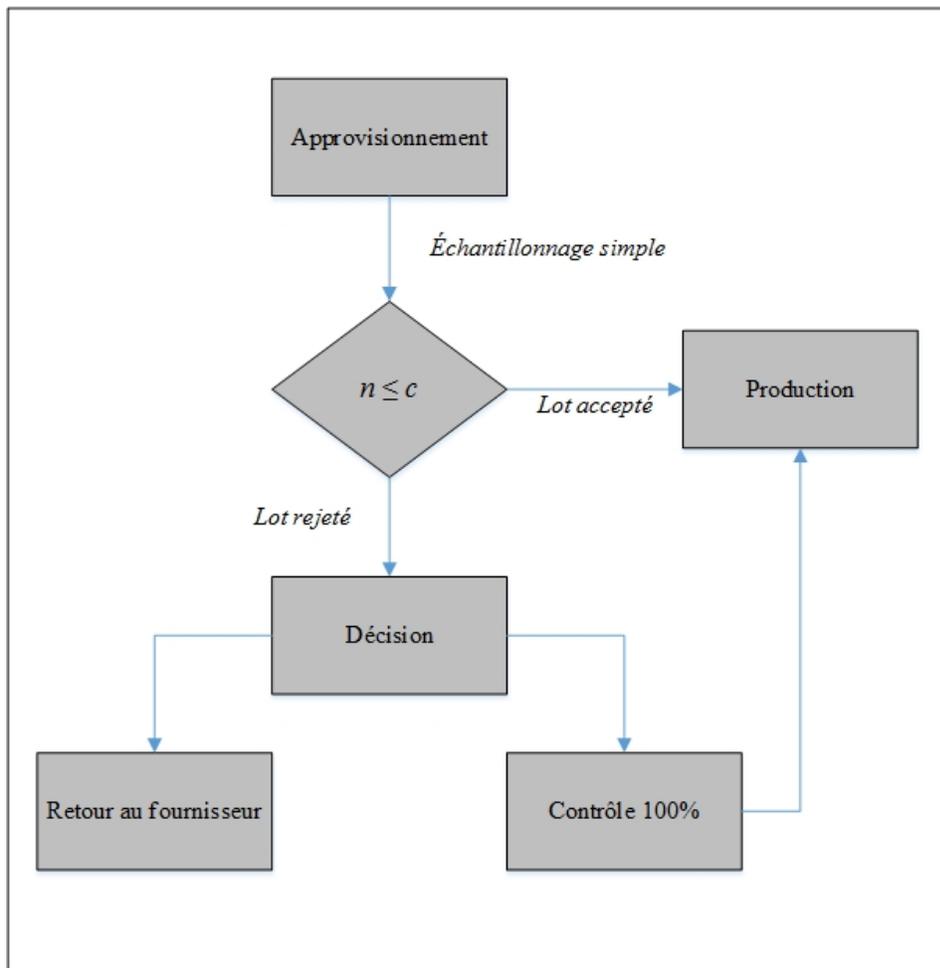


Figure 1. 1 Concept d'un plan d'échantillonnage simple

La figure 1.1 illustre le concept d'un plan d'échantillonnage simple dans un contexte d'approvisionnement d'un système de production. Si la condition $k \leq c$ est respectée, le lot est accepté et le nombre k de pièces défectueuses est remplacé par le même nombre de bonnes pièces connu. Le lot rejeté est soit retourné au fournisseur pour être remplacé générant ainsi des délais et des coûts supplémentaires ou contrôler à 100 %, introduisant aussi des délais et des coûts de contrôle en plus. C'est sur cet axe que notre recherche portera pour déterminer quelle politique est la moins coûteuse et de trouver une politique hybride qui combine les deux.

La probabilité d'acceptation P_a d'un lot contenant un pourcentage d'items défectueux noté p appeler aussi qualité effective, dans un plan d'échantillonnage simple caractérisé par les paramètres n et c , est calculée en utilisant la loi binomiale (Schilling et Neubauer, 2009) :

$$P_a = P\{k \leq c\} = \sum_{k=0}^c \frac{n!}{k!(n-k)!} (p)^k (1-p)^{n-k} \quad (1.2)$$

En fonction des valeurs choisies pour n et c , nous pouvons déterminer trois catégories de plans d'échantillonnage simple :

① Plan relâché :

Le plan d'échantillonnage simple relâché est caractérisé par une probabilité d'acceptation élevée bien que la qualité effective soit détériorée. Le premier graphe sur la figure 1.2 représente l'allure de la courbe pour ce plan dans le cas où : $n = 105$ et $c = 5$.

② Plan modéré :

Pour le plan d'échantillonnage simple modéré, la probabilité d'acceptation est moins élevée que l'autre plan. Le deuxième graphe sur la figure 1.2 représente l'allure de la courbe pour ce plan dans le cas où : $n = 99$ et $c = 4$.

③ Plan sévère :

Pour le plan d'échantillonnage simple sévère, la probabilité d'acceptation est plus resserrée que les deux autres plans. Le troisième graphe sur la figure 1.2 présente l'allure de la courbe pour ce plan dans le cas où : $n = 92$ et $c = 2$.

Le tableau 1.1 représente le calcul de la probabilité d'acceptation respective pour chaque catégorie. Notons que nous avons utilisé la loi de Poisson avec le logiciel Excel pour faire ce calcul. La différence entre ces trois catégories de plan d'échantillonnage simple réside dans la taille de l'échantillon n et le critère d'acceptation c . Si la taille de l'échantillon est très grande que le critère d'acceptation, la possibilité qu'un grand nombre de pièces défectueuses passent dans un lot contrôlé devient plus grande, puisque la probabilité d'acceptation dans ce cas est aussi élevée. Nous utiliserons ces catégories de plan dans le développement de notre étude lors de la variation de la qualité effective.

Tableau 1. 1 Calcul de la probabilité d'acceptation P_a

| Plan Relâché | | Plan Modéré | | Plan Sévère | |
|--------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| p | P_a | p | P_a | p | P_a |
| 0,0 % | 100,00 % | 0,0 % | 100,00 % | 0,0 % | 100,00 % |
| 0,5 % | 100,00 % | 0,5 % | 99,98 % | 0,5 % | 99,83 % |
| 1,0 % | 99,92 % | 1,0 % | 99,65 % | 1,0 % | 98,55 % |
| 2,0 % | 98,41 % | 2,0 % | 94,91 % | 2,0 % | 86,07 % |
| 3,0 % | 91,91 % | 3,0 % | 82,03 % | 3,0 % | 65,40 % |
| 4,0 % | 79,14 % | 4,0 % | 63,67 % | 4,0 % | 44,13 % |
| 4,5 % | 71,06 % | 4,5 % | 54,07 % | 4,5 % | 34,99 % |
| 5,0 % | 62,47 % | 5,0 % | 44,93 % | 5,0 % | 27,21 % |
| 6,0 % | 45,54 % | 6,0 % | 29,32 % | 6,0 % | 15,66 % |
| 7,0 % | 30,97 % | 7,0 % | 17,95 % | 7,0 % | 8,55 % |
| 8,0 % | 19,87 % | 8,0 % | 10,43 % | 8,0 % | 4,47 % |
| 9,0 % | 12,13 % | 9,0 % | 5,81 % | 9,0 % | 2,26 % |
| 10,0 % | 7,10 % | 10,0 % | 3,12 % | 10,0 % | 1,11 % |

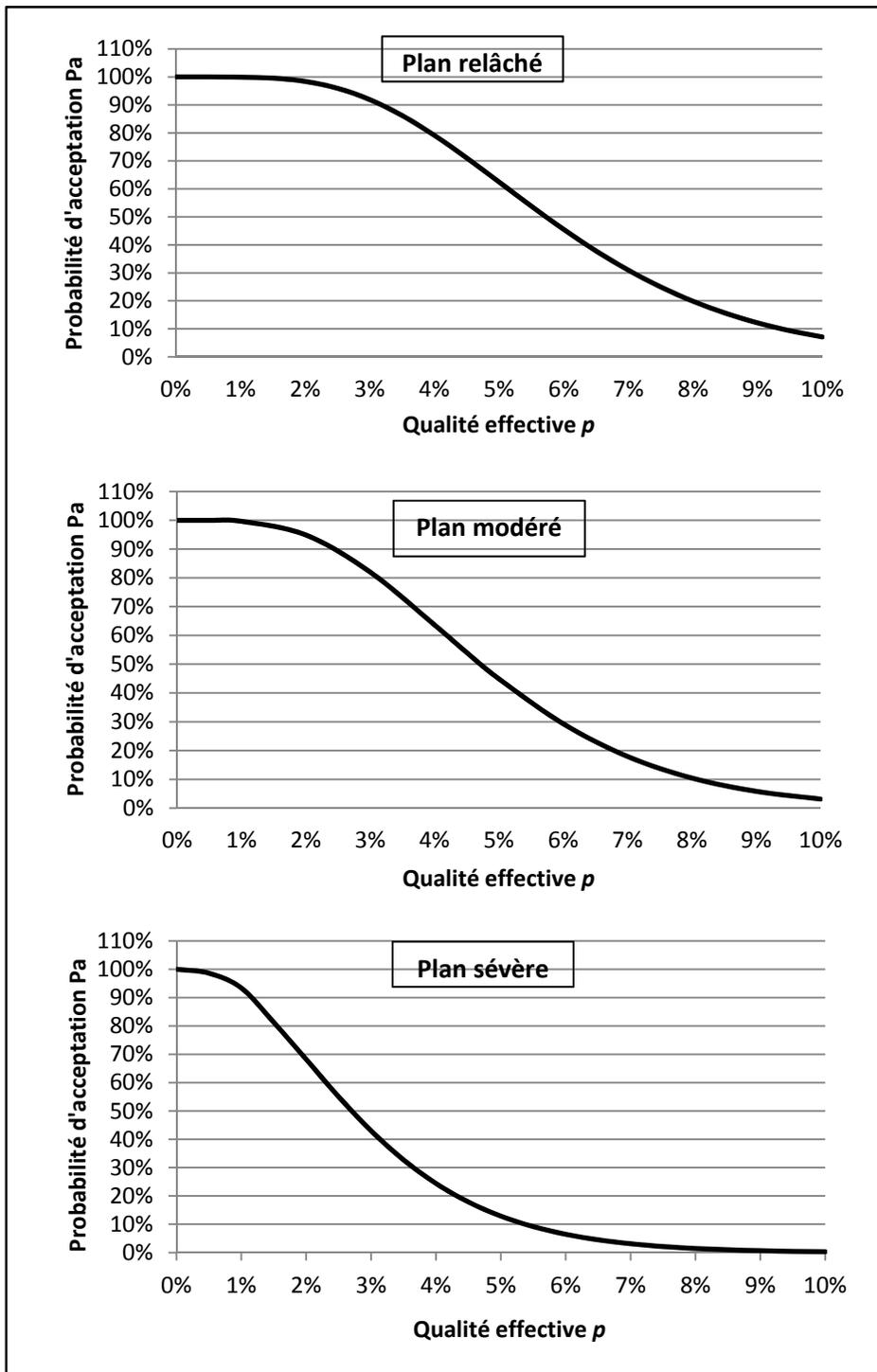


Figure 1. 2 Courbes d'efficacités des plans d'échantillonnage relâché, modéré et sévère

1.2.2 Qualité moyenne après un contrôle à 100 %

Le pourcentage d'items non conformes qui reste dans des lots après un contrôle à 100 % et qui n'est pas rectifié ou remplacé, est notée la qualité moyenne des lots après contrôle (Average Outgoing Quality (AOQ)). En sachant que Q sont la taille du lot et n la taille du prélèvement pour l'échantillonnage, ce pourcentage est calculé en utilisant la formule décrite par Baillargeon (1995) :

$$AOQ = \frac{P_a p(Q-n)}{Q-p[(n.P_a+Q(1-P_a)]} \quad (1.3)$$

En pratique, si p est très petit, on peut approximer la qualité moyenne des lots après contrôle par la formule suivante :

$$AOQ \cong p P_a \quad (1.4)$$

1.2.3 Qualité moyenne après contrôle simple

Les lots qui sont acceptés sans passer par un contrôle à 100 % contiennent des items non conformes qui peuvent pénétrer dans le stock. La qualité moyenne après contrôle (AOQ) est donnée suivant la formule de Schilling et Neubauer (2009) :

$$AOQ = p P_a \left(\frac{Q-n}{Q} \right) \quad (1.5)$$

En pratique, dans les opérations de contrôle de la qualité le rapport n/Q est toujours très petit, donc on obtient la même formule que (1.4) (Besterfield, 2009). La courbe de AOQ en fonction de la qualité effective, pour les paramètres $c = 3$, $n = 92$ et $Q = 1800$, est donnée par la figure 1.3.

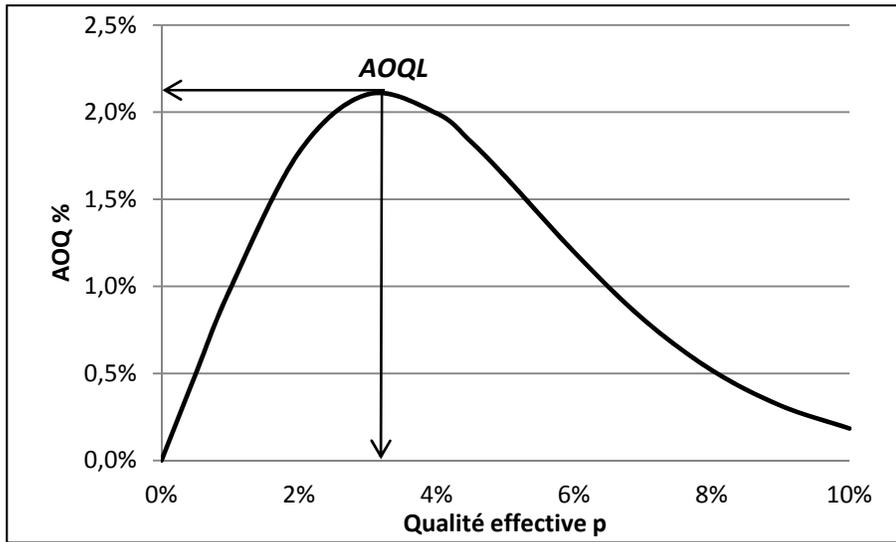


Figure 1.3 Courbe de la qualité moyenne des lots après contrôle

Quand tous les items sont conformes ($p = 0$) l' AOQ est nulle. Elle augmente avec la détérioration de la qualité, jusqu'à un maximum appelé valeur maximale de la qualité moyenne après contrôle avec rectification $AOQL$, puis elle diminue avec l'augmentation des lots rejetés.

1.3 Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation

Afin de résoudre la problématique sur le contrôle des systèmes de production, Kenné et Gharbi (1999) ont proposé l'adoption de l'approche expérimentale qui combine la puissance de la modélisation par simulation, qui peut reproduire le comportement d'un système de production sans restriction, ainsi que les plans d'expériences et le modèle de réponse de surface. Cette approche a été utilisée avec succès dans plusieurs travaux de recherche, citant Gharbi et al. (2006) pour l'intégration des stratégies de mise en course dans les systèmes de production, Berthaut et al. (2010) pour les stratégies de maintenance, Hajji et al. (2010) pour l'approvisionnement et la décision de choix de fournisseurs. La figure 1.4 représente l'application de l'approche expérimentale pour le contrôle des systèmes manufacturiers proposée par Gharbi et Kenné (2003).

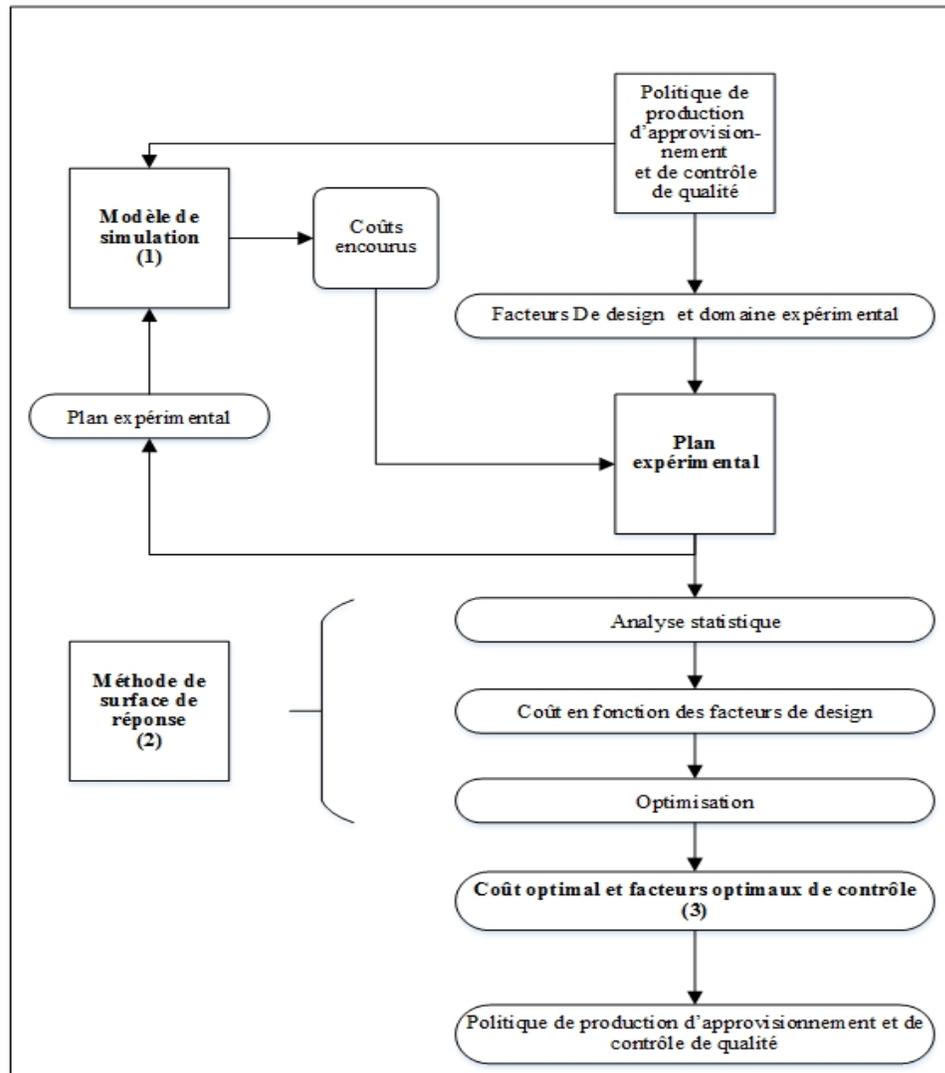


Figure 1. 4 Approche expérimentale proposée par Gharbi et Kenné (2003)

On peut résumer cette approche selon les étapes suivantes :

1- Modèle de simulation :

Le modèle de simulation élaboré par le logiciel ARENA utilisant le langage SIMAN (SIMulation ANALysis), avec des sous-programmes écrits en langage C++, est un outil performant pour développer les modèles combinés discrets continus (Pegden et al. 1995).

Les paramètres de la politique de contrôle sont considérés comme les intrants du modèle et le coût total relatif est défini comme son extrant. La combinaison des modèles de simulation discrets/continus permet la représentation de l'aspect stochastique et dynamique d'un système décrit par des équations différentielles et de réduire le temps d'exécution (Lavoie et al. 2007).

2- Plan d'expériences :

Pour déterminer les critères de performances du système, les paramètres de la politique de contrôle (variables d'entrées) sont utilisés et variés dans un plan d'expériences, pour connaître les interactions et les effets significatifs qu'ils ont sur la variable de sortie (coût encouru), à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA).

3- Méthodes de surface de réponse :

Cette méthode permet de déterminer la relation entre la variable de sortie et les effets significatifs des facteurs d'entrées, ainsi que leurs interactions. La convexité de la fonction coût est généralement obtenue par un modèle de régression quadratique. Cette fonction est ensuite optimisée pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de la politique de contrôle (Montgomery, 2008).

1.4 Conclusion

Cette revue de la littérature nous a permis d'aborder les principales recherches menées durant les dernières décennies, qui traitent des politiques de contrôle de la production des différents types de systèmes manufacturés produisant un ou plusieurs types de produits. Dans la première partie, nous avons mis à jour la complexité des systèmes manufacturés et le problème de commande optimale stochastique des systèmes de production. Cette complexité se traduit par le fait que les recherches menées ne pouvaient pas prendre en considération tous les aspects réels des environnements de production. Puis nous avons présenté en deuxième partie une technique de contrôle statistique de la qualité par plan d'échantillonnage simple et les différents types de plans que nous pouvons utiliser. Finalement, nous avons

présenté l'approche de résolution expérimentale basée sur la simulation proposée par Gharbi et Kenné (2000, 2003) que nous utiliserons au long de ce mémoire.

D'après notre compréhension, les recherches menées dans la revue de littérature sur les problèmes de commande optimale des systèmes de production non fiables sont peu à avoir pris en considération le contrôle statistique de la qualité de la matière première avant le cycle de transformation et la possibilité du retour des lots rejetés aux fournisseurs sélectionnés. Dans les chapitres suivants, nous proposerons des études des problèmes de commande optimale des systèmes manufacturiers, avec le contrôle statistique de la qualité en amont du cycle de production avec un retour aux fournisseurs, ainsi qu'une politique de sélection de fournisseurs pour les stratégies d'approvisionnement.

CHAPITRE 2

POLITIQUE DE CONTRÔLE À 100 % ET DE RETOUR AU FOURNISSEUR D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION NON-FIABLE

Ce chapitre traite le problème d'optimisation des politiques de commande de production d'un système manufacturier non-fiable dans un contexte d'un environnement stochastique avec l'application des techniques de contrôle statistique de la qualité de la matière première avant le cycle de production. Il se divise en trois volets : le premier consacré à la politique de contrôle à 100 %, le deuxième à la politique de retour au fournisseur et le dernier à une comparaison entre ces deux politiques. Notre étude s'appuie sur la structure de la politique de production, d'approvisionnement et de contrôle de la qualité déjà développée dans la littérature par Hajji et al. (2010) et Bouslah et al. (2011) respectivement.

Plusieurs travaux de recherche ont porté sur la planification de la production des systèmes manufacturiers non fiables. La notion de la production à seuil critique (HPP) a été élaborée par Kimemia et Gershwin (1983). Elle consiste à bâtir puis maintenir, un niveau d'inventaire égal à un seuil critique optimal lorsque le système de production est opérationnel pour pouvoir faire face à la demande quand le système est en panne. L'existence d'un tel seuil critique optimal a été prouvée analytiquement dans le cas d'une machine qui fabrique un seul type de produit par Akella et Kumar (1986). En considérant le même problème, Sharifnia (1988) a considéré plusieurs états de la machine pour démontrer que la politique de production optimale a une structure de multiples seuils critiques (MHPP). La plupart des travaux de recherche sur les politiques de contrôle de la production sont basés sur la notion de la production à seuil critique (Kenné et Gharbi, 2000). Plusieurs extensions ont été faites sur cette notion, notons Bai et Elhafsi (1997), Sethi et al. (1998), Sethi et Zhang (1999), Boukas et Haurie (1990) et Feng et Yan (2000).

L'incertitude sur la qualité des produits des matières premières/finis en amont et aval d'un système manufacturier a été étudiée dans le contexte de l'approvisionnement/production en se basant sur les modèles de la quantité économique à commander/produire. Silver (1976) et

Shih (1980) ont travaillé sur le modèle de la quantité économique à produire (LÉP), en assumant que tous les items défectueux sont immédiatement identifiés et écartés du lot. Lee et Rosenblatt (1987) ont démontré que la quantité économique à produire diminue lorsque le taux d'items défectueux augmente. Salameh et Jaber (2000) ont présenté un modèle mathématique du modèle LÉP modifié qui prend en considération la qualité imparfaite du lot qui contient une fraction de pièces défectueuses ($p \neq 0$), et que chaque lot rejeté est inspecté à 100 % pour écarter les items défectueux. Ils ont démontré que la taille du LÉP augmente avec l'augmentation du pourcentage des items défectueux, ce qui vient en contradiction avec les résultats de Lee et Rosenblatt (1987), puisque ces derniers ont assumé que les items défectueux sont rectifiés et remis en stock instantanément. Plusieurs extensions sur les travaux de Salameh et Jaber (2000) ont été élaborées par des chercheurs notons : Cárdenas et Barrón (2000) qui apportèrent une correction mineure sur l'expression mathématique de la quantité optimale à commander, Huang (2004) qui a formulé la même expression mais dans un contexte de transport, Wee et al. (2007) en permettant les pénuries.

Récemment des travaux menés sur l'incertitude dans l'approvisionnement et les critères de sélection des fournisseurs ont pris en compte les aléas de la production pour passer d'un modèle à un échelon à celui de plusieurs échelons. La chaîne d'approvisionnement étant un organisme externe, les systèmes manufacturiers n'ont aucun contrôle direct sur elle. Pour cela des politiques de commande incluant les stratégies de sélection de fournisseurs ont été élaborées à travers plusieurs études de recherches. Parlar et Perry (1995, 1996) ont proposé un modèle d'inventaire (Q, r, T) pour contrôler un milieu de production dynamique stochastique avec un seul et plusieurs fournisseurs où la disponibilité présente deux états continus dans le temps d'une chaîne de Markov. Moinzadeh et Nahmias (1998) ont à leurs tours analysé une extension de la politique (s, Q) , ou l'ordre de commande d'une quantité économique (QÉC) n'est fait que lorsque le niveau d'inventaire atteint le seuil s . Ils ont proposé une politique (s_1, s_2, Q_1, Q_2) basée sur le niveau du stock en main. Lorsque s_1 est atteint, on fait une commande régulière Q_1 et si durant le délai de livraison, le seuil s_2 est aussi atteint on fait une commande d'urgence Q_2 . Hajji et al. (2009) ont proposé des stratégies de contrôle de la production et d'approvisionnement avec de multiples fournisseurs,

qui offre un gain sur le coût encouru par rapport à la politique à un seul. Ils ont aussi mis en évidence la nécessité de fonctionner avec plusieurs fournisseurs.

Afin de mener notre étude, la notation suivante sera utilisée tout au long de ce chapitre :

| | |
|---------------|---|
| x | : Niveau d'inventaire de la matière première |
| y | : Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit fini |
| S | : Stock de sécurité de la matière première |
| Q | : Quantité économique à commander |
| Z_1 | : Seuil critique de production (HPP) |
| d | : Taux de la demande |
| dem | : Taux de la demande réelle |
| u | : Taux de production |
| U_{max} | : Taux maximum de production |
| $MTTF$ | : Temps moyen de fonctionnement du système |
| $MTTR$ | : Temps moyen de réparation |
| θ_i | : Instant de lancement de commande du lot i de matière première |
| D_i | : Délai de livraison du fournisseur |
| ϑ_i | : Temps d'arrivée du lot i de matière première en inventaire |
| C_{unit} | : Coût unitaire de la matière première |
| C_{com} | : Coût de passation de commande |
| C_0^+ | : Coût unitaire d'inventaire de la matière première |
| C_1^+ | : Coût unitaire d'inventaire du produit fini |
| C_1^- | : Coût unitaire de la pénurie |
| C_{prod} | : Coût unitaire de production |
| C_{cq} | : Coût unitaire de contrôle de la qualité |
| C_{rej} | : Coût unitaire de rejet |
| p^i | : Qualité effective du lot i |
| P_a^i | : Probabilité d'acceptation du lot i |

- n : Taille de l'échantillon
 c : Critère d'acceptation d'un lot
 k : Nombre d'items non conformes dans l'échantillon n
 τ_{cq} : Durée de contrôle de la qualité

2.1 Politique de contrôle à 100 %

Le système manufacturier étudié est composé d'une installation qui produit un seul type de produit fini, qui fait face à un taux de demande constant. Cette installation est sujette à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent occasionner des ruptures des stocks. L'approvisionnement en matière première se fait par un fournisseur non fiable avec un délai de livraison variable D_l unités de temps. À la réception d'un lot une technique statistique de contrôle de la qualité par un plan d'échantillonnage simple (1.2.1) est appliquée pour statuer sur son acceptation ou son rejet. Chaque item de l'échantillon n est contrôlé pour vérifier l'acceptabilité du lot tout en considérant le critère $k \leq c$. Si le lot est rejeté, un contrôle à 100 % est effectué et les items défectueux sont écartés. La figure 2.1 décrit la structure du système manufacturier étudié.

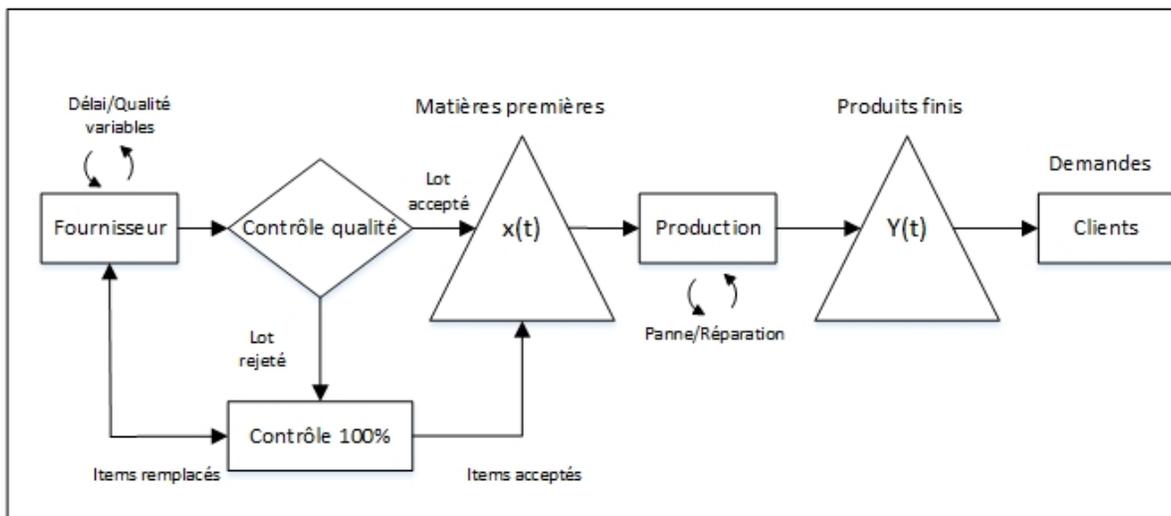


Figure 2. 1 Structure du système étudié avec la politique de contrôle à 100 %

Cette structure peut être détaillée comme suit :

1. Un fournisseur fournit en quantité Q_i de matières premières le système avec un délai d'approvisionnement aléatoire D_i sujet aux lois de probabilité. Chaque lot reçu contient une proportion d'items défectueux $p(\cdot)$ qui varie selon une distribution de probabilité connue. On assume que le nombre d'items défectueux dans le lot i reçu est calculé selon $p^i Q_i$. Chaque lot commandé génère des coûts unitaires C_u et de passation de commande C_{com} .

2. Un contrôle de la qualité se fait par un plan d'échantillonnage simple de paramètres n et c durant $n \times \tau_{cq}$ unité de temps et génère un coût de contrôle $n \times C_{cq}$. La probabilité d'acceptation P_a du lot i est donnée suivant la formule (1.2). Le pourcentage d'items de mauvaise qualité qui peut passer dans le lot i s'il est accepté est donné suivant (1.5). La durée ϑ_i avant laquelle il est mis en stock est égale à $\theta_i + D_i + n \times \tau_{cq}$. S'il est rejeté, un contrôle à 100 % durant une période $(Q_i - n) \times \tau_{cq}$ unité de temps est effectué, pour écarter $p^i \times (Q_i - n)$ items défectueux. La durée ϑ_i avant laquelle le lot est mis en stock est égale à $\theta_i + D_i + (Q_i - n) \times \tau_{cq}$, avec $(1 - p^i) \times Q_i$ le nombre d'items de bonne qualité qui se trouve dans ce lot (Bousslah et al., 2011). Les lots acceptés sont stockés en attente d'utilisation à un coût unitaire de stockage C_0^+ . On assume que la relation entre le fournisseur et le système de production est tel que tous les items défectueux détectés lors de l'opération de contrôle de la qualité sont rejetés et immédiatement remplacés par des items de bonne qualité et à la charge du fournisseur.

3. Un système de production qui produit au coût C_{prod} , subit des pannes et des réparations aléatoires le rendant indisponible, ce qui génère des coûts unitaires de pénurie C_1^- . Faisant face à un taux de demande constant, il ajuste son taux de production selon les niveaux d'inventaires des matières premières et des produits finis. Les produits finis sont stockés en attente de livraison aux clients à des coûts unitaires de stockage C_1^+ .

4. Une clientèle qui exige un produit de qualité, en quantité suffisante et dans les meilleurs délais. Les produits de mauvaise qualité sont rejetés avec un coût unitaire de rejet C_{rej} , puis remplacés par la même quantité de produits finis de bonne qualité. Afin d'anticiper ce remplacement, le taux de la demande doit être proportionnel au AOQ, donc la valeur réelle de la demande dem sera égal à $d/(1 - AOQ(t))$; avec : $AOQ(t) \cong pP_a$

2.1.1 Formulation du problème

Vu l'aspect stochastique du système que nous étudions, nous pouvons modéliser son état par trois composantes : ① Le niveau de surplus cumulatif (inventaire si positif et pénurie si négatif) mesuré par $y(t)$, ayant une nature continue dans le temps. ② Le niveau d'inventaire continu à l'instant t de la matière première mesurée par $x(t) = (s(t) + c(t))Q$, où $s(t)$ est la quantité des lots acceptés après un échantillonnage simple et $c(t)$ la quantité des lots acceptés après un contrôle à 100 % (Bouslah et al. 2011). Ce système fait face en aval à une demande continue suivant un taux de production u et en amont à un fournisseur, où Q_i est la quantité du lot i de matière première reçue à l'instant $\theta_i + D_i$. Même si le système manufacturier est disponible, la production ne pourra se faire si $x(t)$ est égal à zéro, avec $0 \leq x(t) \leq L$ la contrainte maximale de la capacité de stockage de la matière première. ③ La composante discrète $\alpha(t)$ décrit l'état du système de production tel que :

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1: \text{Le système de production disponible} \\ 2: \text{Le système de production non disponible} \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour le système considéré l'espace d'état est donnée par (x, y, α) tel que :

$$x(t) \in [0, L]; y(t) \in R; \alpha(t) \in M = \{1, 2\}$$

La dynamique des niveaux des inventaires $x(t)$ et $y(t)$ est donnée par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = u(t, \alpha) - \frac{d}{1-p^i p_a^i}, & y(0) = y, \forall t \geq 0 \\ \dot{x}(t) = -u(t, \alpha), & x(0) = x, \forall t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[\\ x(\vartheta_i^+) = x(\vartheta_i^-) + a^i \cdot Q_i(t), & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec,

$$a^i = \begin{cases} 1 & \text{si le lot } i \text{ est accepté} \\ 1 - p^i & \text{si le lot } i \text{ est rejeté et contrôlé à 100\%} \end{cases}$$

Où x et y désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire de la matière première et du produit fini. ϑ_i^+ et ϑ_i^- sont les limites positive et négative de l'instant de réception du lot i en stock et N est le nombre de commandes reçues sur l'ensemble de l'horizon.

Le taux de production et la quantité de matière première à commander doivent satisfaire les contraintes de capacité de production et d'approvisionnement données par :

$$\begin{cases} 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \times Ind\{\alpha(t) = 1\} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.3)$$

Nos variables de décision sont le taux de production $u(\cdot)$ et la séquence de commande d'approvisionnement que nous notons : $\Omega = \{(\theta_i, Q_i), \dots\}$, $i = 1, \dots, N$. En tenant compte de (2.3) et pour chaque mode $\alpha \in M = \{1, 2\}$, l'ensemble des décisions admissibles est présenté par :

$$A(\alpha) = \begin{cases} (\Omega, u(\cdot)): 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \times Ind\{\alpha(t) = 1\} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.4)$$

La fonction du coût instantané qui pénalise, le maintien en stock de la matière première, de l'inventaire du produit fini (pénurie) et du taux de production est défini par $g(\cdot)$ tel que :

$$g(x(t), y(t), u(t, \alpha)) = C_0^+ \cdot x + C_1^+ \cdot y^+ + C_1^- \cdot y^- + C_{prod} \cdot u(t) + C_{rej} \cdot p^i Q_i, \quad (2.5)$$

avec, $t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[$

La fonction instantanée des coûts d'approvisionnement (commande et prix unitaire) et de contrôle de la qualité des lots de la matière première est donnée par :

$$\begin{aligned}
 R(Q_i, \alpha) = & C_{com} \text{Ind}\{t = \theta_i\} + C_{unit} \cdot Q_i + \text{Ind}\{t = \theta_i + D_l\} C_{cq} \cdot n \\
 & + \text{Ind}\{(t = \theta_i + D_l + n \cdot \tau_{cq}) \text{ et } (a^i = 1 - p)\} C_{cq} \cdot (Q_i \\
 & - n) + E_\alpha \int_0^{\vartheta_i} e^{-\rho t} g(x - u(t, \alpha), y + u(t, \alpha) \\
 & - \frac{d}{1 - p^i \cdot P_a^i} \cdot t, u(t, \alpha)) dt
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

En utilisant (2.5) et (2.6), le coût total $J(\cdot)$ est défini par :

$$\begin{aligned}
 J(\cdot) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, y, u) dt + \sum_{i=0}^\infty e^{-\rho \vartheta_i} (C_{com}^i + C_{unit}^i \cdot Q_i + C_{cq}^i \cdot n) \right. \\
 \left. + \sum_{i=0/a^i \neq 1}^\infty e^{-\rho \vartheta_i} \cdot C_{cq}^i \cdot (Q_i - n) \right]
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Le problème de la planification de production considéré consiste à établir une politique de commande admissible $(\Omega, u(\cdot))$ qui minimisera le coût moyen total $J(\cdot)$ actualisé donné par l'équation (2.7), tout en respectant les contraintes des équations et les inégalités (2.2)-(2.6). Cette politique est une rétroaction qui détermine le taux de production et la politique d'approvisionnement en fonction de l'état du système. La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$v(x, y, \alpha) = \min_{(\Omega, u) \in A} J(x, y, u, \theta, \Omega, Q, \alpha) \tag{2.8}$$

Plusieurs travaux de recherche ont déterminé que les propriétés de la fonction valeur conduisent à des conditions d'optimalité définies par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB). Vu la complexité de la dynamique du système décrit par les équations (2.2) et la nature stochastique du problème à l'étude, il est pratiquement impossible de trouver une solution analytique pour les équations HJB. Dans la littérature, Boukas et Haurie (1990) ont

proposé une approche de résolution numérique basée sur les méthodes d'approximation de Kushner (Kushner et Dupuis, 1992), pour résoudre les équations de HJB dans le cas où les états du système sont décrits par des processus Markoviens non homogènes. De leurs parts, Gharbi et Kenné (2000, 2003) ont trouvé une solution analytique de ces équations pour les systèmes simples de production avec un nombre limité de produits. Dans le cas de notre système de production, la solution des équations HJB ne peut être obtenue vu la complexité du système. Donc nous nous sommes basés sur la littérature scientifique, afin de proposer une structure de politique de commande combinant simultanément la planification de la production, l'approvisionnement et le contrôle de la qualité.

2.1.2 Politique de commande

En raison de la complexité du problème, nous proposons une structure d'une politique de commande combinant la planification de l'approvisionnement, le contrôle statistique de la qualité et du taux de production en se basant sur les recherches scientifiques dans la revue de littérature à savoir : 1) Hajji et al. (2010) qui ont développé la structure d'une politique de commande de production et d'approvisionnement qui combine les différents seuils (S, Q, Z) pour un système manufacturier flexible. 2) Gharbi et al. (2011) qui ont traité l'utilisation d'une unité de production seulement lorsque le niveau d'inventaire du produit fini est inférieur à un seuil donné. 3) Bouslah et al. (2011) qui ont démontré que la politique du HPP reste optimale pour les systèmes de production non-fiables, en tenant compte de l'effet de l'imperfection de la qualité sur le taux de la demande réelle. La structure de cette politique de commande est donnée par les équations (2.9)-(2.10).

- Contrôle du taux de production :

$$u(.) = \begin{cases} U_{max}.Ind\{\alpha = 1\} & si\ y < Z_1 \\ d/(1 - AOQ(.)).Ind\{\alpha = 1\} & si\ y = Z_1 \\ 0 & si\ y > Z_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Avec, la contrainte de faisabilité du modèle qui est donnée par :

$$\frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \times U_{max} \geq d/(1 - AOQ(.)); AOQ(t) \cong pP_a$$

- Contrôle de l'approvisionnement :

$$\Omega(.) = \begin{cases} Q & \text{si } x \leq S \\ 0 & \text{si } x > S \end{cases} \quad (2.10)$$

Sous les contraintes suivantes : $Z_1 \geq 0$; $S < Q < L$; $S \geq 0$

Pour étudier le comportement réel de ce système de production, nous utilisons dans la section suivante, une approche de résolution expérimentale basée sur la simulation et les méthodes statistiques d'optimisation. Cette méthode largement utilisée dans plusieurs travaux de recherche va nous permettre de trouver les paramètres optimaux (S^* , Q^* , Z_1^*) de la politique de commande (2.9)-(2.10) qui minimisent le coût total (2.7), tout en tenant compte des contraintes associées.

2.1.3 Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation

Pour déterminer les conditions optimales qui régissent une politique de production, Gharbi et Kenné (2000) ont proposé puis validé une approche de résolution, qui combine la simulation, les plans d'expériences, l'analyse de variance et la méthodologie de surface de réponse pour le contrôle de divers systèmes de production. Nous avons adapté cette approche pour notre étude selon les étapes suivantes :

- Étape 1 : Formulation mathématique du problème

La formulation analytique du problème comme indiqué dans la section 2.1.1, permet de comprendre la dynamique du système de production en fonction de ces états et de définir l'expression du coût total moyen prévu.

- Étape 2 : Politique de commande

La politique de commande comme indiquée dans la section 2.1.2 est obtenue en utilisant des arguments théoriques que l'on retrouve dans la revue de littérature. On se base sur cette politique pour le contrôle de la production, des inventaires et de la qualité, ainsi que pour déterminer les facteurs de conception dans le modèle de simulation.

- Étape 3 : Le modèle de simulation

Le modèle de simulation utilise l'étape 2 comme une entrée pour réaliser des expériences et évaluer la performance du système. La variable de réponse (sortie) est le coût total encouru.

- Étape 4 : Plans d'expérience et méthodologie de surface de réponse

L'approche des plans d'expérience définie à partir des valeurs des trois facteurs d'entrées indépendantes S, Q, Z_1 et celle de la variable de réponse associée (c.-à-d. le coût) les principaux facteurs et leurs interactions qui ont un effet significatif sur la sortie. La méthodologie de surface de réponse permet l'optimisation du modèle obtenu pour déterminer les valeurs optimales (S^*, Q^*, Z_1^*) qui minimisent le coût total.

2.1.4 Modèle de simulation

Le modèle de simulation utilisé dans cette étude est une combinaison de modèles discrets continus du simulateur ARENA, avec des sous-programmes en langage C++ (Pegden et al., 1995). Ces derniers introduisent et définissent les équations d'état qui décrivent les variables des inventaires et des commandes en souffrance en utilisant le taux de production et le taux d'approvisionnement comme décrit par la politique de commande, ainsi que les variables binaires des pannes et des réparations des machines et de la disponibilité du fournisseur. Le choix de l'utilisation des modèles discrets continus permet de raccourcir le temps de simulation comparativement à un modèle purement discret (Lavoie et al. 2010). En effet, le temps d'exécution d'une simulation ayant une durée de 500.000 unités de temps est égal à 15 secondes. Le diagramme du modèle de simulation est présenté par la figure 2.2.

- Bloc ① : Initialisation

Il initialise les variables du modèle telles que les valeurs de décisions (S, Q, Z_1), le taux de la demande d , les taux de production (u, U_{max}), le temps moyen entre les pannes et les réparations ($MTTF, MTTR$), les distributions de probabilité du délai de livraison, de l'acceptation et de la qualité effective (D_l, P_a, p), les minimums et maximums des pas d'intégration dans le temps, ainsi que le temps de simulation T_∞ qui doit être assez grand pour garantir l'atteinte du régime permanent.

- Bloc ② : Politiques de commande

Il permet de fixer selon la loi de commande (2-9)-(2-10), le taux de production et de l'approvisionnement en fonction des variations des inventaires de la matière première et du produit fini. Cette variation est détectée avec le bloc ⑨.

- Bloc ③ : Approvisionnement

Il est utilisé pour modéliser l'approvisionnement effectué par le fournisseur et agit directement sur les délais aléatoires des livraisons.

- Bloc ④ : Demande

Le taux de demande est constant est illustré comme bloc à part, juste pour faciliter la compréhension. Il est utilisé comme intrant dans les équations d'état défini dans le sous-programme en langage C++. La demande réelle est calculée en fonction de la valeur de la qualité effective du lot reçu, contrôlé et accepté.

- Bloc ⑤ : Contrôle statistique

Il détermine si le lot de la matière première livré est accepté suite au plan d'échantillonnage simple ou après un contrôle à 100 %.

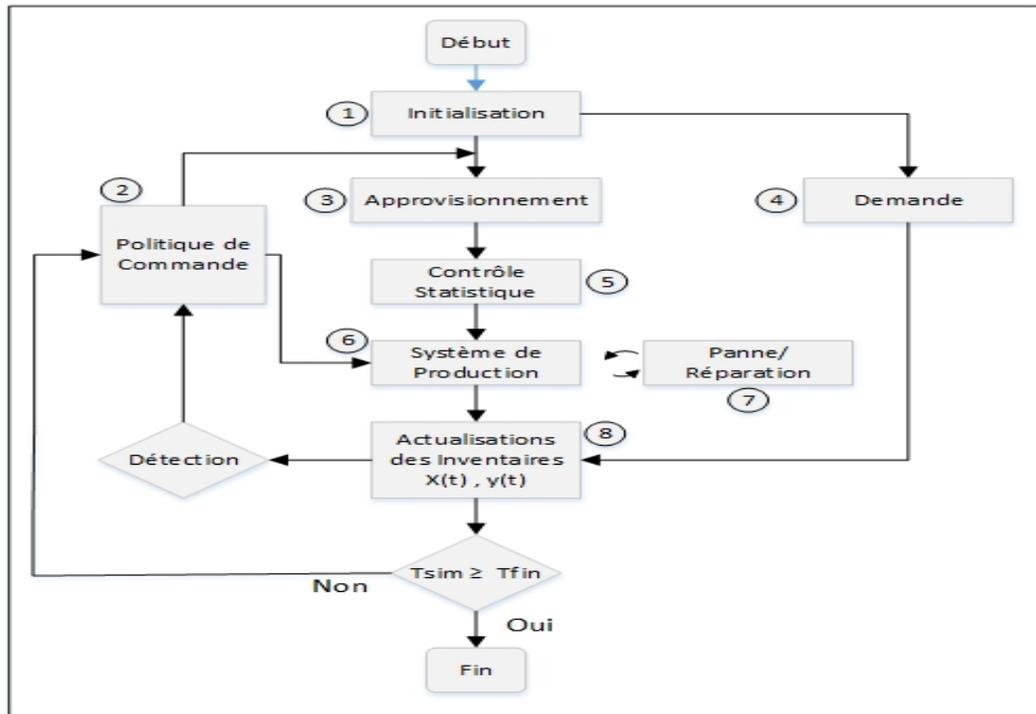


Figure 2. 2 Diagramme du modèle de simulation

- Bloc ⑥ : Système de production

Il représente la dynamique du système de production, sa disponibilité et son taux de production, il agit directement sur le bloc ⑧.

- Bloc ⑦ : Panne et réparation

Il échantillonne les temps des pannes et des réparations pour le système de production à partir de leurs distributions de probabilité respectives. L'état de fonctionnement du système de production est incorporé dans les équations d'état par le biais des processus stochastiques.

- Bloc ⑧ : Actualisations des inventaires

Il permet la mise à jour des niveaux des stocks et des variables cumulatives. Les variables cumulatives sont intégrées en utilisant la méthode Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) qui garantit une précision constante, comme mentionnée dans Pegden et al. (1995).

- Bloc ⑨ : Détection

Il contrôle en continu les seuils des inventaires de la matière première et des produits finis. Lors de la détection d'un seuil $0, S$ et Z_1 , il transmet des signaux au bloc politique de commande pour ajuster les taux de production et d'approvisionnement. La simulation se termine lorsque le temps de simulation actuel T_{sim} atteint la durée de la simulation définie T_{fin} .

2.1.5 Validation du modèle de simulation

Dans le but de valider notre modèle de simulation, nous vérifions graphiquement les trajectoires du taux de production $u(\cdot)$, de la position des inventaires $x(\cdot)$ et $y(\cdot)$ ainsi que la disponibilité du système de production. La figure 2.3 illustre ces trajectoires durant l'exécution de la simulation. Le tableau 2.1 présente les paramètres de validation que nous avons utilisés.

Tableau 2. 1 Paramètre de validation de la politique de contrôle à 100 %

| S | Q | Z_1 | D_l | P_a | p |
|-----|-----|-------|-------|---------|-----|
| 100 | 950 | 750 | 2,5 | 82,03 % | 3 % |

D'après la figure 2.3, le niveau d'inventaire de la matière première augmente ① suite à la réception d'une quantité commandée Q . Le taux de production est augmenté à son maximum pour rétablir le seuil critique Z_1 , une fois ce seuil atteint le niveau d'inventaire des produits finis se stabilise ⑥, et le taux de production est diminué au taux de la demande réelle ⑦. Lorsque le seuil de sécurité S est atteint ②, une nouvelle commande est lancée, mais dû au délai de livraison une rupture de stock de $x(\cdot)$ est observée, engendrant un arrêt de la production ($u = 0$). Le système de production à ces instants est toujours disponible ⑫. Après l'opération de contrôle de la qualité le lot est accepté et le niveau de l'inventaire $x(t)$ augmente. Une nouvelle commande est lancée lorsque le seuil S est dépassé, mais à cause de l'aspect aléatoire du délai d'approvisionnement, d'un contrôle simple et à 100 % la durée est

plus longue ③, ce qui engendre une pénurie ⑨. La valeur de la quantité économique à commander reçu, mais qui n'atteint pas le seuil Q sur la courbe démontre qu'un contrôle à 100 % a été effectué. Après l'ajout de ce lot en stock, le taux de production est augmenté au maximum U_{max} afin de rétablir le niveau du seuil critique Z_1 ⑧. On remarque que l'avènement de panne et de réparation aléatoire consécutive ⑬ agit directement sur le taux de production ④. En remarque aussi que lors d'une panne ⑭ le niveau de l'inventaire de la matière première reste fixe ⑤ et le taux de production est égal à zéro ⑪. Suite à ces remarques, on déduit que notre modèle de simulation représente adéquatement la politique de commande décrite dans la section 2.1.2.

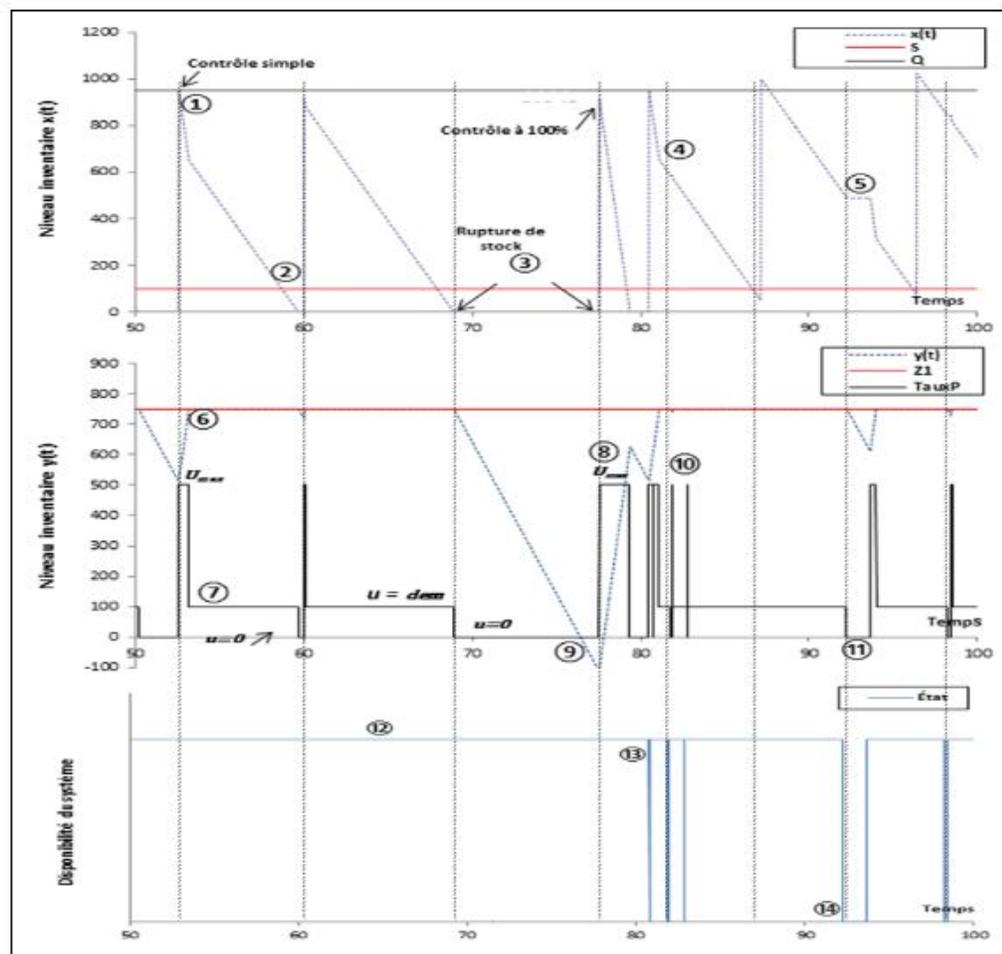


Figure 2.3 Variations des inventaires et du taux de production

2.1.6 Plan d'expériences et méthodologie de surface de réponse

Afin d'optimiser les paramètres de la politique de commande (S^*, Q^*, Z_1^*) , nous appliquerons un plan d'expériences et la méthodologie de surface de réponse. Le but de cette méthodologie est de trouver la relation entre les facteurs d'entrées (S^*, Q^*, Z_1^*) et la variable de sortie qui est la réponse du système (c.-à-d. le coût total). Les valeurs optimales de la politique de commande doivent minimiser le coût total en tenant compte des contraintes énoncées dans (2.9)-(2.10). Les différentes valeurs de la fonction coût (2.7) ont été inspirées de la littérature dans le domaine de la commande optimale. Les tableaux 2.2 et 2.3 résument respectivement les valeurs choisies pour la fonction coût et ceux pour la simulation.

Tableau 2. 2 Paramètres de coût du système

| Paramètres | C_0^+ | C_1^+ | C_1^- | C_{prod} | C_{com} | C_{unit} | C_{cq} | C_{rej} |
|------------|---------|---------|---------|------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Valeurs | 1 | 1 | 40 | 0,25 | 150 | 0,5 | 5 | 10 |

Tableau 2. 3 Paramètres de simulation du système

| Paramètres | TTF | TTR | D_t | p | P_a |
|------------|--|--|---------------------|-----------|--------|
| Valeurs | $Expo\left(\frac{1}{0.1}, stream\right)$ | $Expo\left(\frac{1}{0.9}, stream\right)$ | $Expo(1.5, stream)$ | 2% | 94.91% |
| Paramètre | τ_{cq} | n | c | U_{max} | d |
| Valeurs | 10^{-5} | 99 | 4 | 500 | 100 |

Les valeurs du taux de production maximal U_{max} et de la demande d ont été choisies d'une façon à respecter la condition de faisabilité du système (2.9). Notons que la loi exponentielle est largement utilisée dans la littérature du fait qu'elle permet une plus grande variabilité pour les valeurs générées. Le plan d'échantillonnage simple a été choisi selon le tableau 1.2. En nous basant sur le travail de Gharbi et Kenné (2003), nous assumons que la fonction valeur trouvée en (2.8) est convexe. Nous avons effectué les expériences de simulation à partir d'un plan d'expérience complet de trois facteurs à trois modalités 3^3 , avec un facteur-bloc qui représente la génération des nombres aléatoires. Quatre répliquions ont été effectuées pour chaque combinaison des facteurs (S, Q, Z_1) , totalisant 108 ($3^3 \times 4$) simulations d'une durée de $T_{sim} = 500.000$ unités de temps pour chaque une d'elles. Après

certaines tests de simulation, les limites de variation des variables indépendantes (S, Q, Z_1) ont été fixées (tableau 2.4), afin de centrer la région optimale de la réponse (coût total).

Tableau 2. 4 Niveaux des variables indépendantes

| Facteurs | Limite inférieure | Point centre | Limite supérieure |
|----------|-------------------|--------------|-------------------|
| S | 10 | 110 | 210 |
| Q | 450 | 700 | 950 |
| Z_1 | 350 | 500 | 650 |

Une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) a été effectuée sur les données de la simulation en utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics. Les interactions et les effets quadratiques des variables indépendantes (S, Q, Z_1) sur la variable de réponse (c.-à-d. coût total) sont présentés par le graphique de Pareto standardisé sur la figure 2.4. L'analyse de la variance pour la variable de réponse (tableau 2.5) indique que tous les effets quadratiques sont significatifs à un seuil de 5 %.

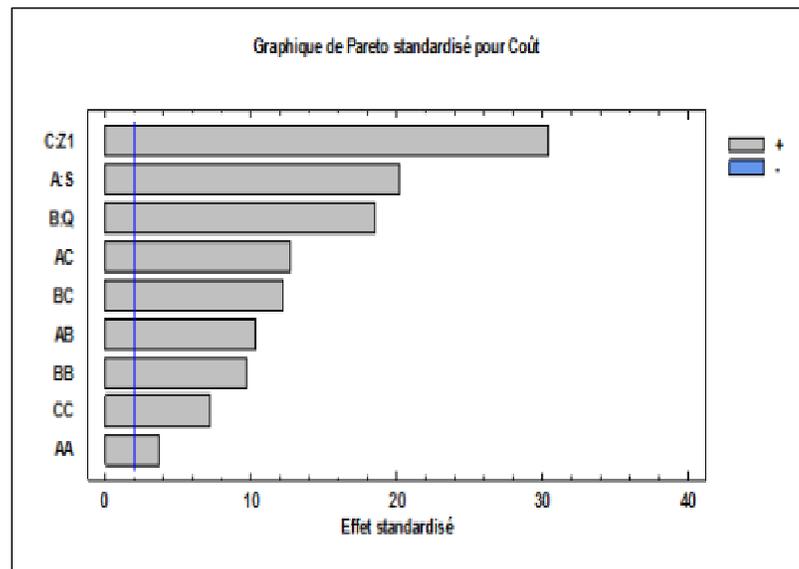


Figure 2. 4 Diagramme de Pareto standardisé du coût

Tableau 2. 5 Analyse de la variance pour la variable de réponse

| Source | Somme des carrés | DDL | Moyenne quadratique | Rapport F | Proba |
|---------------|------------------|-----|---------------------|-----------|--------|
| A:S | 182609, | 1 | 182609, | 396,76 | 0,0000 |
| B:Q | 152997, | 1 | 152997, | 332,42 | 0,0000 |
| C:Z1 | 411929, | 1 | 411929, | 895,00 | 0,0000 |
| AA | 6101,41 | 1 | 6101,41 | 13,26 | 0,0004 |
| AB | 47188,0 | 1 | 47188,0 | 102,53 | 0,0000 |
| AC | 71456,3 | 1 | 71456,3 | 155,25 | 0,0000 |
| BB | 41472,4 | 1 | 41472,4 | 90,11 | 0,0000 |
| BC | 65786,0 | 1 | 65786,0 | 142,93 | 0,0000 |
| CC | 23354,2 | 1 | 23354,2 | 50,74 | 0,0000 |
| blocs | 89,0 | 3 | 29,6667 | 0,06 | 0,9785 |
| Erreur totale | 43724,4 | 95 | 460,256 | | |
| Total (corr.) | 1,04671E6 | 107 | | | |

R-carré = 95,8227 pourcent(s)
R-carré (ajusté pour les ddl) = 95,295 pourcent(s)

Le coefficient de corrélation ajustée (R^2) montre que près de 96 % de la variabilité observée du coût est expliquée par le modèle de surface de réponse (Montgomery, 2008). Le contour de la variable de réponse est présenté par la figure 2.5.

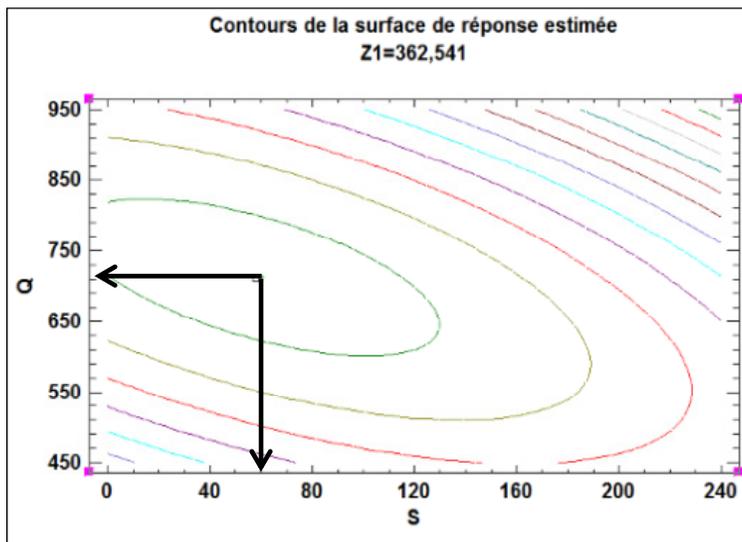


Figure 2. 5 Contour de la variable de réponse de la politique de contrôle à 100 %

La fonction de surface de réponse de la variable dépendante du système est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Coût} = & 1864,34 - 2,03572.S - 1,38297.Q - 1,87256.Z_1 & (2.11) \\ & + 1,59.10^{-3}.S^2 + 1,26.10^{-3}.S.Q + 2,6.10^{-3}.S.Z_1 \\ & + 0,6.10^{-3}.Q^2 + 0,98.10^{-3}.Q.Z_1 + 1,3.10^{-3}.Z_1^2 \end{aligned}$$

Cette équation est utilisée pour calculer les paramètres optimaux de la politique de commande qui minimisent le coût. Les résultats obtenus sont : $S^* = 61$, $Q^* = 712$ et $Z_1^* = 362$, qui correspond à un coût total minimal égal à 971,19.

2.1.7 Analyse de sensibilité

Afin de prouver l'efficacité et la robustesse de notre politique de commande, ainsi que pour vérifier notre approche de résolution et la réaction de notre modèle suivant les contraintes déjà citées, nous avons mené une analyse de sensibilité sur les différents paramètres du coût. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.6 et résument la réaction des paramètres optimaux et du coût total encouru de la politique de commande face à la variation des paramètres de coût du système.

- Variation de C_0^+ (scénarios 1 et 2)

Lorsque le coût d'inventaire de la matière première augmente (resp. diminue), le point de commande diminue (resp. augmente), la quantité économique à commander augmente (resp. diminue) et le seuil de production augmente (resp. diminue). Dans le but de diminuer le coût total d'inventaire de la matière première, le modèle réagit de façon à diminuer le seuil de lancement de commande pour donner plus de temps au système de production de faire la transformation de la matière première en produits finis. La quantité économique à commander et le seuil de production sont augmentés afin d'éviter les pénuries.

- Variation de C_1^+ (scénarios 3 et 4)

Lorsque le coût d'inventaire du produit fini augmente (resp. diminue), le point de commande augmente (resp. diminue), la quantité économique à commander diminue (resp. augmente) et le seuil de production diminue (resp. augmente). Dans le but de diminuer le coût total d'inventaire, la quantité économique à commander et le seuil de production sont diminués, mais le seuil de lancement de commande est augmenté afin de recevoir plus de lots pour faire face au taux de transformation.

- Variation de C_1^- (scénarios 5 et 6)

Lorsque le coût de pénurie augmente (resp. diminue), le point de commande augmente (resp. diminue), la quantité économique à commander diminue (resp. augmente) et le seuil de production augmente (resp. diminue). Puisque le coût de pénurie est plus pénalisant que les autres, le système réagit en maintenant les deux seuils de sécurité (S^*, Z_1^*) à un niveau élevé, afin d'éviter une rupture du stock à cause des délais engendrés par la réduction des délais de production (panne/réparation), le contrôle par le plan d'échantillonnage simple ou le contrôle à 100 %.

- Variation de C_{unit} (scénarios 7 et 8)

Lorsque le coût unitaire de la matière première augmente (resp. diminue), le point de commande augmente (resp. diminue), la quantité économique à commander diminue (resp. augmente) et le seuil de production augmente (resp. diminue). Le système réagit en diminuant la quantité économique à commander, puisque la taille du lot influence directement le coût total. Le seuil de production est augmenté pour éviter la rupture de stock.

- Variation de C_{cq} (scénarios 9 et 10)

Lorsque le coût unitaire de contrôle de la qualité augmente (resp. diminue), le point de commande diminue (resp. augmente), la quantité économique à commander augmente (resp. diminue) et le seuil de production augmente (resp. diminue). Le système réagit en augmentant la quantité économique à commander et en diminuant le nombre de commande. La taille de l'échantillon a contrôlé étant fixe pour le plan d'échantillonnage simple utilisé et

même si la quantité économique à commander est contrôlée à 100 %, le fait que le nombre de commandes est moins fréquent la réaction du système assure la diminution du coût total.

- Variation de C_{com} (scénarios 11 et 12)

Lorsque le coût de passation de commande augmente (resp. diminue), le point de commande diminue (resp. augmente), la quantité économique à commander augmente (resp. diminue) et le seuil de production augmente (resp. diminue). Le système réagit en commandant une quantité économique plus grande, mais moins fréquemment, afin d'économiser sur le coût de commande. En parallèle, il doit maintenir le seuil de production élevée afin d'éviter les pénuries lorsque le système de production devient non disponible.

Tableau 2. 6 Analyse de sensibilité de la politique de contrôle à 100 %

| Scénarios | C_0^+ | C_1^+ | C_1^- | S^* | Q^* | Z_1^* | Coût | Impact |
|-------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|---------------|--------------------------|
| Base | 1 | 1 | 40 | 61 | 712 | 362 | 971,19 | - |
| 1 | 0,9 | 1 | 40 | 84 | 684 | 344 | 940,90 | S↑, Q↓, Z ₁ ↓ |
| 2 | 1,1 | 1 | 40 | 12 | 733 | 416 | 996,11 | S↓, Q↑, Z ₁ ↑ |
| 3 | 1 | 0,9 | 40 | 10 | 715 | 445 | 935,80 | S↓, Q↑, Z ₁ ↑ |
| 4 | 1 | 1,1 | 40 | 124 | 691 | 352 | 1114,72 | S↑, Q↓, Z ₁ ↓ |
| 5 | 1 | 1 | 30 | 11 | 714 | 292 | 913,55 | S↓, Q↑, Z ₁ ↓ |
| 6 | 1 | 1 | 50 | 87 | 710 | 405 | 1005,34 | S↑, Q↓, Z ₁ ↑ |
| Scénarios | C_{unit} | C_{cq} | C_{com} | S^* | Q^* | Z_1^* | Coût | Impact |
| Base | 0,5 | 5 | 150 | 61 | 712 | 362 | 971,19 | - |
| 7 | 0,1 | 5 | 150 | 58 | 714 | 348 | 913,83 | S↓, Q↑, Z ₁ ↓ |
| 8 | 0,9 | 5 | 150 | 72 | 687 | 378 | 1010,91 | S↑, Q↓, Z ₁ ↑ |
| 9 | 0,5 | 1 | 150 | 120 | 576 | 353 | 895,52 | S↑, Q↓, Z ₁ ↓ |
| 10 | 0,5 | 9 | 150 | 22 | 790 | 368 | 1037,75 | S↓, Q↑, Z ₁ ↑ |
| 11 | 0,5 | 5 | 100 | 75 | 683 | 356 | 956,51 | S↑, Q↓, Z ₁ ↓ |
| 12 | 0,5 | 5 | 200 | 45 | 740 | 365 | 984,69 | S↓, Q↑, Z ₁ ↑ |

Les résultats de cette analyse démontrent les cohérences dans les réactions du système de production face aux variations des différents paramètres du coût. Ils confirment nos attentes, tout en allant dans le même sens des résultats trouvés par Hajji et al. (2008). D'après Chin et Harlow (1982), le contrôle à 100 % est très couteux du point de vue économique puisqu'il

peut être destructif ou impossible à réaliser. Étant donné que l'application des techniques de contrôle statistique de la qualité peut suffire pour statuer sur l'acceptation ou non d'un lot, on se propose l'étude d'une politique de retour au fournisseur lorsqu'un lot est rejeté sous les mêmes conditions, afin de la comparer à celle du contrôle à 100 %.

2.2 Politique de retour au fournisseur

Le système manufacturier étudié (figure 2.6) est composé d'un système manufacturier qui produit un seul type de produit et qui fait face à une demande constante. L'installation est sujette à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent occasionner des ruptures de stock. L'approvisionnement en matière première se fait sur un délai de livraison variable D_l unités de temps par un fournisseur non-fiable, caractérisé par une qualité effective connue.

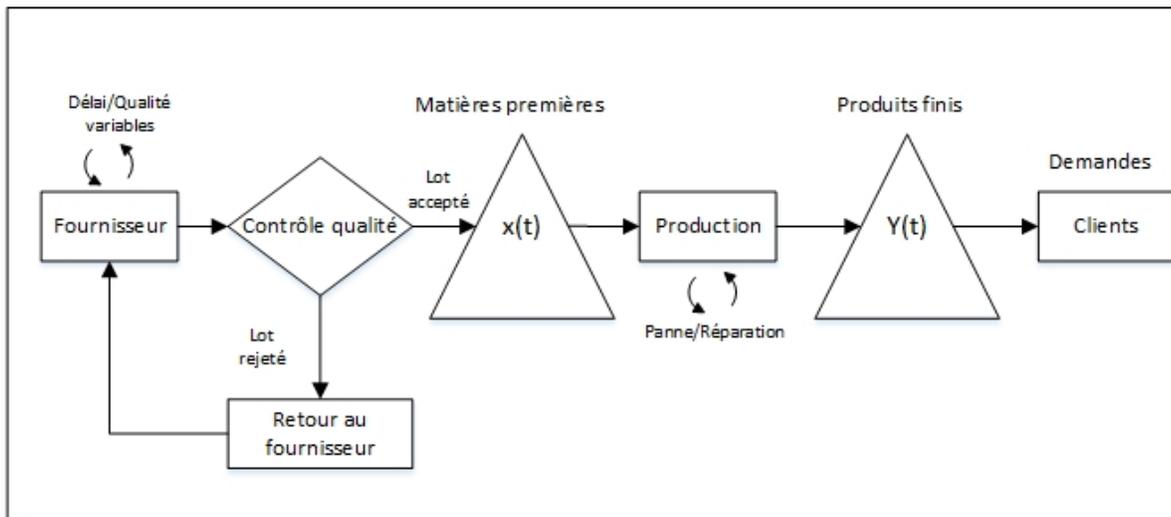


Figure 2. 6 Structure du système manufacturier étudié sous la politique de retour au fournisseur

À la réception d'un lot, un contrôle de la qualité est fait par un plan d'échantillonnage simple (1.2.1) pour statuer sur son acceptation ou son rejet. Le pourcentage d'items de mauvaise qualité qui peut passer dans le lot i s'il est accepté est donné suivant (1.5). Chaque item de l'échantillon n est contrôlé pour vérifier son acceptabilité en considérant le critère $k \leq c$. La durée ϑ_i avant laquelle le lot est mis en stock est égale à $\theta_i + D_l + n \times \tau_{cq}$. Les lots rejetés

sont retournés au fournisseur pour être remplacés. On assume qu'un lot rejeté est écarté puis remplacé après une durée égale au délai de livraison D_l . Notons que la demande réelle est proportionnelle au taux de pièces défectueuses qui réside dans chaque lot accepté après un contrôle simple. On peut l'exprimer par : $dem = d/(1 - p^t)$.

2.2.1 Formulation du problème

Vu l'aspect stochastique du système en étude, nous avons modélisé son état par trois composantes : ① Le niveau de surplus cumulatif (inventaire si positif et pénurie si négatif) mesuré par $y(t)$, ayant une nature continue dans le temps. ② Le niveau d'inventaire continu à l'instant t de la matière première mesurée par $x(t)$, qui détermine la quantité des lots acceptés après un échantillonnage simple, les lots qui sont rejetés sont retournés au fournisseur pour être remplacés. Ce système fait face à une demande continue suivant un taux de production u et à un fournisseur non fiable, où Q_i est le lot i de matière première reçu à l'instant $\theta_i + D_l$. Même si le système manufacturier est disponible, la production ne pourra se faire si $x(t)$ est égal à zéro, avec $0 \leq x(t) \leq L$, la contrainte maximale de la capacité de stockage de la matière première. ③ La composante discrète $\alpha(t)$, décrit l'état du système de production tel que :

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1: \text{Le système de production disponible} \\ 2: \text{Le système de production non disponible} \end{cases}$$

Pour le système considéré l'espace d'état est donnée par (x, y, α) tel que :

$$x(t) \in [0, L]; y(t) \in R; \alpha(t) \in M = \{1, 2\}$$

La dynamique des niveaux d'inventaires est donnée par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = u(t, \alpha) - \frac{d}{1-p^i}, & y(0) = y, \forall t \geq 0 \\ \dot{x}(t) = -u(t, \alpha), & x(0) = x, \forall t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[\\ x(\vartheta_i^+) = x(\vartheta_i^-) + Q_i(\alpha), & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.12)$$

Où x et y désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire de la matière première et du produit fini, et ϑ_i^+ et ϑ_i^- les limites positive et négative de l'instant de mise en stock du lot i , et N est le nombre de commandes reçues sur l'ensemble de l'horizon.

Le taux de production et la quantité de matière première à commander doivent satisfaire les contraintes de capacité de production et d'approvisionnement données par :

$$\begin{cases} 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \times Ind \{ \alpha(t) = 1 \} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.13)$$

Nos variables de décision sont le taux de production $u(\cdot)$ et la séquence de commande d'approvisionnement que nous notons : $\Omega = \{(\theta_i, Q_i), \dots\}$, $i = 1, \dots, N$. En tenant compte de (2.13) et pour chaque mode $\alpha \in M = \{1, 2\}$, l'ensemble des décisions admissibles est présenté par :

$$A(\alpha) = \begin{cases} (\Omega, u(\cdot)): 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (2.14)$$

La fonction du coût instantané qui pénalise le maintien en stock de la matière première, de l'inventaire du produit fini (pénurie) et du taux de production est défini par $g(\cdot)$ tel que :

$$\begin{aligned} g(x(t), y(t), u(t, \alpha)) = & C_0^+ \cdot x + C_1^+ \cdot y^+ + C_1^- \cdot y^- + C_{prod} \cdot u(t) \\ & + C_{rej} \cdot p^i Q_i; \text{ avec : } t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[\end{aligned} \quad (2.15)$$

La fonction instantanée des coûts d'approvisionnement (commande et prix unitaire) et de contrôle de la qualité des lots de la matière première est donnée par :

$$R(Q_i, \alpha) = C_{com} \text{Ind}\{t = \theta_i\} + C_{unit} \cdot Q_i + \text{Ind}\{t = \theta_i + D_i\} C_{cq} \cdot n \quad (2.16)$$

$$+ E_{\alpha} \int_0^{\theta_i} e^{-\rho t} g(x - u(t, \alpha), y + u(t, \alpha) - \frac{d}{1-p^i} \cdot t, u(t, \alpha)) dt.$$

En utilisant (2.15) et (2.16), le coût total $J(\cdot)$ est défini par :

$$J(\cdot) = E \left[\int_0^{\infty} e^{-\rho t} g(x, y, u) dt + \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\rho \theta_i} (C_{com}^i + C_{unit}^i \cdot Q_i + C_{cq}^i \cdot n) \right] \quad (2.17)$$

Le problème de la planification de production considéré consiste à établir une politique de commande admissible $(\Omega, u(\cdot))$ qui minimisera le coût moyen total $J(\cdot)$ actualisé donné par l'équation (2.17), tout en respectant les contraintes des équations et les inégalités (2.12)-(2.16). Cette politique est une rétroaction qui détermine le taux de production et la politique d'approvisionnement en fonction de l'état du système. La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$v(x, y, \alpha) = \min_{(\Omega, u) \in A} J(x, y, u, \theta, \Omega, Q, \alpha) \quad (2.18)$$

Du fait de la complexité de ce système de production, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique afin de proposer une structure de politique de commande combinant simultanément la planification de l'approvisionnement et de la production pour le système manufacturier étudié.

2.2.2 Politique de commande

La structure de la politique de commande combinant la planification de l'approvisionnement, le contrôle statistique de la qualité et le taux de production que nous proposons se base sur les recherches scientifiques dans la revue de littérature de : 1) Hajji et al. (2010) qui ont développé la structure d'une politique de commande de production et d'approvisionnement

qui combine les différents seuils critiques (S, Q, Z) pour un système manufacturier flexible. 2) Gharbi et al. (2011) qui ont traité l'utilisation d'une unité de production seulement lorsque le niveau d'inventaire du produit fini est inférieur à un seuil donné. 3) Hajji et al. (2010) qui ont développé une stratégie d'approvisionnement et de contrôle de la production en présence de plusieurs fournisseurs. 4) Hajji et al. (2011) qui ont proposé une extension pour cette dernière stratégie. La structure de cette politique de commande est donnée par les équations (2.19)-(2.20).

- Contrôle du taux de production :

$$u(.) = \begin{cases} U_{max} \cdot \text{Ind}\{\alpha = 1\} & \text{si } y < Z_1 \\ d/(1-p) \cdot \text{Ind}\{\alpha = 1\} & \text{si } y = Z_1 \\ 0 & \text{si } y > Z_1 \end{cases} \quad (2.19)$$

Avec, la contrainte de faisabilité du modèle selon :

$$\frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \times U_{max} \geq d/(1-p)$$

- Contrôle de l'approvisionnement :

$$\Omega(.) = \begin{cases} Q & \text{si } x \leq S \\ 0 & \text{si } x > S \end{cases} \quad (2.20)$$

Sous les contraintes suivantes : $Z_1 \geq 0$; $S < Q < L$; $S \geq 0$

Pour étudier le comportement réel de ce système manufacturier et pour trouver les paramètres optimaux (S^* , Q^* , Z_1^*) de la politique de commande (2.19)-(2.20), qui minimisent le coût total (2.17), en tenant compte des contraintes associées, nous utiliserons la même approche de résolution expérimentale basée sur la simulation et les méthodes statistiques

d'optimisation que nous avons utilisées pour la politique de contrôle à 100 % (voir section 2.1.3).

2.2.3 Validation du modèle de simulation

La dynamique des stocks a été vérifiée graphiquement, pour valider l'exactitude du modèle dans le cas d'une politique de retour au fournisseur et pour voir si le modèle fonctionne bien selon la politique de contrôle désirée. Pour cette validation nous avons choisi les valeurs suivantes :

Tableau 2. 7 Valeurs considérées pour la validation du modèle

| Paramètres | S | Q | Z_1 |
|------------|-----|-----|-------|
| Valeur | 200 | 500 | 600 |

La figure 2.7 est une illustration graphique des trajectoires des niveaux des inventaires de la matière première $x(t)$ et des produits finis $y(t)$. Nous avons ajouté à titre indicatif, la courbe : Retour, pour pouvoir suivre l'état des lots acceptés et ceux rejetés qui sont retournés au fournisseur. Lorsque le lot est accepté, la courbe a une valeur basse et lorsqu'elle a une valeur haute le lot est rejeté puis retourné au fournisseur. La longueur d'un segment sur cette courbe nous renseigne sur le délai du retour. Les différents points sur les graphes illustrent :

- ① Une passation de commande suite au dépassement du seuil du stock de sécurité S selon la politique d'approvisionnement.
- ② La réception d'une quantité Q selon la politique d'approvisionnement désirée.
- ③ et ⑤ Une panne suivie de réparation durant un temps t . Nous remarquons que durant la panne/réparation l'inventaire de la matière première reste constant ③a et celui des produits finis diminue ⑤a selon la politique de contrôle.
- ⑥ et ⑦ Un rejet d'un lot à la réception avec un retour au fournisseur. Un plus long délai est remarquable, entre le moment où le niveau du stock de la matière première a franchi

le seuil de sécurité S et le moment d'acceptation d'un lot de remplacement (6)a et (7)a. Ce délai qui est nettement supérieur a généré une pénurie (8).

➤ (9) Le taux de production maximal que le système de production doit suivre en fonction de la politique de contrôle imposée. Le système produit à cette cadence pour atteindre le niveau du seuil critique Z_1 .

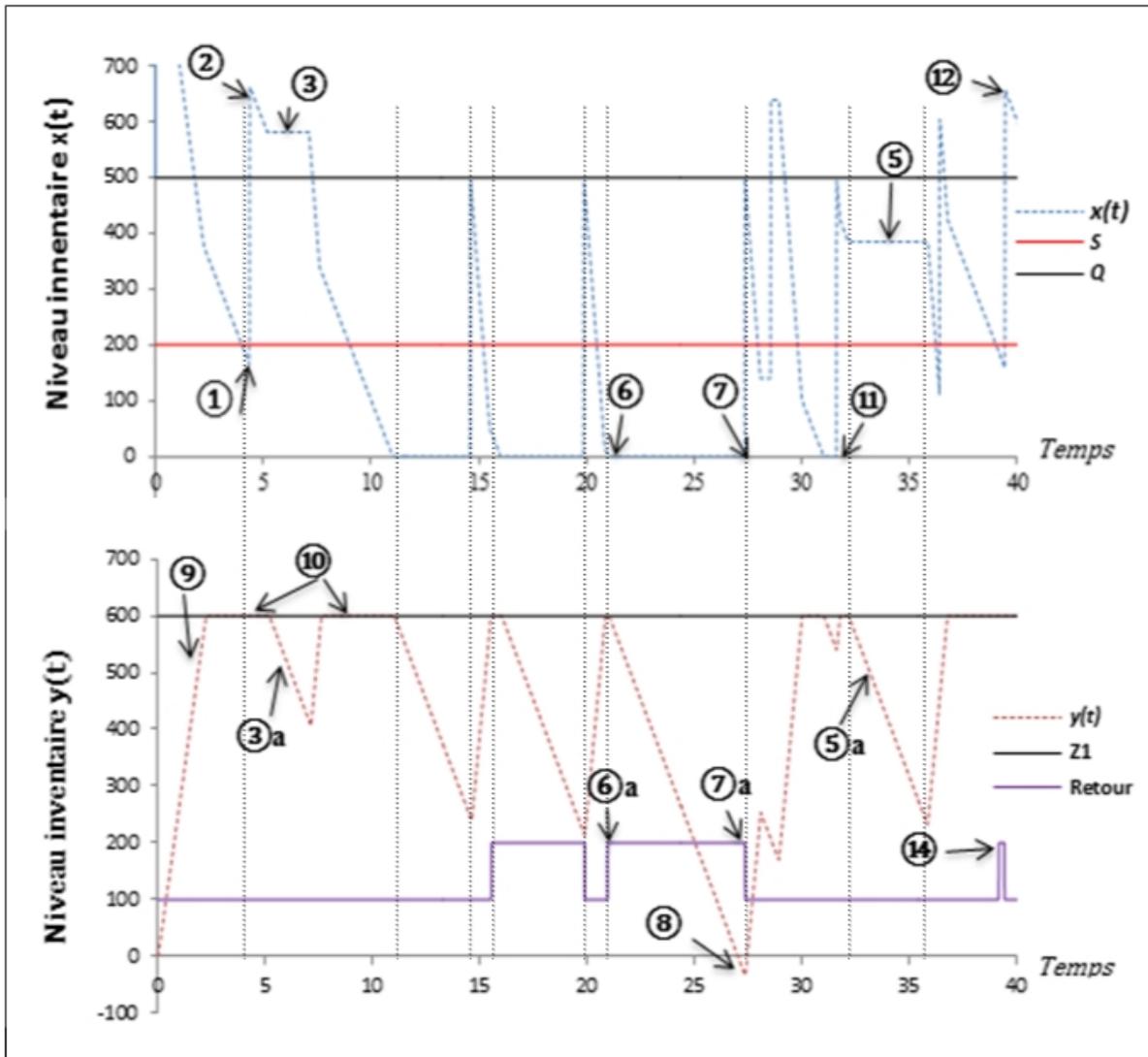


Figure 2. 7 Trajectoires des niveaux des inventaires

➤ (10) Une production au taux de la demande que le système doit suivre en fonction de la politique de contrôle imposée puisque le niveau du seuil Z_1 est atteint.

- ⑪ Un état variable du fournisseur avec des délais d'approvisionnement aléatoires.
- ⑫ Une réception d'un lot de remplacement suite à un rejet, puisqu'on remarque la présence d'un retour au fournisseur ⑭, il y'a eu une réception de la quantité Q avec un délai de livraison.

Suite à l'analyse de ces points, on déduit que notre modèle de simulation représente adéquatement la politique de commande décrite dans la section 2.2.2.

2.2.4 Plan d'expériences et méthodologie de surface de réponse

Nous avons utilisé le même plan d'expériences et méthodologie de surface de réponse que celle de la section 2.1.6. Le modèle de simulation utilisé est une combinaison de modèles discrets-continus du simulateur Arena, avec des sous-programmes en langage C++ (Pegden et al. 1995). La partie continue est dédiée au calcul des niveaux instantanés des inventaires de la matière première et de produits finis, tandis que la partie discrète modélise les paramètres de la politique de commande, de la production, de l'approvisionnement, de la détection de la rupture des stocks, de l'occurrence des pannes et les actions de réparations. Le choix de l'utilisation de ce type de modèles permet de raccourcir le temps de simulation comparativement à un modèle purement discret (Lavoie et al. 2010). En effet, une simulation d'une durée de 500.000 unités de temps est égale à 16 secondes. Cette durée est assez longue pour atteindre le régime permanent. Suite à plusieurs simulations préliminaires, nous avons défini les plages des variables indépendantes qui sont présentées par le tableau 2.8.

Tableau 2. 8 Niveaux des variables indépendantes

| Facteurs | Limite inférieure | Point centre | Limite supérieure |
|----------|-------------------|--------------|-------------------|
| S | 10 | 110 | 210 |
| Q | 450 | 700 | 950 |
| Z_1 | 350 | 500 | 650 |

Tableau 2. 9 Analyse de la variance pour le coût total

| Analyse de la variance pour Coût | | | | | |
|----------------------------------|------------------|-----|---------------------|-----------|--------|
| Source | Somme des carrés | DDL | Moyenne quadratique | Rapport F | Proba |
| A:S | 171405, | 1 | 171405, | 350,10 | 0,0000 |
| B:Q | 96946,7 | 1 | 96946,7 | 198,01 | 0,0000 |
| C:Z1 | 415264, | 1 | 415264, | 848,18 | 0,0000 |
| AA | 5735,04 | 1 | 5735,04 | 11,71 | 0,0009 |
| AB | 60563,0 | 1 | 60563,0 | 123,70 | 0,0000 |
| AC | 63656,3 | 1 | 63656,3 | 130,02 | 0,0000 |
| BB | 52266,7 | 1 | 52266,7 | 106,75 | 0,0000 |
| BC | 80360,3 | 1 | 80360,3 | 164,14 | 0,0000 |
| CC | 18592,7 | 1 | 18592,7 | 37,98 | 0,0000 |
| blocs | 62,2963 | 3 | 20,7654 | 0,04 | 0,9883 |
| Erreur totale | 46511,6 | 95 | 489,595 | | |
| Total (corr.) | 1,01136E6 | 107 | | | |

R-carré = 96,4011 pourcent(s)
R-carré (ajusté pour les ddl) = 95,8202 pourcent(s)

Une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) a été effectuée sur les données de la simulation en utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics. Selon le coefficient de corrélation (R^2) présenté dans le tableau 2.9, plus de 96 % de la variabilité observée du coût prévu est expliquée par le modèle de simulation (Montgomery, 2008). D'après le tableau 2.9, tous les principaux facteurs (S, Q, Z_1), leurs interactions et leurs effets quadratiques sont significatifs à un niveau de signification de 95 % ($P\text{-value} < 0.05$).

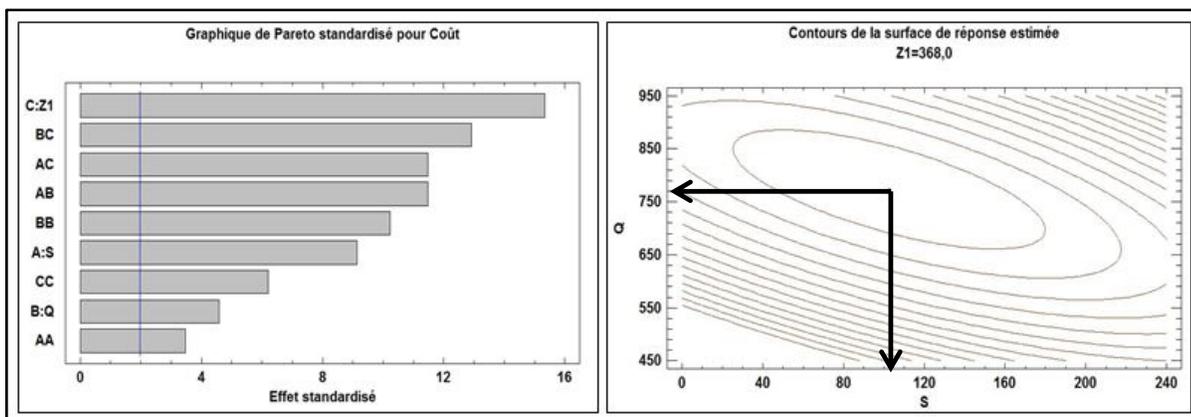


Figure 2. 8 Graphique de Pareto et surface de réponse pour le coût

La figure 2.8 présente le graphique de Pareto standardisé ainsi que le contour de la surface de réponse correspondant au coût total. Une analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance a été également effectuée pour vérifier la conformité du modèle.

Selon Statgraphics, la fonction de surface de réponse de la variable dépendante du système est donnée par la formule (2.21).

$$\begin{aligned} \text{Coût} = & 2492,23 - 3,07925.S - 2,22179.Q - 2,64074.Z_1 & (2.21) \\ & + 0,00205278.S^2 + 0,00191667.S.Q \\ & + 0,00319583.S.Z_1 + 0,000967111.Q^2 \\ & + 0,00143889.Q.Z_1 + 0,00163086.Z_1 \end{aligned}$$

Le coût total minimum obtenu est égal à 989,40. Il correspond aux paramètres de commande optimaux : $S^* = 102$, $Q^* = 773$ et $Z_1^* = 368$. Le tableau 2.10 résume les résultats obtenus suite à l'optimisation des paramètres de commande des deux politiques. On remarque que la politique de contrôle à 100 % pour ce cas est moins coûteuse que la politique de retour au fournisseur.

Tableau 2. 10 Valeurs du coût pour les deux politiques

| Optimaux | S^* | Q^* | Z_1^* | $Coût^*$ |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Politique Ctrl100% | 61 | 712 | 362 | 971,19 |
| Politique de retour | 102 | 773 | 368 | 989,40 |

Vu le grand nombre de paramètres qui peuvent influencer l'optimisation du coût total tel que les différents coûts de stockage, de contrôle, de production et de rejet, ainsi que les différents paramètres de simulation tels la qualité effective, la probabilité d'acceptation et les délais de livraison, nous avons entrepris une comparaison entre ces deux politiques en variant les paramètres qui peuvent influencer directement la valeur du coût total, afin de nous éclairer sur la meilleure politique à adopter.

2.3 Comparaison des deux politiques

Dans cette section nous avons réalisé une comparaison plus poussée en variant les quatre paramètres que nous considérant les plus influents sur notre modèle à savoir : le coût unitaire de contrôle de la qualité, le délai de livraison, la sévérité des plans d'échantillonnage (variation de) et le coût de pénurie. Le tableau 2.11 présente les valeurs des paramètres de comparaison que nous avons considérées.

Tableau 2. 11 Variations des paramètres de comparaison

| Paramètres | C_{cq} | D_l | c | C_1^- |
|------------|----------|-----------|-------|----------|
| Variations | 5-10-15 | 2 | 3 | 40 |
| | 5 | 1,5-2-2,5 | 3 | 40 |
| | 5 | 2 | 2-3-4 | 40 |
| | 5 | 2 | 3 | 40-50-60 |

2.3.1 Variation du coût de contrôle de la qualité

Nous avons reproduit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le coût du contrôle de la qualité respectivement à 5, 10 et 15 unités monétaires. Le tableau 2.12 démontre que l'augmentation du coût de contrôle de la qualité a pour effet de rendre la politique de retour au fournisseur moins coûteux que la politique de contrôle à 100 % et ce dans les intervalles présentés sur la figure 2.9. Lorsque la qualité est encore bonne les deux politiques se valent et lorsqu'elle se détériore le contrôle à 100 % devient la politique à adopter. La détérioration de la qualité effective entraîne une inspection complète de tous les items, donc l'augmentation du coût de contrôle dû à la taille du lot. Les points d'intersection entre les deux courbes sur la figure 2.9 déterminent les intervalles où une politique devient moins/plus intéressante que l'autre. Les courbes des deux politiques divergentes à fur est à mesure que la qualité se détériore, puisque les opérations de contrôle à 100 % et de retour au fournisseur deviennent plus fréquentes. Lorsque la qualité devient très mauvaise et afin d'éviter la pénurie due au grand nombre de rejets le contrôle à 100 % devient le politique à adopter.

Tableau 2. 12 Valeurs du coût total avec variation du coût de contrôle de la qualité

| | $C_{cq} = 5$ | | $C_{cq} = 10$ | | $C_{cq} = 15$ | |
|-------|--------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| p | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% |
| 0,00% | 1056,14 | 1056,14 | 1079,12 | 1079,12 | 1158,6 | 1158,6 |
| 0,50% | 1066,98 | 1066,99 | 1079,25 | 1079,35 | 1164,71 | 1165,92 |
| 1,00% | 1087,89 | 1087,73 | 1119,86 | 1122,29 | 1180,64 | 1183,36 |
| 2,00% | 1148,37 | 1169,36 | 1168,34 | 1227,85 | 1272,63 | 1325,03 |
| 3,00% | 1273,59 | 1244,97 | 1308,34 | 1341,9 | 1384,42 | 1478,36 |
| 4,00% | 1478,98 | 1363,56 | 1647,57 | 1502,94 | 1707,4 | 1723,99 |
| 4,50% | 1645,23 | 1444,45 | 1845,03 | 1586,13 | 1918,84 | 1851,22 |

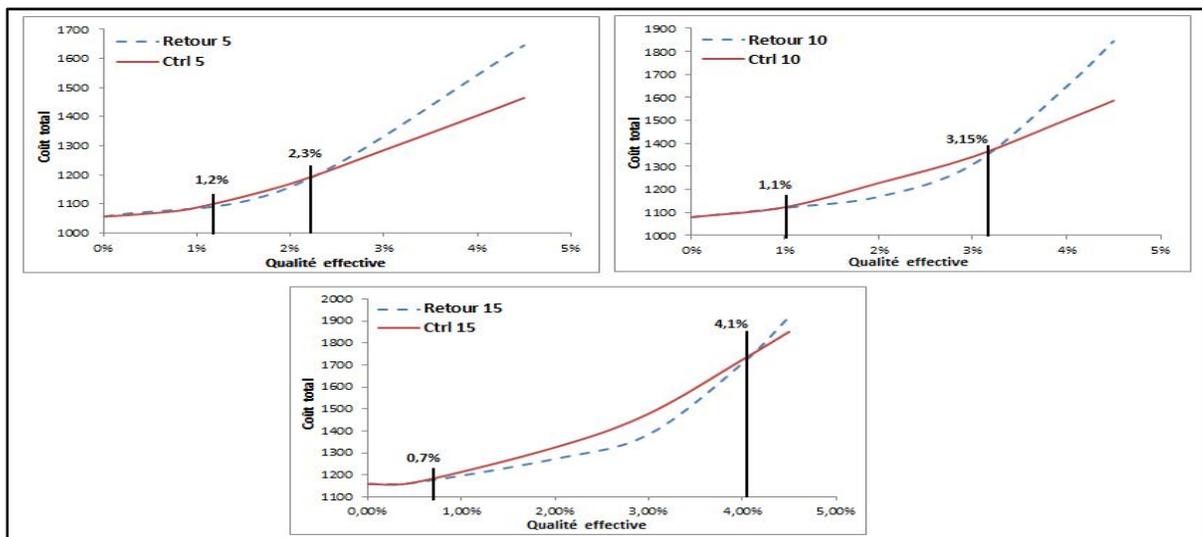


Figure 2. 9 Variations du coût de contrôle de la qualité

2.3.2 Variation du délai de livraison

Nous avons reproduit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le délai de livraison respectivement à 1.5, 2 et 2.5 unités de temps. Les valeurs du tableau 2.13 nous renseignent sur les valeurs du coût total encouru. Selon ce tableau, l'augmentation du délai de livraison a pour effet de rendre la politique de retour au fournisseur plus coûteuse que la politique de contrôle à 100 %. Cette augmentation entraine

des ruptures des stocks plus fréquentes, ce qui pénalise la valeur du coût total. La figure 2.10 présente l'allure des courbes pour les deux politiques, les intervalles qui y sont présentés délimitent le choix de politique à adopter.

Tableau 2. 13 Valeurs du coût total avec variation du délai de livraison

| p | D _l = 1,5 | | D _l = 2 | | D _l = 2,5 | |
|-------|----------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
| | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% |
| 0,00% | 890,14 | 890,141 | 1056,14 | 1056,14 | 1204,67 | 1204,67 |
| 0,50% | 890,20 | 890,156 | 1066,98 | 1066,99 | 1204,98 | 1204,89 |
| 1,00% | 891,95 | 891,59 | 1087,89 | 1087,73 | 1219,45 | 1206,10 |
| 2,00% | 901,94 | 911,77 | 1148,37 | 1169,36 | 1336,112 | 1221,22 |
| 3,00% | 956,13 | 966,29 | 1273,59 | 1244,97 | 1530,71 | 1280,83 |
| 4,00% | 1078,47 | 1043,55 | 1478,98 | 1363,56 | 1828,07 | 1358,4 |
| 4,50% | 1149,82 | 1083,99 | 1645,23 | 1444,45 | 2042,76 | 1399,25 |

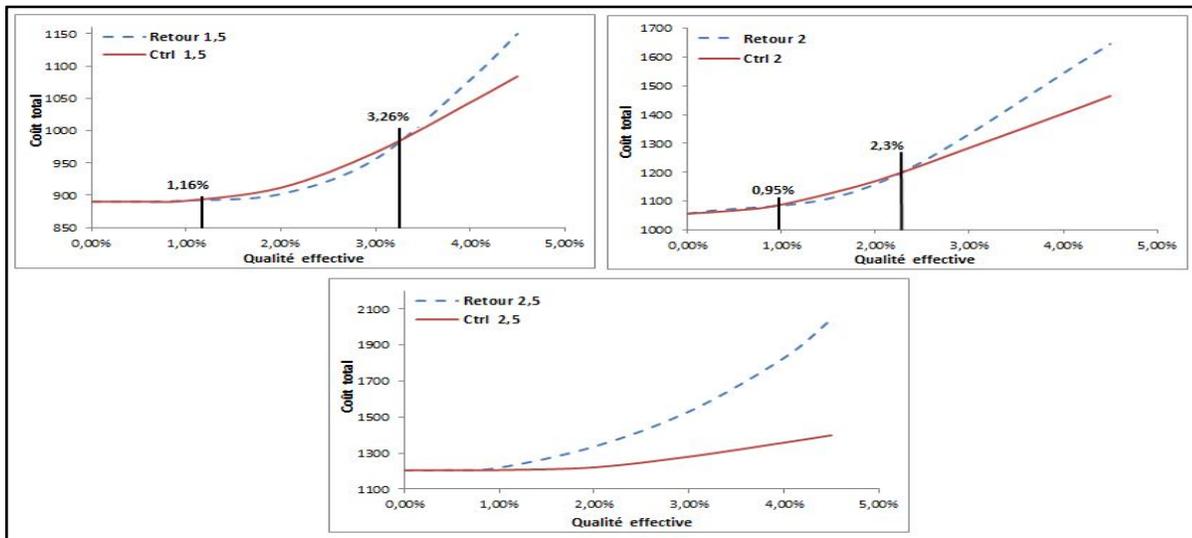


Figure 2. 10 Variation du délai de livraison

2.3.3 Sévérité des plans d'échantillonnage simple

Nous avons reproduit sur la figure 2.11 deux graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le plan d'échantillonnage pour $c = 2$ et $c = 3$, avec $n = 92$.

Tableau 2. 14 Valeurs du coût total pour les différents plans

| p | $c = 3$ | | $c = 2$ | |
|-------|---------|----------|---------|----------|
| | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% |
| 0,00% | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 |
| 0,50% | 1056,98 | 1056,23 | 1056,98 | 1056,23 |
| 1,00% | 1057,89 | 1057,73 | 1057,6 | 1057,88 |
| 2,00% | 1158,37 | 1159,36 | 1192,44 | 1149,25 |
| 3,00% | 1223,90 | 1194,97 | 1444,86 | 1241,98 |
| 4,00% | 1378,98 | 1273,56 | 1830,11 | 1329,37 |
| 4,50% | 1645,23 | 1344,45 | 2001,48 | 1379,14 |

La sévérité d'un plan (tableau 2.14) démontre que le coût total diminue lorsque la qualité effective est encore bonne, mais lorsqu'elle se détériore le contraire se produit. Avec un plan sévère $c = 2$ et lorsque la qualité effective est mauvaise, le nombre de lots rejeté devient très élevé, donc il sera préférable de faire du contrôle à 100 % que du retour au fournisseur. Lorsque la qualité est encore bonne les deux politiques se valent. Dans les intervalles présentés sur la figure 2.11 le retour au fournisseur est meilleur mais au-delà le contrôle à 100 % devient plus intéressant.

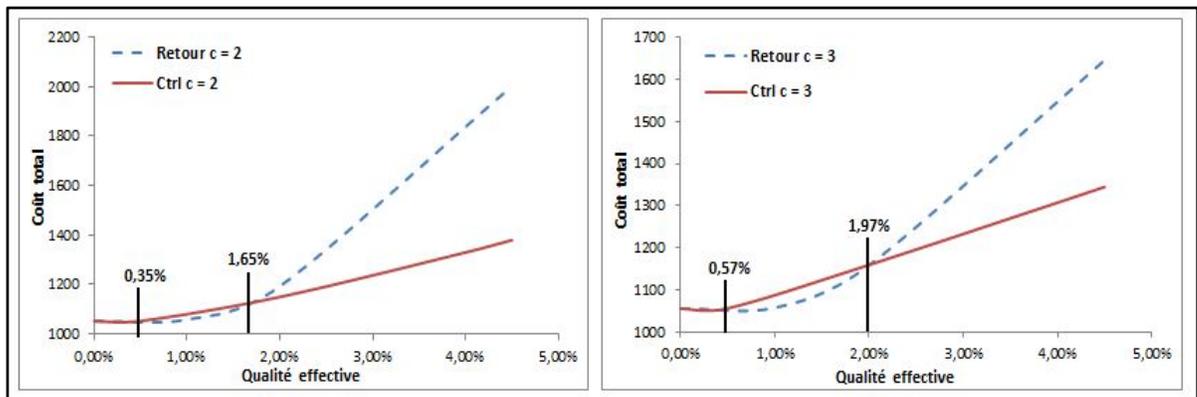


Figure 2. 11 Variation du plan d'échantillonnage simple

2.3.4 Variation du coût de pénurie

Nous avons produit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le coût de pénurie respectivement à 40, 50 et 60 unités monétaires. Les valeurs du coût total de chaque politique pour chaque variation sont présentées sur le tableau 2.15.

Tableau 2. 15 Valeurs du coût total avec variation du coût de pénurie

| p | $C_1^- = 40$ | | $C_1^- = 50$ | | $C_1^- = 60$ | |
|-------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% | Retour | Ctrl100% |
| 0,00% | 890,141 | 890,141 | 918,345 | 918,345 | 938,607 | 938,607 |
| 0,50% | 890,20 | 890,156 | 918,366 | 918,475 | 939,8 | 938,655 |
| 1,00% | 891,95 | 891,59 | 918,84 | 919,831 | 940,76 | 940,12 |
| 2,00% | 901,94 | 911,77 | 927,47 | 939,893 | 949,26 | 960,02 |
| 3,00% | 956,13 | 966,29 | 995,875 | 994,062 | 1022,44 | 1013,93 |
| 4,00% | 1088,47 | 1043,55 | 1127,7 | 1071,19 | 1162,93 | 1090,88 |
| 4,50% | 1149,82 | 1083,99 | 1192,87 | 1111,56 | 1231,81 | 1130,87 |

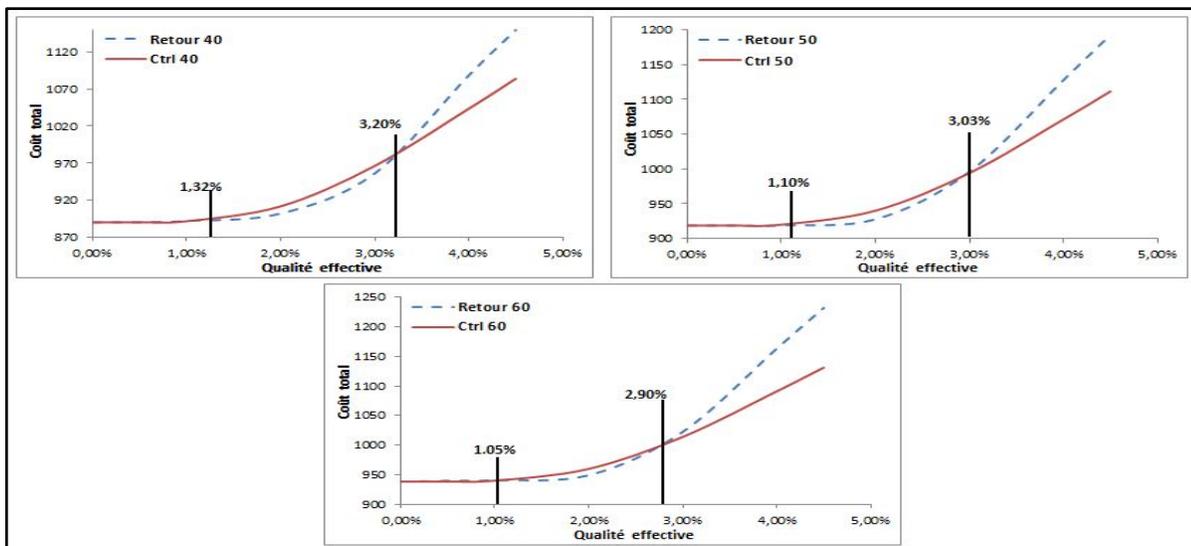


Figure 2. 12 Variation du coût de pénurie

La figure 2.12 démontre que l'augmentation de ce coût a pour effet de rendre la politique de retour au fournisseur, moins coûteuse que la politique de contrôle à 100 % dans des intervalles bien précis. Quand la qualité est encore bonne les deux politiques se valent. Dans les intervalles présentés sur la figure 2.12, le retour au fournisseur est meilleur mais au-delà le contrôle à 100 % devient plus intéressant. Lorsque la qualité se détériore le nombre de rejets augmente ce qui occasionne des risques de pénuries vu les délais du retour au fournisseur qui sont plus grands que celle du contrôle.

2.3.5 Discussion générale

Dans le cas où la qualité effective est encore bonne, la probabilité d'acceptation reste très élevée, ce qui rend les deux politiques presque égales, du fait que les opérations de contrôle et de retour sont moins fréquentes, mais à fur et à mesure que la qualité se détériore, une politique devient plus intéressante que l'autre. L'augmentation du coût de contrôle de la qualité nous force à préférer le retour au fournisseur comme politique au lieu du contrôle à 100 %, mais selon un intervalle où la qualité est relativement bonne. On observe que quelle que soit la politique adoptée, le coût total augmente avec l'augmentation du délai de livraison et cela s'explique par le risque croissant de tomber en pénurie. Si le délai de livraison diminue le retour au fournisseur serait la politique à adopter et vice versa lorsque ce délai augmente le contrôle à 100 % prendra le dessus, mais toujours selon le niveau de détérioration de la qualité. Pour un plan plus sévère, le contrôle à 100 % sera la politique à adopter sur un plus grand intervalle dû au nombre élevé de rejets. Le retour chez le fournisseur ne sera considéré que lorsque le plan devient moins sévère. En analysant les graphiques on remarque que l'augmentation du coût de pénurie entraîne l'augmentation du coût total pour les deux politiques utilisées, mais que le choix entre les deux est encore présent.

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de commande optimale pour un système de production non-fiable qui est approvisionné par un fournisseur dont le délai de livraison est

variable, dans un contexte de contrôle statistique de la qualité. Nous avons fait l'étude de deux politiques, une axée sur le contrôle de la qualité à 100 % et l'autre sur le retour au fournisseur, et ce, lorsque les lots de la matière première sont rejetés. Nous avons formulé le problème avec un modèle de programmation dynamique et stochastique en considérant le taux de production et la séquence d'approvisionnement comme variables de décisions. La complexité du système rendant les approches de résolution analytique limitée, nous avons opté pour l'approche expérimentale combinant la simulation avec les techniques d'optimisation statistique. Le choix des modèles de simulation utilisant les événements discrets-continus nous garantit la reproduction fidèle du comportement du système. Nous avons déterminé expérimentalement les valeurs optimales des paramètres de commande qui minimisent le coût total encouru pour ces politiques, en tenant compte des contraintes imposées. Enfin, nous avons fait une comparaison entre les deux politiques, mais suite aux résultats trouvés, nous restons toujours sceptiques sur la meilleur politique de contrôle à adopter, puisque dans des cas le contrôle à 100 % est plus avantageux, tandis que dans d'autres c'est le retour au fournisseur qui l'est. De ce fait, nous allons proposer une politique hybride de commande qui combine les deux politiques étudiés, dont la description et les résultats des simulations sont détaillés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

POLITIQUE HYBRIDE DE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION

Dans ce chapitre nous proposons une politique hybride de contrôle de la production et de la qualité d'un système de production non fiable en présence d'un fournisseur dont la qualité effective et le délai de livraison sont variables. La structure de la politique de production que nous proposons combine les deux politiques que nous avons traitées dans le chapitre précédent, et s'inspire de la littérature scientifique des travaux développée par Gharbi et al. (2006) et Hajji et al. (2004).

Plusieurs approches utilisées dans le domaine de la recherche de commande des systèmes de production sont basées sur le concept de la politique à seuil critique (HPP) introduite par Kimemia et Gershwin (1983), qui ont considéré l'hypothèse du temps de pannes et réparations sous la forme de loi exponentielle. Une formulation simple de cette politique a été développée par Akella et Kumar (1986) en étudiant le cas d'une machine qui fabrique un seul type de produit. De sa part, Sharifnia (1988) a démontré que la politique de production optimale a une structure de multiples seuils critiques (MHPP). La politique de production à seuil critique pour les cas où les processus de pannes et réparations sont non-markoviens et/ou la demande est aléatoire a été généralisée par Gharbi et Kenné (2000). Ils ont développé et validé un modèle de simulation qui permet de déterminer le seuil critique quel que soit les distributions de probabilité des pannes et des réparations, et de la demande. Feng et Yan (2000) ont apporté leur contribution, en une politique de production pour les systèmes non fiables qui font face à des demandes stochastiques. Le modèle LÉP qui prend en considération la qualité imparfaite a été présenté par Salameh et Jaber (2000). L'extension à ce modèle en présence de transport et de pénurie a été faite par Huang (2004) et Wee et al. (2007) respectivement. De leurs parts, Hajji et al. (2010) ont développé les paramètres de la politique de contrôle de la production et de l'approvisionnement d'un système manufacturier flexible à trois stages.

3.1 Notation et formulation du problème

3.1.1 Notation

La notation suivante sera utilisée tout au long de ce chapitre.

| | |
|---------------|---|
| x | : Niveau d'inventaire de la matière première |
| y | : Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit fini |
| S | : Stock de sécurité de la matière première |
| Q | : Quantité économique à commander |
| Z_1 | : Seuil critique de production (HPP) |
| Z_2 | : Seuil de choix de politique de contrôle à 100 % ou de retour au fournisseur |
| d | : Taux de la demande |
| dem | : Taux de la demande réelle |
| u | : Taux de production |
| U_{max} | : Taux maximum de production |
| $MTTF$ | : Temps moyen de fonctionnement du système |
| $MTTR$ | : Temps moyen de réparation |
| θ_i | : Instant de lancement de commande du lot i de matière première |
| D_i | : Délai de livraison du fournisseur |
| ϑ_i | : Temps d'arrivée du lot i de matière première en inventaire |
| C_{unit} | : Coût unitaire de la matière première |
| C_{com} | : Coût de passation de commande |
| C_0^+ | : Coût unitaire d'inventaire de la matière première |
| C_1^+ | : Coût unitaire d'inventaire du produit fini |
| C_1^- | : Coût unitaire de la pénurie |
| C_{prod} | : Coût unitaire de production |
| C_{cq} | : Coût unitaire de contrôle de la qualité |
| C_{rej} | : Coût unitaire de rejet |
| p^i | : Qualité effective du lot i |

- P_a^i : Probabilité d'acceptation du lot i
 n : Taille de l'échantillon
 c : Critère d'acceptation
 k : Nombre d'items non conformes dans l'échantillon n
 τ_{cq} : Durée de contrôle de la qualité

3.1.2 Formulation du problème

Le système manufacturier étudié (figure 3.1) est composé d'une installation qui produit un seul type de produit fini pour faire face à une demande constante. Cette installation est sujette à des pannes et des réparations aléatoires qui peuvent occasionner des ruptures de stock. L'approvisionnement en matière première se fait par un fournisseur non-fiable avec un délai de livraison D_l unités de temps.

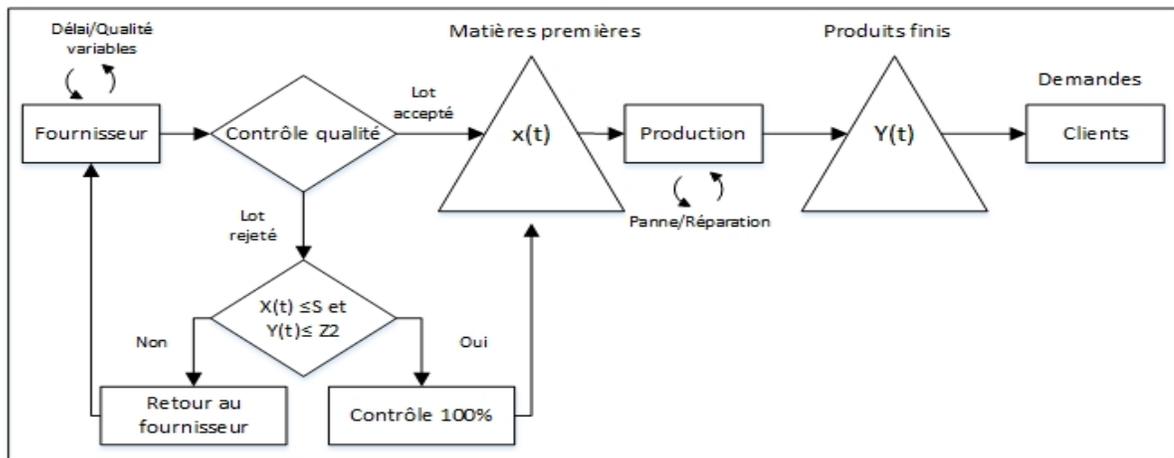


Figure 3. 1 Structure du système étudié avec la politique hybride

À la réception d'un lot commandé, une technique statistique de contrôle de la qualité par un plan d'échantillonnage simple (1.2.1) est appliquée pour statuer sur l'acceptation ou le rejet du lot. Chaque item de l'échantillon n est contrôlé pour vérifier l'acceptabilité du lot en considérant le critère $k \leq c$. Si le lot est rejeté, un contrôle à 100 % ou un retour au

fournisseur est effectué suivant les positions des inventaires de la matière première et du produit fini. Si le niveau du stock des produits finis est inférieur ou égal à Z_2 et que le niveau du stock de la matière première soit inférieur ou égal au seuil de sécurité S , nous effectuons un contrôle à 100 %, sinon nous procédons à un retour au fournisseur. En sachant que : $Z_2 = Z_1 \times a$; avec : $a \in [0,1]$.

L'état du système à l'instant t est modélisé par trois composantes : ① Le niveau de surplus cumulé (inventaire si positif et pénurie si négatif) mesuré par $y(t)$, ayant une nature continue dans le temps. ② Le niveau d'inventaire continu à l'instant t de la matière première mesuré par $x(t)$. Ce dernier, fait face en aval à une demande continue suivant un taux de production u , et en amont à un fournisseur, ou Q_i est la quantité du lot i de matière première reçu à l'instant $\theta_i + D_i$. Même si le système manufacturier est disponible, la production ne pourra se faire si $x(t)$ est égal à zéro, avec $0 \leq x(t) \leq L$ la contrainte maximale de la capacité de stockage de la matière première. ③ La composante discrète $\alpha(t)$, décrit l'état du système de production tel que :

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1: \text{Le système de production disponible} \\ 2: \text{Le système de production non disponible} \end{cases}$$

Pour le système considéré l'espace d'état est donnée par (x, y, α) avec :

$$x(t) \in [0, L]; y(t) \in R; \alpha(t) \in M = \{1, 2\}$$

La dynamique des niveaux d'inventaires $x(t)$ et $y(t)$ est donnée par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = u(t, \alpha) - \frac{d}{a^i}, & y(0) = y, \forall t \geq 0 \\ \dot{x}(t) = -u(t, \alpha), & x(0) = x, \forall t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[\\ x(\vartheta_i^+) = x(\vartheta_i^-) + b^i \cdot Q_i(t), & i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec,

$$\alpha^i = \begin{cases} 1 - p^i & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ lot est accepté} \\ 1 - P_a^i p^i & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ lot est accepté après un contrôlé à 100\%} \end{cases}$$

Et,

$$b^i = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ lot est accepté} \\ 1 - p^i & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ lot est accepté après un contrôlé à 100\%} \end{cases}$$

Où x et y désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire de la matière première et du produit fini, et ϑ_i^+ et ϑ_i^- les limites positive et négative de l'instant de réception en inventaire du lot i de la matière première. N est le nombre de commandes reçues sur l'ensemble de l'horizon.

Le taux de production et la quantité de matière première à commander doivent satisfaire les contraintes de capacité de production et d'approvisionnement données par :

$$\begin{cases} 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \times Ind \{\alpha(t) = 1\} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3.2)$$

Nos variables de décision sont le taux de production $u(\cdot)$ et la séquence de commande de l'approvisionnement que nous notons : $\Omega = \{(\theta_i, Q_i), \dots\}$, $i = 1, \dots, N$. En tenant compte de (3.2) et pour chaque mode $\alpha \in M = \{1,2\}$, l'ensemble des décisions admissibles est présenté par :

$$A(\alpha) = \begin{cases} (\Omega, u(\cdot)): 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \times Ind \{\alpha(t) = 1\} \\ 0 \leq Q_i(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3.3)$$

La fonction du coût instantané qui pénalise le maintien en stock de la matière première, de l'inventaire du produit fini (pénurie) et le taux de production est définie par $g(\cdot)$ tel que :

$$g(x(t), y(t), u(t, \alpha)) = C_0^+ \cdot x + C_1^+ \cdot y^+ + C_1^- \cdot y^- + C_{prod} \cdot u(\cdot) + C_{rej} \cdot p^i Q_i \quad (3.4)$$

La fonction instantanée des coûts d'approvisionnement (commande et prix unitaire) et de contrôle de la qualité des lots de la matière première est donnée par :

$$\begin{aligned} R(Q_i, \alpha) = & C_{com} \text{Ind}\{t = \theta_i\} + C_{unit} \cdot Q_i + \text{Ind}\{t = \theta_i + D_l\} C_{cq} \cdot n \\ & + \text{Ind}\{(t = \theta_i + D_l + n \cdot \tau_{cq}) \text{ et } (b^i = 1 - p)\} C_{cq} (Q_i \\ & - n) + E_\alpha \int_0^{\vartheta_i} e^{-\rho t} g(x - u(t, \alpha), y + u(t, \alpha) \\ & - \frac{d}{a^i}, u(t, \alpha)) dt. \end{aligned} \quad (3.5)$$

En utilisant (3.4) et (3.5), le coût total $J(\cdot)$ est défini par :

$$\begin{aligned} J(\cdot) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, y, u) dt + \sum_{i=0}^\infty e^{-\rho \vartheta_i} (C_{com}^i + C_{unit}^i \cdot Q_i + C_{cq}^i \cdot n) \right. \\ \left. + \sum_{i=0/b^i \neq 1}^\infty e^{-\rho \vartheta_i} \cdot C_{cq}^i \cdot b^i \cdot (Q_i - n) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Le problème de la planification de production considérée consiste à établir une politique de commande admissible $(\Omega, u(\cdot))$ qui minimisera le coût moyen total $J(\cdot)$ actualisé donné par l'équation (3.6), tout en respectant les contraintes des équations et les inégalités (3.1)-(3.4). Cette politique est une rétroaction qui détermine le taux de production et la politique d'approvisionnement en fonction de l'état du système. La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$\begin{aligned} v(x, y, \alpha) = \min_{(\Omega, u) \in A} J(x, y, u, \theta, \Omega, Q, \alpha) \end{aligned} \quad (3.7)$$

La détermination des propriétés de la fonction valeur (3.7) conduit à des conditions d'optimalité décrites par les équations de Hamilton-Jacobi Bellman (HJB). La nature

stochastique du problème à l'étude, rend impossible de trouver une solution analytique pour ces équations. Donc nous nous sommes basés sur la littérature scientifique, et sur les deux politiques que nous avons étudiés dans le chapitre précédent, afin de proposer une structure de politique de commande combinant simultanément la planification de la production, le contrôle de la qualité et l'approvisionnement.

- Politique hybride

Selon les niveaux d'inventaires des matières premières et des produits finis, un choix est fait entre la politique de retour au fournisseur ou de contrôle à 100 % des lots qui ne dépassent pas l'étape de contrôle de la qualité par un plan d'échantillonnage simple.

$$\text{Politique hybride} = \begin{cases} x(t) \leq S \text{ et } y(t) > Z_2 & \text{Retour au fournisseur} \\ x(t) \leq S \text{ et } y(t) \leq Z_2 & \text{Contrôle à 100\%} \end{cases} \quad (3.8)$$

- Contrôle du taux de production :

$$u(.) = \begin{cases} U_{max} & \text{si } y(t) < Z_1 \\ dem & \text{si } y(t) = Z_1 \\ 0 & \text{si } y(t) > Z_1 \end{cases} \quad (3.9)$$

- Taux de la demande réelle:

$$dem = \begin{cases} \frac{d}{1-p} & \text{si Retour au fournisseur} \\ \frac{d}{1-P_a p} & \text{si Contrôle à 100\%} \end{cases} \quad (3.10)$$

- Contrôle de l'approvisionnement :

$$\Omega(.) = \begin{cases} Q & \text{si } x(t) \leq S \\ 0 & \text{si } x(t) > S \end{cases} \quad (3.11)$$

Avec : $Z_1 \geq 0$; $S < Q < L$; $S \geq 0$

3.2 Modèle de simulation

Le modèle de simulation utilisé dans cette étude est une combinaison de modèles discrets-continus utilisant le langage de simulation SIMAN avec des sous-programmes en langage C++ (Pegden et al., 1995). La partie continue fournit le calcul instantané des niveaux d'inventaires de la matière première et du produit fini. Les séquences des pannes, des réparations et des ruptures des deux stocks sont modélisées par la partie discrète tel que décrit dans la politique de commande (3.8)-(3.11), ainsi le modèle de simulation imitera fidèlement le comportement du système de production. Le choix de l'utilisation des modèles discrets-continus permet de raccourcir le temps d'exécution de la simulation comparativement aux modèles purement discrets (Lavoie et al. 2010). Le diagramme du modèle de simulation est présenté sur la figure 3.2.

- Bloc ① : Initialisation

Il initialise les variables du modèle telles que les valeurs de décisions (S, Q, Z_1, a), le taux de la demande, les taux de production (u, U_{max}), les temps moyens inter panne/réparation ($MTBF, MTTR$), la distribution de probabilité des délais de livraison, d'acceptation et de la qualité effective (D_l, P_a, p), Ainsi que le temps de simulation T_∞ et les pas d'avancement dans le temps pour l'intégration des variables cumulatives.

- Bloc ② : Politiques de commande

Il permet de fixer selon la politique de commande (3-8)-(3.11), le taux de production et d'approvisionnement en fonction des variations des stocks de la matière première et du produit finis, cette variation est détectée avec le bloc Détection qui contrôle en continue les seuils des inventaires de la matière première et des produits finis. À la détection de l'atteinte d'un seuil $0, S, Z_1$, il transmet des signaux au bloc politique de commande hybride pour ajuster les taux de production et de passation de commande, il fixe aussi le taux de la demande réelle selon le choix de la politique adopté.

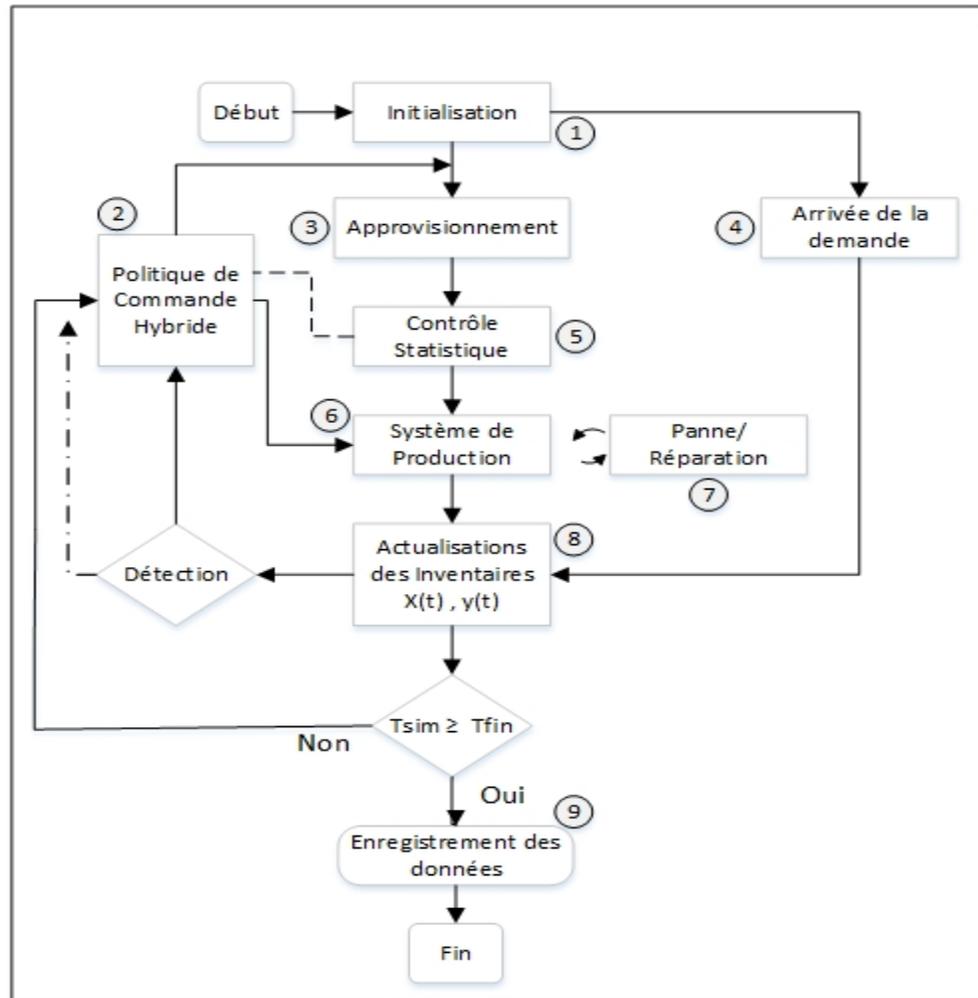


Figure 3. 2 Diagramme du modèle de simulation

- Bloc ③ : Approvisionnement

Il est utilisé pour modéliser l'approvisionnement par le fournisseur et agit directement sur les délais aléatoires des livraisons.

- Bloc ④ : Arrivée de la demande

Le taux de demande est constant est illustré comme bloc à part pour faciliter la compréhension. Il est utilisé comme intrant dans les équations d'état défini dans le sous-

programme en langage C++. Il agit directement sur le niveau d'inventaire des produits finis à chaque instant t .

- Bloc ⑤ : Contrôle statistique

Il détermine si le lot de la matière première livré est accepté suite au plan d'échantillonnage simple. Sinon il se réfère directement à la loi de commande pour le choix de politique à adopter.

- Bloc ⑥ : Système de production

Il représente la dynamique du système de production en termes de disponibilité de l'installation et taux de production. Il agit directement sur l'actualisation des niveaux d'inventaires (Bloc ⑧).

- Bloc ⑦ : Panne et réparation

Il échantillonne les temps des pannes et des réparations pour le système de production à partir de leurs distributions de probabilité respectives. Les états de fonctionnement du système de production sont incorporés dans les équations d'état par le biais des processus stochastiques, afin de contrôler les niveaux d'inventaires en temps réel.

- Bloc ⑧ : Actualisations des inventaires

Il permet la mise à jour des niveaux des stocks et des variables cumulatives. Les variables cumulatives sont intégrées en utilisant la méthode Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) qui garantit une précision constante, comme mentionnée dans Pegden et al. (1995). Les paramètres minimaux et maximaux d'avancement dans le temps sont choisis pour garantir une meilleure précision.

- Bloc ⑨ : Enregistrement des données

Toutes les informations nécessaires pour le calcul du coût total encouru sont enregistrées. La simulation se termine lorsque le temps de simulation actuel T_{sim} atteint la durée de la simulation définie T_{fin} .

3.2.1 Validation du modèle de simulation

Pour valider notre modèle de simulation, une représentation graphique des variations des inventaires instantanés a été générée et elles sont représentées sur la figure 3.3. La simulation du système est réalisée en considérant les valeurs du tableau 3.1. Nous avons ajouté la courbe `` Politique `` pour vérifier que notre modèle réagit adéquatement selon la politique hybride pour le choix entre la politique de contrôle à 100 % ou le retour au fournisseur. Si un lot accepté la courbe prend une valeur médiane, s'il est rejeté puis contrôlé à 100 %, elle prend une valeur basse et pour le retour au fournisseur une valeur haute. Chaque segment illustre la durée d'un contrôle de tous les items ainsi que celle du retour.

Tableau 3. 1 Valeurs de validation du modèle de simulation

| Paramètres | S | Q | Z_1 | a |
|------------|-----|-----|-------|-----|
| Valeur | 200 | 500 | 600 | 0,5 |

Lorsque le seuil de sécurité S est atteint ①, une commande d'approvisionnement est lancée suivant la politique d'approvisionnement (3.11). Le lot reçu est rejeté suite à un contrôle simple. Un retour au fournisseur est effectué ②, vu que seul le seuil de sécurité est franchi et que la condition du dépassement du seuil Z_2 ne s'est pas réalisée. À la réception du lot de remplacement ③ après le délai de retour, on constate un autre rejet et un contrôle à 100 % est effectué ④, et ce suivant la politique hybride (3.8). Après le délai de contrôle de la qualité, le lot est accepté ⑥ est le stock $x(t)$ est augmenté ⑤. Lorsque le seuil de sécurité est de nouveau franchi ⑦, une nouvelle commande est lancée, mais le lot réceptionné est rejeté et retourné au fournisseur puisque le seuil Z_2 n'est pas encore atteint ⑧. Après le délai de retour ⑩, et vu que les deux seuils sont maintenant franchis un contrôle à 100 % est effectué ⑫ selon la politique hybride, puis le lot est ajouté à l'inventaire ⑨. La politique de contrôle du taux de production (3.9) est respectée, puisque la quantité Q de la matière première ⑬ est utilisée avec un taux de production maximum pour atteindre le seuil critique

de production Z_1 (14), puis la cadence de production est réduite au taux de la demande (16) (voir l'allure des segments des deux inventaires sur les graphes). On remarque que suite à une panne (17) le niveau du stock de la matière première $x(t)$ reste constant et que le niveau du stock de la matière fini $y(t)$ diminue. À la fin de la réparation (19) le niveau de $x(t)$ diminue et celui de $y(t)$ augmente puis diminue (18) suite la une rupture du stock de $x(t)$. Après cette analyse on peut conclure que notre modèle représente fidèlement la politique de commande proposée.

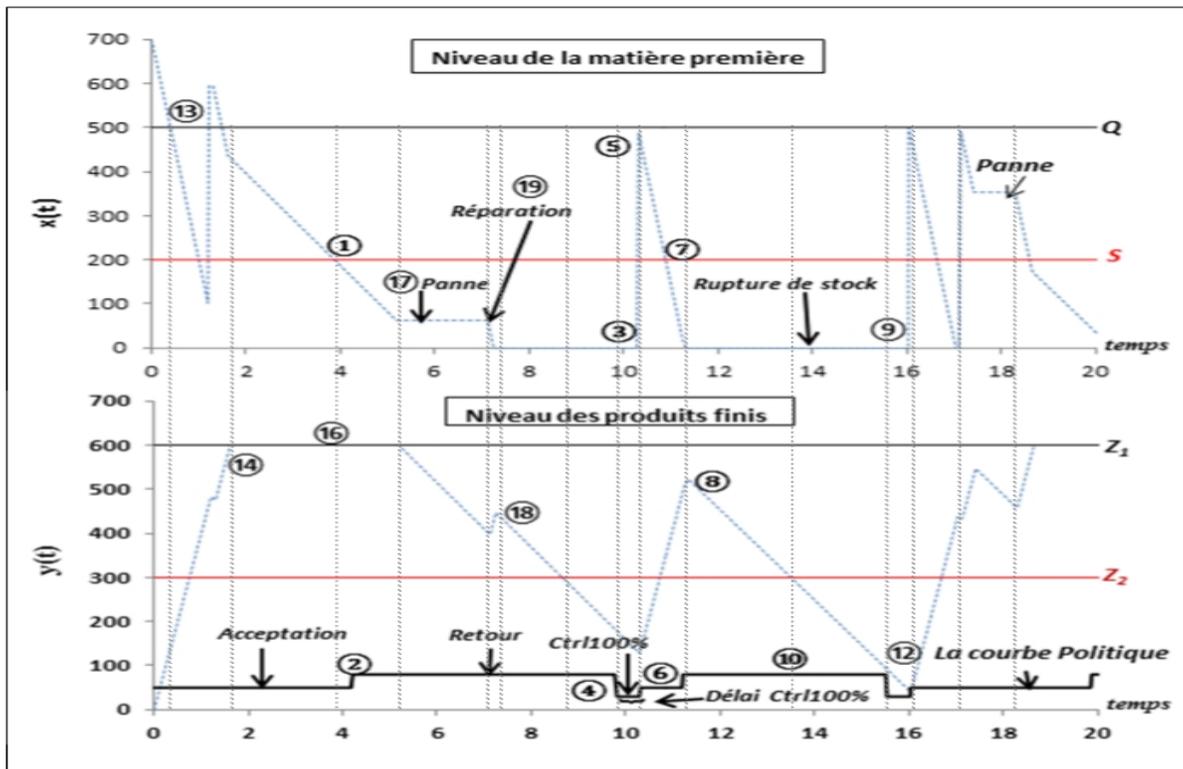


Figure 3.3 Dynamiques des stocks sous la politique hybride

3.2.2 Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse

Dans cette section, nous présentons la démarche d'optimisation des paramètres de la politique de commande hybride qui minimise le coût total moyen encouru. Le but de cette démarche est de trouver la relation entre les facteurs d'entrée (S^* , Q^* , Z_1^* , a^*) ainsi que leurs

interactions qui ont un effet significatif sur la variable de sortie qui est la réponse du système (c.-à-d. Coût total). Les valeurs optimales de la politique de commande doivent minimiser le coût total en tenant compte des contraintes énoncées dans (3.8)-(3.11). Les différentes valeurs que nous avons choisies pour la fonction coût (3.6) ont été inspirées de la littérature dans le domaine de la commande optimale et la gestion des stocks. Les tableaux 3.2 et 3.3 résument respectivement les paramètres choisis pour la fonction coût et les paramètres choisis pour la simulation.

Tableau 3. 2 Paramètres de coût du système

| Paramètres | C_0^+ | C_1^+ | C_1^- | C_{prod} | C_{com} | C_{unit} | C_{cq} | C_{rej} |
|------------|---------|---------|---------|------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Valeurs | 1 | 1 | 40 | 0,25 | 150 | 0,5 | 5 | 10 |

Tableau 3. 3 Paramètres de simulation du système

| Paramètres | TTF | TTR | D_l | p | P_a |
|------------|--|--|---------------------|-----------|--------|
| Valeurs | $Expo\left(\frac{1}{0.1}, stream\right)$ | $Expo\left(\frac{1}{0.9}, stream\right)$ | $Expo(1.5, stream)$ | 2% | 94.91% |
| Paramètres | τ_{cq} | n | c | U_{max} | d |
| Valeurs | 10^{-5} | 99 | 4 | 500 | 100 |

En nous basant sur le travail de Gharbi et Kenné (2003), nous supposons que la fonction valeur (3.7) est convexe. Nous avons effectué les expériences de simulation à partir d'un plan d'expériences complet de quatre facteurs à trois modalités 3^4 , avec un facteur-bloc qui représente la génération des nombres aléatoires. Cinq répliques ont été effectuées pour chaque combinaison des facteurs (S, Q, Z_1, a) , totalisant 405 ($3^4 \times 5$) simulations d'une durée de $T_{sim} = 500.000$ unités de temps pour chaque une d'elles. L'ordre des expériences a été entièrement randomisé pour nous protéger contre les effets des variables perturbatrices. Après certains tests de simulation, les limites de variation des variables indépendantes (S, Q, Z_1, a) ont été fixées afin de centrer la région optimale de la réponse (Coût). Elles sont présentées dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 4 Niveaux des variables indépendantes

| Facteurs | Limite inférieure | Point centre | Limite supérieure |
|----------|-------------------|--------------|-------------------|
| S | 10 | 110 | 210 |
| Q | 450 | 700 | 950 |
| Z_1 | 350 | 500 | 650 |
| a | 0.2 | 0.55 | 0.9 |

Une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) a été effectuée sur les données de la simulation en utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics. Les interactions et les effets quadratiques des variables indépendantes (S, Q, Z_1, a) sur la variable de réponse (Coût) sont présentés par le graphique de Pareto standardisé sur la figure 3.4. Le coefficient de corrélation (R^2) montre que plus de 96 % (P-value < 0.05) de la variabilité observée du coût prévu est expliquée par le modèle de réponse de surface (Montgomery, 2008). Une méthodologie de surface de réponse est par la suite réalisée afin d'optimiser le coût total moyen encouru (variable dépendante) en fonction des variables significatives.

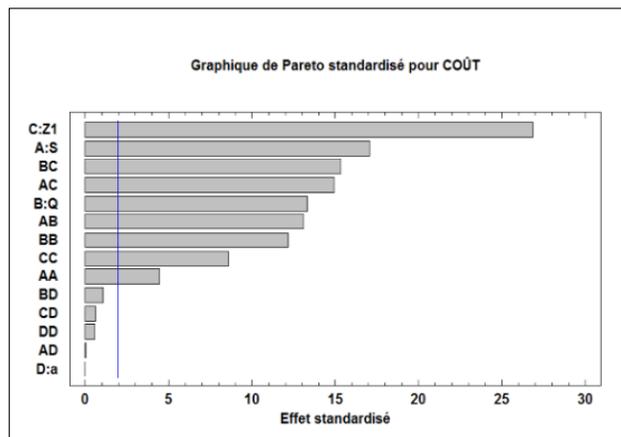


Figure 3. 4 Graphique de Pareto du coût total pour la politique hybride

Une analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance a été également effectuée pour vérifier la conformité du modèle. Selon Statgraphics, La fonction de surface de réponse des variables dépendantes du système est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{COÛT} = & 2156,51 - 2,47436.S - 1,75048.Q - 2,2769.Z_1 & (3.12) \\
 & - 63,7115.a + 0,00180648.S^2 + 0,00149833.S.Q \\
 & + 0,00285185.S.Z_1 + 0,00277778.S.a \\
 & + 0,000789481.Q^2 + 0,00117037.Q.Z_1 \\
 & + 0,0361905.Q.a + 0,00154362.Z_1^2 \\
 & + 0,034127.Z_1.a + 19,1232.a
 \end{aligned}$$

La surface de réponse équivalente à cette fonction est présentée dans la figure 3.5. Le coût total minimum obtenu est égal à 961,88 qui correspond aux paramètres de commande optimaux : $S^* = 83$, $Q^* = 738$, $Z_1^* = 374$, $Z_2^* = 235$; avec : $a = 0,63$.

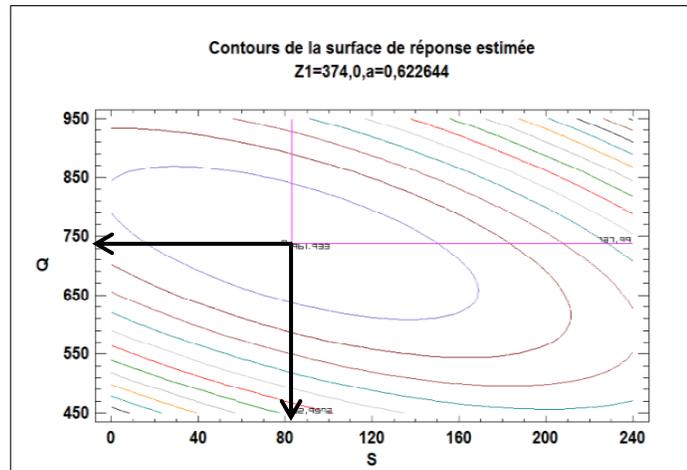


Figure 3. 5 Surface de réponse du coût total

Le tableau 3.5 résume les résultats obtenus suite à l'optimisation des paramètres de commande des trois politiques.

Tableau 3. 5 Valeurs du coût total pour les trois politiques

| Optimaux | S^* | Q^* | Z_1^* | Z_2^* | Coût total* |
|---------------------|-------|-------|---------|---------|-------------|
| Politique Ctrl100% | 61 | 712 | 362 | - | 971,19 |
| Politique de retour | 102 | 773 | 368 | - | 989,40 |
| Politique hybride | 83 | 738 | 374 | 235 | 961,88 |

Pour les mêmes paramètres imposés au système (tableau 3.2), la politique hybride est plus avantageuse en termes de coût que les deux autres. Cet avantage est dû essentiellement à sa capacité de réduire les pénuries dont le coût est le plus pénalisé. On remarque que le seuil critique $Z_1^* = 374$, est plus élevé du fait que le système essaye de se protéger contre les ruptures du stock, afin de faire face à la demande constante. Les résultats démontrent l'avantage de combiner les deux autres politiques de contrôle avec l'utilisation d'un niveau du stock de sécurité S^* et un deuxième seuil Z_2^* pour gérer le nombre de contrôles de la qualité à 100 % ou le retour au fournisseur, lorsque les deux niveaux (S^*, Z_2^*) sont jugés insuffisants. Lorsque le niveau de l'inventaire $y(t)$ n'a pas encore franchi le seuil Z_2 le système opte pour un retour au fournisseur, afin d'économiser sur le coût de contrôle de la qualité. Du fait que le délai de contrôle à 100 % est généralement inférieur à celui de la livraison, le système opte pour l'inspection totale quand les deux seuils S et Z_2 sont franchis. On remarque que pour la politique hybride, le seuil du stock de sécurité et la quantité économique à commander prennent des valeurs médianes par rapport aux deux autres politiques afin que le système puisse contrôler les politiques sur les mêmes plages.

3.2.3 Analyse de sensibilité pour la politique hybride

Dans le but de confirmer l'efficacité et la robustesse de l'approche de résolution, une série d'exemples est considérée afin d'étudier la sensibilité de politique de commande du système lorsque les paramètres de coût varient. Ces derniers sont dérivés du scénario de base en les variant à des valeurs plus ou moins élevées. Les valeurs trouvées par cette analyse sont données par le tableau 3.6.

- Variation de C_0^+ (scénarios 1 et 2)

Lorsque le coût d'inventaire de la matière première augmente, le point de commande diminue et la quantité économique à commander diminue, le seuil critique de production Z_1 ainsi que celui de choix de politique Z_2 augmentent. Dans le but de diminuer le coût total d'inventaire de la matière première le système réagit de façon à diminuer le seuil de lancement de commande et la quantité économique à commander. Le seuil de choix de

politique Z_2 est aussi augmenté pour privilégier le contrôle à 100 % que le retour au fournisseur. Le niveau de Z_1 est augmenté afin, que l'opération de transformation diminue le niveau de l'inventaire de la matière première, et pour faire face à la demande. Le contraire se produit lorsque C_0^+ diminue.

- Variation de C_1^+ (scénarios 3 et 4)

Lorsque le coût d'inventaire du produit fini augmente, le point de commande augmente et la quantité économique à commander augmente, le seuil critique de production Z_1 ainsi que celui de choix de politique Z_2 diminuent, dans le but de diminuer le coût total d'inventaire et de privilégier le retour au fournisseur, afin de réduire les coûts de maintien du niveau de la matière première élevée. Le contraire est observé lorsque C_1^+ diminue.

- Variation de C_1^- (scénarios 5 et 6)

Lorsque le coût de pénurie augmente, la quantité économique à commander diminue, le point de commande et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) augmentent. Puisque le coût de pénurie est le plus pénalisé, le système réagit en maintenant les trois seuils de sécurité (S^*, Z_1^*, Z_2^*) à un niveau élevé, afin d'éviter les ruptures du stock à cause des délais engendrés par une réduction de la production (panne/réparation), un contrôle par plan d'échantillonnage simple, un contrôle à 100 % ou un retour au fournisseur et pour faire face à la demande. Le contraire arrive lorsque C_1^- diminue.

- Variation de C_{cq} (scénarios 7 et 8)

Lorsque le coût unitaire de contrôle de la qualité augmente, le point de commande, la quantité économique à commander, le seuil Z_1^* augmentent et le seuil Z_2^* diminue. Afin de diminuer le coût total de contrôle le système réduit de nombre de commandes et le seuil Z_2^* est diminué afin de privilégier les opérations de retour au fournisseur. Les niveaux élevés de la matière première et du produit fini sont assurés par l'augmentation de Q^* et de Z_1^* . On observe le contraire lorsque C_{cq} est diminué.

- Variation de C_{unit} (scénarios 9 et 10)

Lorsque le coût unitaire de la matière première augmente, la quantité économique à commander diminue, le point de commande et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) augmentent. Le système réagit en diminuant la quantité économique à commander, puisque la taille du lot influence directement le coût total. Le seuil de production est augmenté pour éviter les pénuries. Le contraire arrive lorsque C_{unit} diminue.

Tableau 3. 6 Analyse de sensibilité pour la politique hybride

| Scénarios | C_0^- | C_1^+ | C_1^- | S^* | Q^* | Z_1^* | Z_2^* | Coût* | Remarque |
|-------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|---------------|---------------------------------|
| Base | 1 | 1 | 40 | 83 | 738 | 374 | 235 | 961,88 | Cas de base |
| 1 | 0,9 | 1 | 40 | 171 | 749 | 288 | 199 | 927,17 | S↑, Q↑, Z_1 ↓, Z_2 ↓, COÛT↓ |
| 2 | 1,1 | 1 | 40 | 58 | 723 | 440 | 258 | 989,94 | S↓, Q↓, Z_1 ↑, Z_2 ↑, COÛT↑ |
| 3 | 1 | 0,9 | 40 | 60 | 735 | 464 | 261 | 925,08 | S↓, Q↓, Z_1 ↑, Z_2 ↑, COÛT↑ |
| 4 | 1 | 1,1 | 40 | 167 | 742 | 266 | 188 | 990,63 | S↑, Q↑, Z_1 ↓, Z_2 ↓, COÛT↓ |
| 5 | 1 | 1 | 30 | 54 | 749 | 299 | 168 | 911,9 | S↓, Q↑, Z_1 ↓, Z_2 ↓, COÛT↓ |
| 6 | 1 | 1 | 50 | 101 | 726 | 420 | 283 | 991,91 | S↑, Q↓, Z_1 ↑, Z_2 ↑, COÛT↑ |
| Scénarios | C_{cq} | C_{unit} | C_{com} | S^* | Q^* | Z_1^* | Z_2^* | Coût* | Remarque |
| Base | 5 | 0,5 | 150 | 83 | 738 | 374 | 235 | 961,88 | Cas de base |
| 7 | 4 | 0,5 | 150 | 77 | 714 | 372 | 268 | 946,38 | S↓, Q↓, Z_1 ↓, Z_2 ↑, COÛT↓ |
| 8 | 6 | 0,5 | 150 | 91 | 759 | 377 | 208 | 976,93 | S↑, Q↑, Z_1 ↑, Z_2 ↓, COÛT↑ |
| 9 | 5 | 0,4 | 150 | 80 | 743 | 373 | 232 | 951,66 | S↓, Q↑, Z_1 ↓, Z_2 ↓, COÛT↓ |
| 10 | 5 | 0,6 | 150 | 89 | 734 | 375 | 241 | 971,95 | S↑, Q↓, Z_1 ↑, Z_2 ↑, COÛT↑ |
| 11 | 5 | 0,5 | 100 | 90 | 726 | 376 | 238 | 951,90 | S↑, Q↓, Z_1 ↑, Z_2 ↑, COÛT↓ |
| 12 | 5 | 0,5 | 200 | 79 | 749 | 372 | 233 | 968,70 | S↓, Q↑, Z_1 ↓, Z_2 ↓, COÛT↑ |

- Variation de C_{com} (scénarios 11 et 12)

Lorsque le coût de passation de commande augmente, le point de commande diminue, la quantité économique à commander augmente et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) diminuent. Le système réagit en commandant une quantité économique plus grande mais moins fréquemment, afin d'économiser sur le coût de commande. Le système maintient un niveau plus élevée de la matière première ce qui permet de diminuer le seuil du produit fini et

favoriser les décisions de retour afin d'éviter un coût élevé de stockage. Le contraire se produit lorsque C_{com} diminue.

3.3 Comparaison des trois politiques

Dans cette section nous avons réalisé une comparaison entre les trois politiques, afin d'étudier et mettre en relief les avantages de la politique hybride comparativement aux deux autres. Nous avons utilisé les mêmes paramètres de comparaison du chapitre 2 section 2.3.

3.3.1 Variation du coût de contrôle de la qualité

Nous avons reproduit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le coût du contrôle de la qualité respectivement à 5, 10 et 15 unités monétaires. Le tableau 3.7 démontre que lorsque la qualité effective augmente, le gain avec la politique hybride sur le coût total devient conséquent.

Tableau 3. 7 Valeurs du coût total pour les différentes politiques avec variation du coût de contrôle de la qualité

| p | $C_{cq} = 5$ | | | $C_{cq} = 10$ | | | $C_{cq} = 15$ | | |
|-------|--------------|----------|---------|---------------|----------|---------|---------------|----------|---------|
| | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride |
| 0,00% | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1079,12 | 1079,12 | 1079,12 | 1158,60 | 1158,60 | 1158,60 |
| 0,50% | 1066,98 | 1066,99 | 1066,68 | 1079,25 | 1079,35 | 1079,95 | 1164,71 | 1165,92 | 1164,71 |
| 1,00% | 1087,89 | 1087,73 | 1087,61 | 1119,86 | 1122,29 | 1124,29 | 1180,64 | 1183,36 | 1180,64 |
| 2,00% | 1148,37 | 1169,36 | 1128,37 | 1168,34 | 1227,85 | 1158,34 | 1272,63 | 1325,03 | 1248,63 |
| 3,00% | 1273,59 | 1244,97 | 1185,58 | 1308,34 | 1341,9 | 1241,92 | 1384,42 | 1478,36 | 1344,38 |
| 4,00% | 1478,98 | 1363,56 | 1263,82 | 1647,57 | 1502,94 | 1359,45 | 1707,4 | 1723,99 | 1497,83 |
| 4,50% | 1645,23 | 1444,45 | 1298,55 | 1845,03 | 1586,13 | 1446,37 | 1918,84 | 1851,22 | 1595,19 |

La figure 3.6 démontre que malgré l'augmentation de ce coût, la politique hybride est plus intéressante que celle de retour au fournisseur et de contrôle à 100 %. Étant conçue en combinant les deux autres politiques, elle fait en sorte d'éviter les opérations excessives de

contrôle à 100 % lorsque la qualité effective commence à se détériorer en favorisant le retour au fournisseur. Lorsque la qualité est encore bonne les trois politiques se valent.

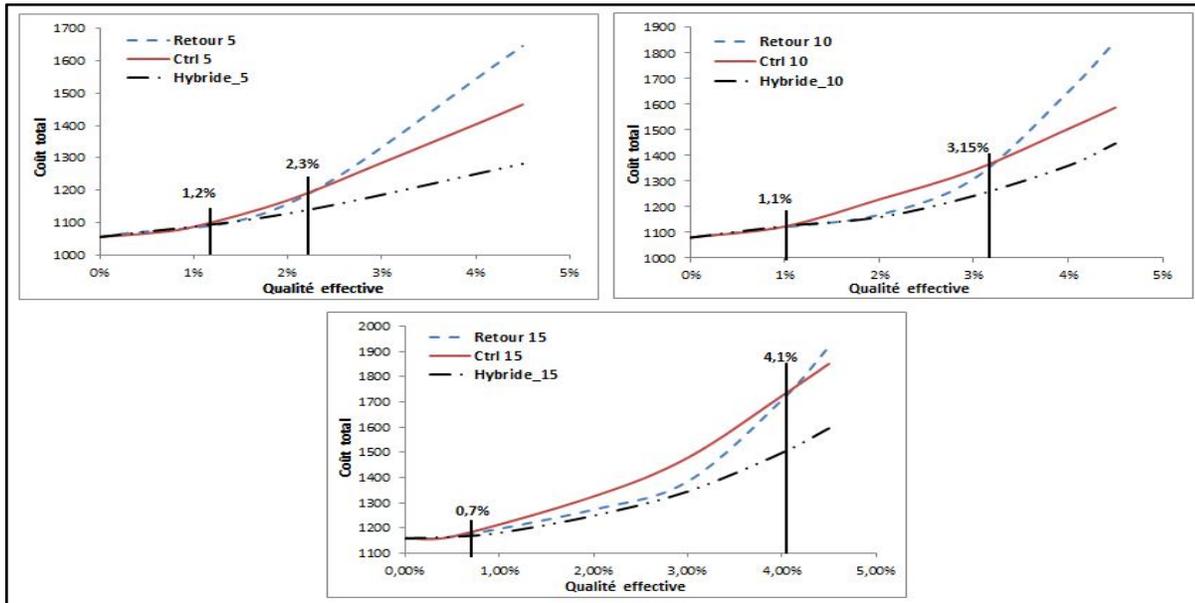


Figure 3. 6 Comparaison des trois politiques en variant le coût de contrôle de la qualité

3.3.2 Variation du délai de livraison

Nous avons reproduit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le délai de livraison respectivement à 1.5, 2 et 2.5 unités de temps. La figure 3.7 représente une comparaison de ces trois politiques. Le tableau 3.8 démontre que la politique hybride est toujours plus avantageuse que les deux autres du fait qu'elle régule le choix entre celles-ci en termes de délai. Sachant que le délai de livraison est généralement plus grand que celui du contrôle de la qualité, les opérations de contrôle sont donc les plus souvent effectuées et ce lorsque la qualité effective se détériore. La politique hybride fait en sorte que notre système tend à se protéger contre les pénuries vu l'augmentation des délais. La présence des trois seuils, stock de sécurité, choix de politique et seuil critique de production nous prémunissent des effets de rupture de stock prolongée combinée à la présence de pannes et réparations sur le système.

Tableau 3. 8 Valeurs du coût total pour les différentes politiques avec variation du délai de livraison

| p | $D_l = 1.5$ | | | $D_l = 2$ | | | $D_l = 2.5$ | | |
|-------|-------------|----------|---------|-----------|----------|---------|-------------|----------|---------|
| | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride |
| 0,00% | 890,141 | 890,141 | 890,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1204,67 | 1204,67 | 1204,67 |
| 0,50% | 890,26 | 890,156 | 890,39 | 1066,98 | 1066,99 | 1066,79 | 1204,98 | 1204,89 | 1204,89 |
| 1,00% | 891,95 | 891,59 | 892,18 | 1087,89 | 1087,73 | 1087,73 | 1219,45 | 1206,1 | 1206,1 |
| 2,00% | 901,94 | 911,77 | 899,99 | 1148,37 | 1169,36 | 1128,37 | 1336,112 | 1221,22 | 1209,22 |
| 3,00% | 956,13 | 966,29 | 933,14 | 1273,59 | 1244,97 | 1184,97 | 1530,71 | 1280,83 | 1280,83 |
| 4,00% | 1078,47 | 1043,55 | 984,61 | 1478,98 | 1363,56 | 1253,56 | 1828,07 | 1358,4 | 1358,4 |
| 4,50% | 1149,82 | 1083,99 | 1006,37 | 1645,23 | 1444,45 | 1281,55 | 2042,76 | 1399,25 | 1399,25 |

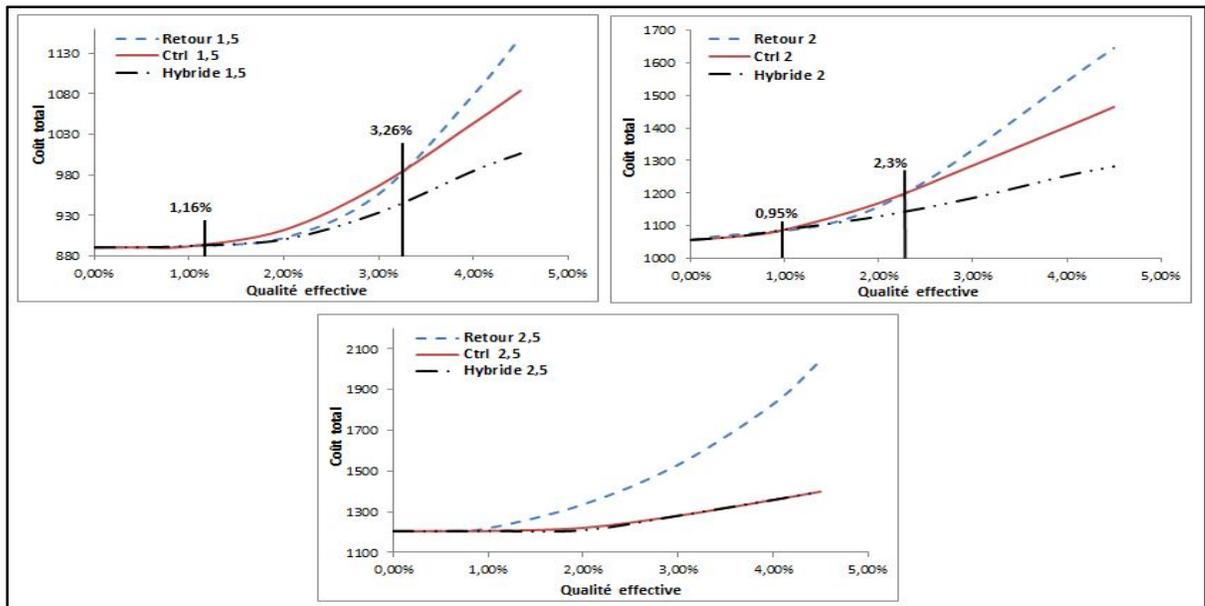


Figure 3. 7 Comparaison des trois politiques en variant le délai de livraison

3.3.3 Sévérité des plans d'échantillonnage simple

Nous avons reproduit sur la figure 3.8, deux graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le plan d'échantillonnage simple respectivement pour $c = 2$ et $c = 3$. Le tableau 3.9 présente les valeurs trouvées pour les différentes politiques étudiées.

Tableau 3. 9 Valeurs du coût total pour les différentes politiques en variant le plan d'échantillonnage simple

| p | $c = 2$ | | | $c = 3$ | | |
|-------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
| | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride |
| 0,00% | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 | 1056,14 |
| 0,50% | 1056,98 | 1056,23 | 1056,98 | 1056,98 | 1056,23 | 1056,98 |
| 1,00% | 1057,60 | 1057,88 | 1057,42 | 1057,89 | 1057,73 | 1057,89 |
| 2,00% | 1192,44 | 1149,25 | 1088,34 | 1158,37 | 1159,36 | 1107,13 |
| 3,00% | 1444,86 | 1241,98 | 1159,68 | 1223,9 | 1194,97 | 1163,76 |
| 4,00% | 1830,11 | 1329,37 | 1266,70 | 1378,98 | 1273,56 | 1238,15 |
| 4,50% | 2001,48 | 1379,14 | 1314,49 | 1645,23 | 1344,45 | 1269,79 |

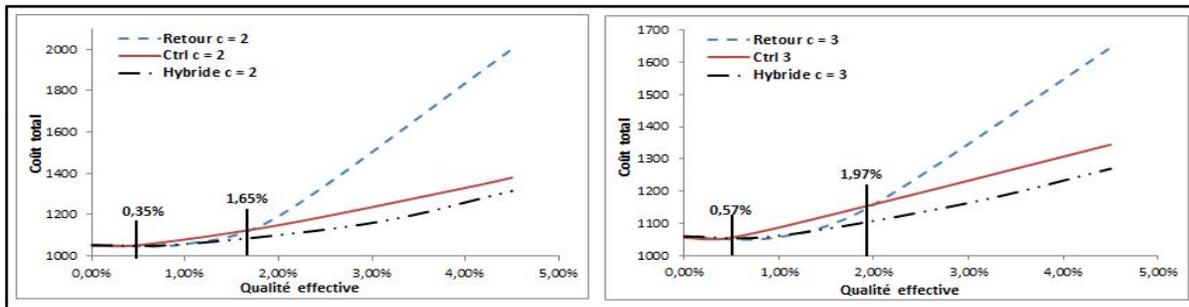


Figure 3. 8 Comparaison des trois politiques en variant le plan d'échantillonnage simple

Le tableau 3.9 nous confirme que le coût total encouru avec la politique hybride présente des avantages économiques par rapport à la politique de contrôle à 100 % et de retour au fournisseur et ce pour n'importe quelle valeur de la qualité effective. Lorsque la qualité effective est encore bonne les trois politiques se valent.

3.3.4 Variation du coût de pénurie

Nous avons produit trois graphes du coût total en fonction de la qualité effective en variant le coût de pénurie respectivement à 40,50 et 60 unités monétaires

Tableau 3. 10 Valeurs du coût total pour les différentes politiques en variant le coût de pénurie

| p | $C_1^- = 40$ | | | $C_1^- = 50$ | | | $C_1^- = 60$ | | |
|-------|--------------|----------|---------|--------------|----------|---------|--------------|----------|---------|
| | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride | Retour | Ctrl100% | Hybride |
| 0,00% | 890,141 | 890,14 | 890,14 | 918,345 | 918,34 | 918,345 | 938,60 | 938,60 | 938,607 |
| 0,50% | 890,20 | 890,15 | 890,39 | 918,366 | 918,47 | 918,678 | 939,80 | 938,65 | 939,42 |
| 1,00% | 891,95 | 891,59 | 892,18 | 918,84 | 919,83 | 919,827 | 940,76 | 940,12 | 940,926 |
| 2,00% | 901,94 | 911,77 | 899,99 | 927,47 | 939,89 | 921,117 | 949,26 | 960,02 | 948,401 |
| 3,00% | 956,13 | 966,29 | 933,14 | 995,875 | 994,06 | 957,073 | 1022,44 | 1013,93 | 985,061 |
| 4,00% | 1088,47 | 1043,55 | 984,61 | 1127,7 | 1071,19 | 1005,98 | 1162,93 | 1090,88 | 1021,54 |
| 4,50% | 1149,82 | 1083,99 | 1016,37 | 1192,87 | 1111,56 | 1028,69 | 1231,81 | 1130,87 | 1036,7 |

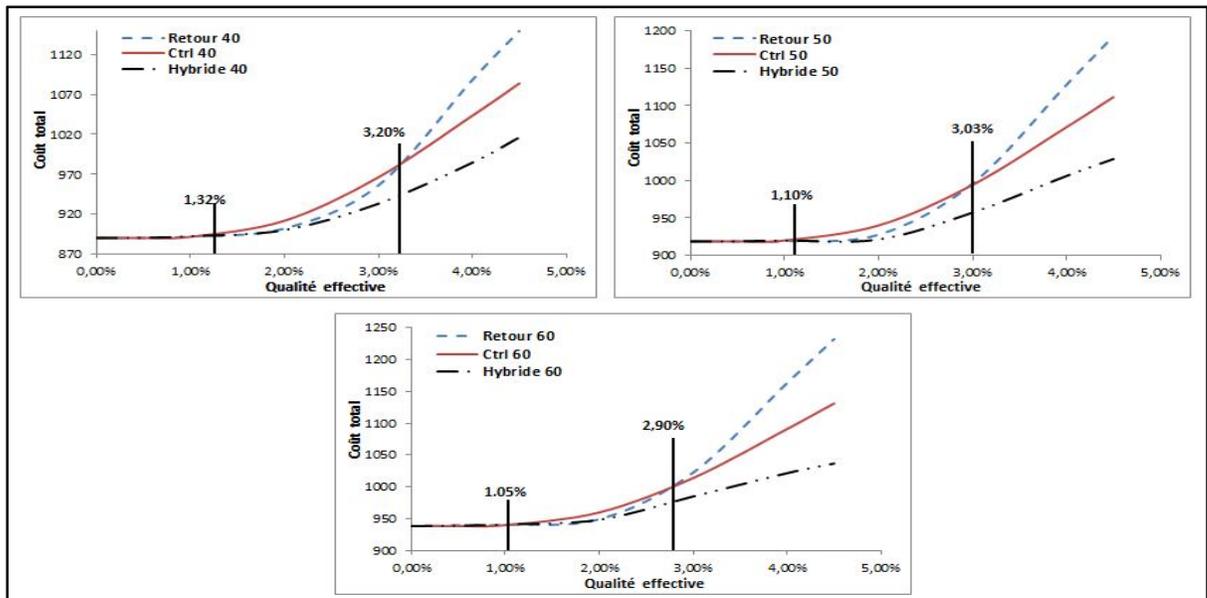


Figure 3. 9 Comparaison des trois politiques en variant le coût de pénurie

Le tableau 3.10 démontre que la politique hybride est toujours plus avantageuse. On remarque qu'elle est toujours meilleure que celle du contrôle à 100 % ou du retour au fournisseur du fait qu'elle minimise le coût total en évitant les pénuries. La politique adoptée prévoit la réaction du système en fonction de la fluctuation du délai de livraison, de la qualité effective et des niveaux des inventaires.

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de commande de la production, de contrôle de la qualité et du retour au fournisseur, d'un système de production non-fiable sujet à des pannes et des réparations aléatoires et qui s'approvisionne en matière première d'un fournisseur dont le délai de livraison et la qualité sont variables. En nous basant sur la littérature scientifique, nous avons proposé et optimisé les paramètres de la politique hybride, qui combine le contrôle à 100 % et le retour au fournisseur des lots réceptionnés. Si un lot est rejeté suite à un contrôle de la qualité par un plan d'échantillonnage simple, il est soit inspecté item par item ou retourné au fournisseur et ce selon la position des inventaires de la matière première et du produit fini. La conclusion principale est que la politique hybride présente de meilleurs résultats en termes de coût, pour toutes les configurations du système choisies. Les avantages économiques sont principalement dus à sa capacité à réduire un grand nombre d'opérations inutiles de contrôle de la qualité et de diminuer la fréquence des retours au fournisseur ce qui nous assure une réduction au niveau des pénuries.

La complexité du problème nous a poussés vers l'utilisation d'une approche expérimentale qui se base sur les plans d'expériences, la simulation, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse. Afin de représenter fidèlement le comportement stochastique et dynamique du système, le modèle de simulation combinée par des événements discrets/continus est développé. La robustesse de l'approche utilisée et l'efficacité de la politique de commande proposée ont été confirmées par une analyse de sensibilité.

CHAPITRE 4

POLITIQUE DE COMMANDE DE LA PRODUCTION ET DE SÉLECTION DE FOURNISSEURS D'UN SYSTÈME MANUFACTURIER NON-FIABLE

Ce chapitre traite un problème d'optimisation des politiques de commande de la production et de sélection de fournisseurs d'un système manufacturier non-fiable fonctionnant dans un environnement dynamique et stochastique. Notre étude est principalement basée sur les articles de Hajji et al. (2009, 2011) qui ont proposé des stratégies de contrôle de la production et de l'approvisionnement en présence de plusieurs fournisseurs. Nous y proposerons une nouvelle politique de commande de la production et de sélection de fournisseurs inspirée de la revue de littérature sur les pondérations utilisées dans la gestion de la production et l'ordonnancement des tâches, essentiellement sur la règle de Smith (Weighted Shortest Processing Time (WSPT)).

On retrouve dans la revue de littérature, plusieurs études sur les politiques de contrôle de la production et d'approvisionnement qui traitent le lien étroit et la dépendance entre les entreprises et les fournisseurs. Parlar et Perry (1995) ont proposé un modèle d'inventaire (Q, r, T) pour contrôler un milieu de production dynamique stochastique où le processus de disponibilité d'un fournisseur présente deux états continus dans le temps d'une chaîne de Markov, où un état correspond à la disponibilité et l'autre état correspond à une indisponibilité. Considérant un futur incertain, ils ont déterminé le point de commande, la quantité à commander et le temps d'attente avant la prochaine commande lorsque le système bascule de non disponible à disponible. Ils ont par la suite analysé les mêmes caractéristiques avec des fournisseurs uniques et multiples. Pour s'attaquer aux plusieurs objectifs dans la gestion d'une chaîne d'approvisionnement, la relation entre les fournisseurs et les systèmes de productions, ainsi que la répartition des commandes a été étudiée par Chung (2004) en utilisant une approche de programmation, en déterminant les quantités économiques à commander qui doivent être placés avec plusieurs fournisseurs. Plusieurs recherches ont tenté de trouver une stratégie de contrôle optimale dans un contexte dynamique et stochastique, qui mène aux objectifs tracés par les entreprises (Zhang et al., 1996 et Lee et al., 2001). De leurs

parts, Hajji et al. (2009) ont étudié les stratégies de contrôle de la production, de l'approvisionnement et de sélection de fournisseurs dans un contexte d'un système manufacturier dynamique et stochastique. Ils ont élaboré une formulation dynamique du problème, tout en démontrant la robustesse des politiques qu'ils ont développées, qui englobent la production et les activités d'approvisionnements. Une extension de cette dernière étude, incluant de multiples fournisseurs avec des délais de livraison, a été faite par Hajji et al.(2011). Ils se sont basés sur la détermination du nombre optimal de fournisseurs, le point de commande, la quantité totale de la commande et sa répartition entre les fournisseurs. La stratégie qu'ils ont développée démontre une économie sur le coût total par rapport à celui encourus par un seul fournisseur. Leur analyse démontre qu'il est toujours préférable d'avoir des fournisseurs multiples qu'un seul.

4.1 Notation et formulation du problème

4.1.1 Notation

La notation suivante sera utilisée tout au long de ce chapitre.

| | |
|--------------|---|
| $x(t)$ | : Niveau d'inventaire de la matière première |
| $y(t)$ | : Niveau d'inventaire (ou de pénurie) du produit fini |
| dem | : Taux de la demande réelle |
| u | : Taux de production |
| U_{max} | : Taux maximum de production |
| S | : Stock de sécurité de la matière première |
| $Q_i^j(.)$ | : Quantité à commander i du fournisseur j |
| Z_1 | : Seuil critique de production (HPP) |
| θ_i | : Instant de lancement de commande du lot i de matière première |
| δ^j | : Délai entre la commande et la réception d'un lot du fournisseur j |
| C_{unit}^j | : Coût unitaire de la matière première du fournisseur j |
| C_{com} | : Coût de passation de commande |

- C_0^+ : Coût unitaire d'inventaire de la matière première
 C_1^+ : Coût unitaire d'inventaire du produit fini
 C_1^- : Coût unitaire de la pénurie
 C_{prod} : Coût unitaire de production
 C_{rej} : Coût unitaire de rejet
 p^j : Qualité effective du fournisseur j
 P_a^j : Probabilité d'acceptation du fournisseur j
 C_{cq} : Coût unitaire de contrôle de la qualité
 τ_{cq} : Durée de contrôle de la qualité

4.1.2 Formulation du problème

Le système manufacturier étudié est composé d'une installation qui fabrique un seul type de produit pour faire face à une demande constante. Cette installation est sujette à des pannes et des réparations aléatoires. L'approvisionnement en matière première se fait par plusieurs fournisseurs non-fiables. Chaque fournisseurs est caractérisé par un délai de livraison aléatoire δ^j , une probabilité d'acceptation P_a^j et une qualité effective p^j connue. La structure du système manufacturier étudié est décrite par la figure 4.1.

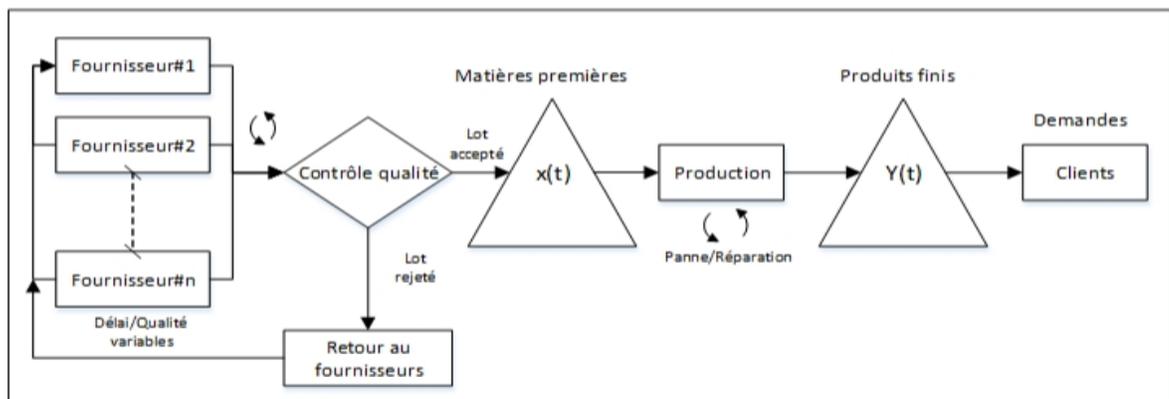


Figure 4. 1 Structure du système avec la politique de sélection de fournisseurs

À la réception d'un lot du fournisseur j , une technique statistique de contrôle de la qualité par un plan d'échantillonnage simple (1.2.1) est appliquée pour statuer sur son acceptation ou son rejet. Le lot rejeté est retourné au fournisseur pour être remplacé. On assume que le délai du retour est égal à celui de la livraison. Le fait de présence d'un taux d'items défectueux connu désigné par la qualité effective, une rétroactivité sur la demande est faite afin d'avoir une demande réelle égale à : $d/(1 - p^j)$.

Vu l'aspect stochastique du système en étude, nous avons modélisé son état par trois composantes : ① Le niveau de surplus cumulatif (inventaire si positif et pénurie si négatif) mesuré par (t) , ayant une nature continue dans le temps. ② Le niveau d'inventaire continu à l'instant t de la matière première mesurée par $x(t)$ qui détermine la quantité des lots acceptés après un échantillonnage simple. Les lots qui sont rejetés sont retournés au fournisseur pour être remplacés. Cet inventaire fait face en aval à une demande continue suivant un taux de production u et en amont à plusieurs fournisseurs non-fiables, ou Q_i^j est la quantité du lot i de matière première commander à l'instant θ_i du fournisseur j et reçu à l'instant $\theta_i + \delta^j$. La mise en inventaire du lot i accepté est faite à l'instant $\theta_i + \delta^j + n \times \tau_{cq}$. Même si le système manufacturier est disponible, la production ne pourra se faire si $x(t)$ est égal à zéro, avec $0 \leq x(t) \leq L$ la contrainte maximale de la capacité de stockage de la matière première. ③ La composante discrète $\alpha(t)$, décrit l'état du système de production en utilisant des variables aléatoires. On définit par $\alpha(t)$ l'état du système de production tel que :

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1 & \text{le système de production est disponible} \\ 2 & \text{le système de production est non disponible} \end{cases}$$

Pour le système considéré l'espace d'état est donnée par (x, y, α) avec :

$$x(t) \in [0, L]; y(t) \in R; \alpha(t) \in M = \{1, 2\}$$

La dynamique des niveaux d'inventaires $x(t)$ et $y(t)$ est donnée par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = u(t, \alpha) - \frac{d}{(1-p^j)}, y(0) = y, \forall t \geq 0 \\ \dot{x}(t) = -u(t, \alpha), x(0) = x, \forall t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[\\ x((\theta_i + \delta^j + n\tau_{cq})^+) = x((\theta_i + \delta^j + n\tau_{cq})^-) + Q_i^j(\alpha) \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec : $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, n$

Notons que x et y désignent respectivement le niveau initial de l'inventaire de la matière première et du produit fini. $(\theta_i + \delta^j + n \times \tau_{cq})^+$ et $(\theta_i + \delta^j + n \times \tau_{cq})^-$ sont les limites positive et négative de l'instant de mise en inventaire du lot i , et N est le nombre de commandes reçues sur l'ensemble de l'horizon.

Le taux de production et la quantité de matière première à commander doivent satisfaire les contraintes de capacité de production et d'approvisionnement données par :

$$\begin{cases} 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \\ 0 \leq x(\theta_i + \delta^j + n\tau_{cq}) + Q_i^j(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4.2)$$

Avec , n le nombre de fournisseurs.

Nos variables de décision sont le taux de production $u(\cdot)$ et la séquence de sélection de fournisseurs que nous notons : $\Omega = \left\{ \left(\theta_i, \lambda(i), Q_i^{\lambda(i)} \right), \dots \right\}, i = 1, \dots, N, \lambda(i) = 1, \dots, n$.

En tenant compte de (4.2), l'ensemble des décisions admissibles est présenté par :

$$A(\alpha) = \begin{cases} (\Omega, u(t)), \quad 0 \leq u(t, \alpha) \leq U_{max} \\ 0 \leq x(\theta_i + \delta^j + n\tau_{cq}) + Q_i^j(t) \leq L, \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (4.3)$$

La fonction du coût instantané qui pénalise le maintien en stock de la matière première, de l'inventaire du produit fini (pénurie) et du taux de production est défini par $g(\cdot)$ tel que :

$$g(x(t), y(t), u(t, \alpha)) = C_0^+ \cdot x + C_1^+ \cdot y^+ + C_1^- \cdot y^- + C_{prod} \cdot u(\cdot) + C_{rej} \cdot p^j Q_i^j \quad (4.4)$$

avec : $t \in]\theta_i, \theta_{i+1}[$

La fonction instantanée des coûts d'approvisionnement (commande et prix unitaire) et de contrôle de la qualité des lots de la matière première est donnée par :

$$R(Q_i^\lambda, \lambda, \alpha) = C_{com} \text{Ind}\{t = \theta_i\} + C_{unit}^j \cdot Q_i^\lambda + \text{Ind}\{t = \theta_i + \delta^j\} C_{cq}^j \cdot n \quad (4.5)$$

$$+ E_\alpha \int_0^{\delta^\lambda} e^{-\rho t} g(x - u(t, \alpha), y + u(t, \alpha) - \frac{d}{(1-p^i)} t, u(t, \alpha)) dt.$$

En utilisant (4.4) et (4.5), le coût total $J(\cdot)$ est défini par :

$$J(\cdot) = E \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} g(x, y, u) dt + \sum_{k=0}^\infty e^{-\rho \theta_k} \left(C_{com}^{\lambda(k)} + C_{unit}^{\lambda(k)} \cdot Q_k^{\lambda(k)} + C_{cq}^k \cdot n \right) \right] \quad (4.6)$$

Le problème de la planification de production considérée consiste à établir une politique de commande admissible (Ω^*, u^*) qui minimisera le coût moyen total $J(\cdot)$ actualisé donné par l'équation (4.6), tout en respectant les contraintes des équations et les inégalités (4.1)-(4.3). Cette politique est une rétroaction qui détermine le taux de production et la politique d'approvisionnement en fonction de l'état du système. La fonction valeur du problème d'optimisation est décrite par la fonction suivante :

$$v(x, y, \alpha) = \min_{(\Omega, u) \in A} J \left(x, y, u, \theta_k, \lambda, Q_k^{\lambda(k)}, \alpha \right) \quad (4.7)$$

Du fait de la complexité de ce système de production, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique, afin de proposer une structure de politique de commande combinant simultanément la planification de la production, de l'approvisionnement et la sélection des fournisseurs pour le système étudié.

4.1.3 Politique de commande

Afin de proposer une politique de commande pour notre problématique, nous nous sommes inspirés de la revue de littérature sur l'ordonnement de n commandes sur une seule machine, précisément sur la règle de Smith (Weighted Shortest Processing Time (WSPT)). Cette dernière stipule que lorsqu'une machine est disponible, la commande ayant le plus grand ratio du poids noté w_j sur son temps d'opération noté p_j est sélectionnée. Cette règle permet de minimiser la somme totale pondérée du temps d'opération noté: $\sum w_j C_j$. Nous proposons deux pondérations, la première que nous avons noté CDQ_j qui combine le coût d'acquisition unitaire, le délai de livraison, et la qualité (probabilité d'acceptation), et la deuxième que nous avons noté DQ_j qui combine le délai de livraison et la qualité effective de chaque fournisseur. Le minimum de ces pondérations, ainsi que les niveaux d'inventaires de la matière première et des produits finis seront notre décision qui détermine le fournisseur à sélectionner. Nous avons formulé la première pondération comme suit :

$$CDQ^j = \frac{C_A^j * \delta^j}{P_a^j} ; j = 1, \dots, n$$

Sachant que le coût d'acquisition C_A est donné par :

$$C_A = C_{unit} + \frac{C_{com}}{Q}$$

Cette équation nous permet de minimiser le produit du coût d'acquisition unitaire et du délai de livraison, et de maximiser la qualité (probabilité d'acceptation). Nous utiliserons cette pondération lorsque le niveau de l'inventaire de la matière première est inférieur ou égal au seuil de sécurité ($x(t) \leq S$) et que le niveau de l'inventaire du produit fini est supérieur au seuil de sélection ($y(t) \geq Z_2$). Cette pondération permet de minimiser les paramètres qui

caractérisent chaque fournisseur. Lorsque le seuil Z_2 n'est pas franchi, nous sélectionnerons le fournisseur qui présente un CDQ le plus petit.

La deuxième pondération est donnée par :

$$DQ^j = \delta^j \cdot [1 + (1 - p^j) + (1 - p^j)^2 + (1 - p^j)^3 + (1 - p^j)^4 \dots \dots \dots]$$

Nous l'utilisons que lorsque le niveau de l'inventaire de la matière première est inférieur ou égal au seuil de sécurité ($x(t) \leq S$) et que le niveau de l'inventaire du produit fini est inférieur au seuil de sélection ($y(t) < Z_2$). Cette pondération nous permet de faire une sélection entre les différents fournisseurs selon le délai de livraison le plus court, mais en même temps elle nous protège contre le fait de toujours choisir un fournisseur dont la qualité effective est la plus mauvaise. Effectivement, lorsque le seuil Z_2 est franchi et pour minimiser le risque de tombé en pénurie, la sélection du fournisseur j se fait selon le minimum de DQ^j , à chaque itération la valeur de cette dernière va augmenter avec l'augmentation du nombre de retours des lots rejetés ce qui nous permet de passer à la sélection d'un autre fournisseur, du fait que sa pondération DQ devient le minimum.

Nous avons formulé la politique de commande par :

- Politique de production :

$$u(x, y, \alpha) = \begin{cases} U_{max} & \text{si } y < Z_1 \\ dem & \text{si } y = Z_1 \\ 0 & \text{si } y > Z_1 \end{cases} \quad (4.8)$$

- Politique de l'approvisionnement :

$$\Omega^\lambda(x, u, \alpha) = \begin{cases} Q(x, y) & \text{si } x \leq S \\ 0 & \text{si } x > S \end{cases} \quad (4.9)$$

Sous les contraintes suivantes : $Z_1 \geq 0$; $S < Q < L$; $S \geq 0$

- Politique de choix de fournisseurs :

$$\lambda(x, y) = \begin{cases} \text{Min } CDQ^j & \text{Si } x(t) \leq S \text{ et } y(t) \geq Z_2 \\ \text{Min } DQ^j & \text{Si } x(t) \leq S \text{ et } y(t) < Z_2 \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (4.10)$$

Sachant que : $Z_2 = Z_1 * a ; a \in]0,1] ; j = 1, \dots, n.$

4.2 Approche de résolution expérimentale basée sur la simulation

Vu la complexité à trouver une solution à la formulation analytique du problème de commande du système à l'étude et afin de déterminer les conditions optimales qui régissent notre politique de production, nous utiliserons l'approche de résolution expérimentale basée sur la simulation qui a été proposée par Gharbi et Kenné (2000) selon les étapes suivantes :

❖ Étape 1 : Formulation analytique du problème

Afin de comprendre la dynamique du système de production en fonction de ces états et de définir l'expression du coût total moyen prévu, nous avons élaboré une formulation analytique du problème comme indiqué dans la section 4.1.2.

❖ Étape 2 : Politique de commande

En utilisant les arguments théoriques que l'on retrouve dans la revue de littérature, nous avons formulé une politique de commande (section 4.1.3), qui est utilisée pour déterminer les facteurs de conception pour notre modèle de simulation.

❖ Étape 3 : Le modèle de simulation

La modélisation du système est réalisée à partir de modèles de simulation combinés discrets/continus. Le modèle de simulation utilise l'étape 2 comme entrée et la

programmation dynamique stochastique pour décrire et évaluer la performance du système. La variable de sortie est le coût total encouru.

❖ Étape 4 : Plans d'expériences et méthodologie de surface de réponse

Les plans d'expérience définie par la variation des facteurs de contrôle, leurs interactions et leurs effets significatifs sur la variable de réponse (coût total) par l'analyse de variance (ANOVA). La méthodologie de surface de réponse permet l'optimisation du modèle obtenu qui minimise le coût total.

4.2.1 Modèle de simulation

Afin de reproduire fidèlement le comportement du système de production sous les conditions réelles d'opération, nous avons développé notre modèle de simulation avec une combinaison de modèles discrets/continus en utilisant le langage de simulation SIMAN avec des sous-programmes en langage C++ (Pegden et al., 1995). La partie continue est utilisée pour le calcul des niveaux instantanés des inventaires des matières premières et des produits finis. La partie discrète modélise la planification de la production, la rupture des stocks et l'occurrence des pannes et des réparations. Le choix de l'utilisation des modèles combinés discrets-continus permet de raccourcir le temps de simulation comparativement aux modèles purement discrets (Lavoie et al., 2007). Le diagramme du modèle de simulation est présenté par la figure 4.2.

- Bloc ① : Initialisation

Il initialise les variables du modèle telles que les valeurs de décisions (le taux de la demande, les taux de production, etc.), ainsi que les temps moyens inter pannes/réparations, la distribution de probabilité des délais de livraison, d'acceptation et de la qualité effective des différents fournisseurs. Ainsi que le temps de simulation T_{∞} et les pas d'avancement dans le temps pour l'intégration des variables cumulatives.

- Bloc ② : Politiques de commande de production et de sélection de fournisseurs

Il permet de fixer selon la loi de commande (4-8)-(4.10), le taux de production, de passation de commande et de sélection de fournisseurs en fonction des variations des stocks de la matière première et du produit finis, cette variation est détectée avec le bloc Détection ⑨.

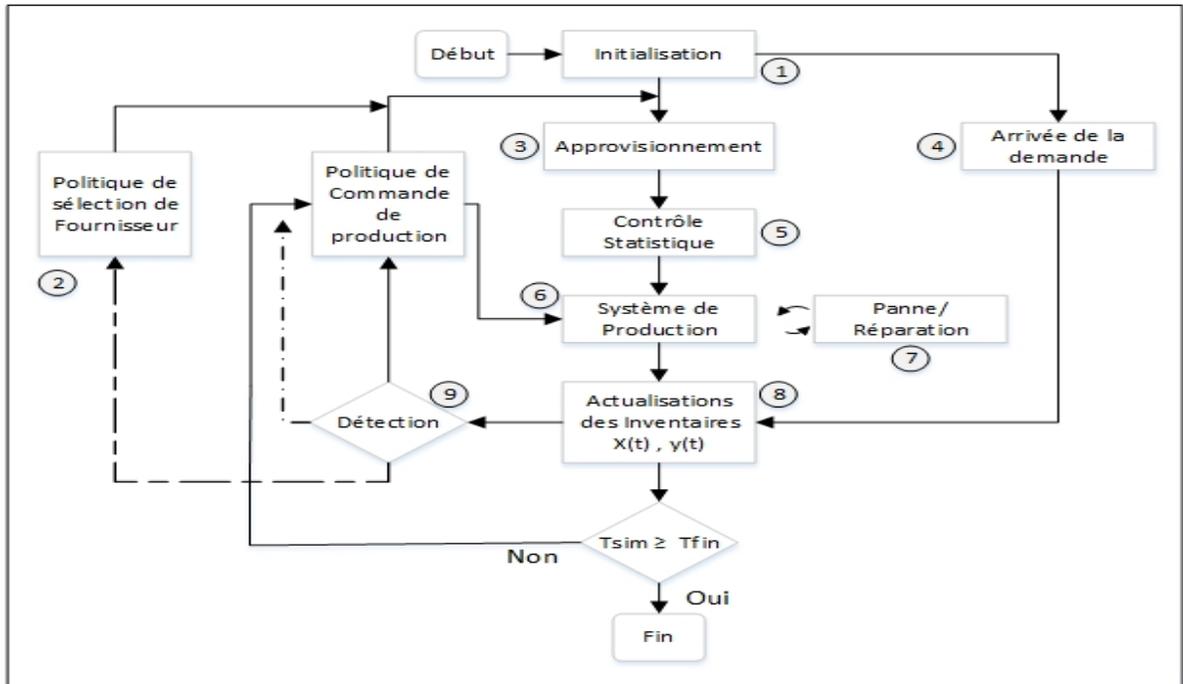


Figure 4. 2 Diagramme du modèle de simulation

- Bloc ③ : Approvisionnement

Il est utilisé pour modéliser l'approvisionnement fait par le fournisseur et agit directement sur les délais aléatoires des livraisons.

- Bloc ④ : Arrivée de la demande

Le taux de demande est constant est illustré comme bloc à part pour faciliter la compréhension. Il est utilisé comme intrant dans les équations d'état défini dans le sous-programme en langage C++. Il agit directement sur le niveau d'inventaire des produits finis à chaque instant t .

- Bloc ⑤ : Contrôle statistique

Il détermine si le lot de la matière première livré est accepté suite au plan d'échantillonnage simple. Sinon il se réfère directement à la loi de commande pour le choix de politique de retour au fournisseur.

- Bloc ⑥ : Système de production

Il représente la dynamique du système de production en termes de disponibilité de l'installation et taux de production. Il agit directement sur l'actualisation des niveaux d'inventaires (Bloc ⑧).

- Bloc ⑦ : Panne et réparation

Il échantillonne les temps des pannes et des réparations pour le système de production à partir de leurs distributions de probabilité respectives. Les états de fonctionnement du système de production sont incorporés dans les équations d'état par le biais des processus stochastiques, afin de contrôler les niveaux d'inventaires en temps réel.

- Bloc ⑧ : Actualisations des inventaires

Il permet la mise à jour des niveaux des stocks et des variables cumulatives. Les variables cumulatives sont intégrées en utilisant la méthode Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) qui garantit une précision constante, comme mentionnée dans Pegden et al. (1995). Les paramètres minimaux et maximaux d'avancement dans le temps sont choisis pour garantir une haute précision.

- Bloc ⑨ : Détection

Il contrôle en continu les seuils des inventaires et à la détection de l'atteinte d'un seuil il transmet des signaux au bloc ② pour qu'il ajuste les taux de production, de commande et de sélection de fournisseurs. La simulation se termine lorsque le temps de simulation actuel T_{sim} atteint la durée de la simulation définie T_{fin} .

4.2.2 Validation du modèle de simulation

Afin de valider le modèle de simulation équivalent, nous vérifions graphiquement les trajectoires du taux de production $u(\cdot)$, la position d'inventaire de la matière première $x(\cdot)$, la position d'inventaire des produits finis $y(\cdot)$, ainsi que la disponibilité du système de production et la stratégie de sélection entre trois fournisseurs selon la loi de commande proposée. La simulation du système est réalisée pour $S = 55$, $Q = 513$, $Z_1 = 443$ et $Z_2 = 398$. La figure 4.3 illustre les trajectoires durant l'exécution de la simulation. Le tableau 4.1 représente les valeurs des pondérations CDQ_j et DQ_j , $j = \{1,2,3\}$, calculées durant la simulation pour justifier notre politique de choix entre les trois fournisseurs.

Tableau 4.1 Valeurs des pondérations pour la politique de sélection entre trois fournisseurs

| Cas | Fournisseur #1 | | Fournisseur #2 | | Fournisseur #3 | | Politique | Fournisseur choisi |
|-----|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|-------------|--------------------|
| | CDQ^1 | DQ^1 | CDQ^2 | DQ^2 | CDQ^3 | DQ^3 | | |
| ② | 2,31 | 1,2 | 2,52 | 1,1 | 2,73 | 1 | $Min CDQ^j$ | Fournisseur#1 |
| ④ | 2,31 | 2,92 | 2,52 | 1,1 | 2,73 | 1 | $Min DQ^j$ | Fournisseur#3 |
| ⑥ | 2,31 | 3,14 | 2,52 | 1,1 | 2,73 | 1 | $Min CDQ^j$ | Fournisseur#1 |
| ⑧ | 2,31 | 3,23 | 2,52 | 1,1 | 2,73 | 1 | $Min DQ^j$ | Fournisseur#3 |
| ⑩ | 2,31 | 3,23 | 2,52 | 2,2 | 2,73 | 2,43 | $Min DQ^j$ | Fournisseur#2 |
| ⑫ | 2,31 | 3,23 | 2,52 | 2,2 | 2,73 | 2,43 | $Min CDQ^j$ | Fournisseur#1 |

D'après la figure 4.3 et en se basant sur le tableau 4.1, lorsque le niveau d'inventaire des matières premières $x(t)$ atteint le seuil de sécurité S une commande est lancée ①, le fournisseur #1 est sélectionné selon le $Min CDQ^j$ ②, puisque le niveau d'inventaire des produits finis $y(t)$ est encore supérieur au seuil Z_2 . Suite à une panne/réparation et au rejet du lot réceptionné à la dernière commande, l'inventaire du produit fini $y(t)$ dépasse le seuil Z_2 ③, ce qui implique la sélection du fournisseur #3 selon le $Min DQ^j$ ④. Après les délais de livraison et de contrôle par plan d'échantillonnage, le lot est accepté et ajouté à l'inventaire. Le taux de production est augmenté à U_{max} afin d'atteindre le seuil critique de

production Z_1 (20), puis il est diminué au taux réel de la demande (18). Le niveau de l'inventaire $x(t)$ décline (19) jusqu'au dépassement du seuil de sécurité (5). Le niveau de l'inventaire $y(t)$ étant supérieur à Z_2 , le fournisseur#1 est choisi (6). Les délais de livraison, de contrôle, ainsi que le rejet du lot commandé entraînent une rupture du stock des matières premières (7), à cet instant le taux de production est nul et la machine est disponible. Le niveau d'inventaire $y(t)$ continu à diminuer dû au taux constant de la demande. Lorsque le seuil Z_2 est atteint et afin d'éviter une rupture du stock le système réagit en choisissant le fournisseur #3 puis le fournisseur #2 (8). Le lot réceptionné du fournisseur #2 étant accepté, le taux de production est augmenté à son niveau maximum pour rétablir le seuil critique de production. Lors d'une panne (14), le taux de production tombe à zéro, le niveau de l'inventaire $x(t)$ reste constant et celui de $y(t)$ diminue. Les mêmes remarques sont faites pour (9)(10), (11)(12) et (15)(16). Après cette analyse on peut conclure que notre modèle représente fidèlement la politique de commande proposée.

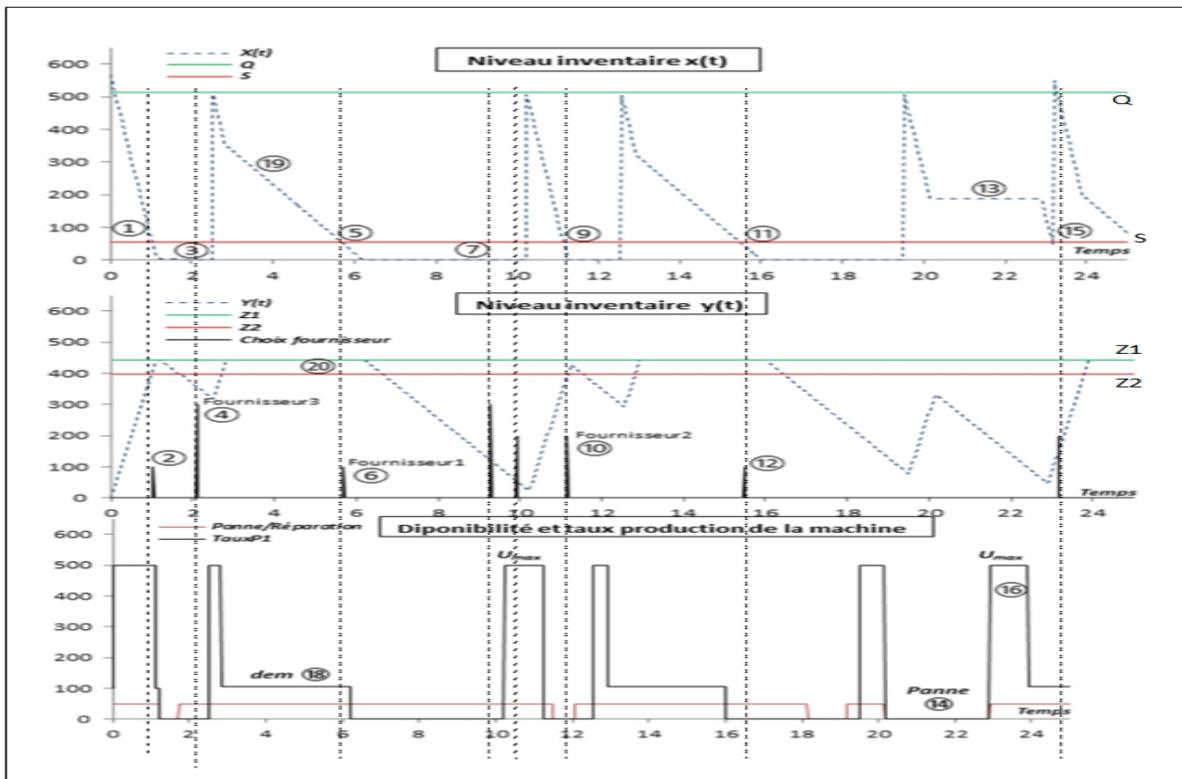


Figure 4. 3 Dynamique des inventaires et du taux de production

4.2.3 Plan d'expérience et méthodologie de surface de réponse

Cette démarche vise à trouver la relation entre les facteurs d'entrée (S^*, Q^*, Z_1^*, a^*) ainsi que leurs interactions qui ont un effet significatif sur la variable de sortie qui est la réponse du système (c.-à-d. Coût total). Les valeurs optimales de la politique de commande doivent minimiser le coût total en tenant compte des contraintes énoncées dans (4.8)-(4.10). Les différentes valeurs que nous avons choisies pour la fonction coût (4.6) ont été inspirées de la littérature dans le domaine de la commande optimale. Les tableaux 4.2 et 4.3 résument respectivement les paramètres choisis pour la fonction coût et ceux pour la simulation.

Tableau 4. 2 Paramètres de coût du système

| | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|------------|-----------|
| Paramètres | C_0^+ | C_1^+ | C_1^- | C_{prod} | C_{com} |
| Valeurs | 1 | 1 | 60 | 0,25 | 100 |
| Paramètres | C_{unit}^1 | C_{unit}^2 | C_{unit}^3 | C_{cq} | C_{rej} |
| Valeurs | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 5 | 10 |

Tableau 4. 3 Paramètres de simulation du système

| | Fournisseur#1 | | | Fournisseur#2 | | | Fournisseur#3 | | |
|-------------------|---------------|-------|---------|---------------|-------|---------|---------------|-------|---------|
| Paramètres | δ^1 | p^1 | P_a^1 | δ^2 | p^2 | P_a^2 | δ^3 | p^3 | P_a^3 |
| Valeurs | 1,3 | 1% | 99,65% | 1,1 | 2,5% | 89,45% | 0,9 | 3% | 82,03% |

En nous basant sur le travail de Gharbi et Kenné (2003), nous supposons que la fonction valeur (4.7) est convexe. Nous avons effectué les expériences de simulation à partir d'un plan d'expériences complet de quatre facteurs à trois modalités 3^4 , avec un facteur bloc qui représente la génération des nombres aléatoires. Cinq répliques ont été effectuées pour chaque combinaison des facteurs (S, Q, Z_1, a), totalisant 405 ($3^4 \times 5$) simulations d'une durée de $T_{sim} = 500.000$ unités de temps pour chaque une d'elles. L'ordre des expériences a été entièrement randomisé pour nous protéger contre les effets des variables perturbatrices. Suite à plusieurs tests de simulation, les limites de variation des variables indépendantes

(S, Q, Z_1, a) ont été fixées afin de centrer la région optimale de la réponse (Coût), elles sont présentées dans le tableau 4.4.

Tableau 4. 4 Niveaux des variables indépendantes

| Facteurs | Limite inférieure | Point centre | Limite supérieure |
|----------|-------------------|--------------|-------------------|
| S | 10 | 110 | 210 |
| Q | 450 | 700 | 950 |
| Z_1 | 350 | 500 | 650 |
| a | 0.01 | 0.5 | 0.99 |

Une analyse de variance multifactorielle (ANOVA) a été effectuée sur les données de la simulation en utilisant le logiciel de statistiques Statgraphics. Les interactions et les effets quadratiques des variables indépendantes (S, Q, Z_1, a) sur la variable de réponse (Coût) sont présentés par le graphique de Pareto standardisé sur la figure 4.4.

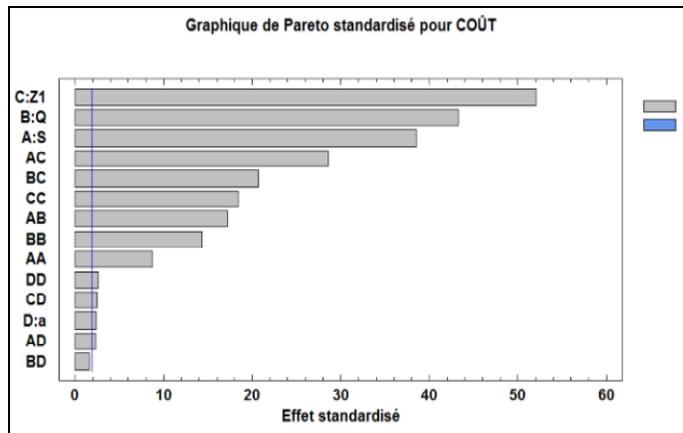


Figure 4. 4 Graphique de Pareto pour la politique

Selon le coefficient de corrélation ajustée (R^2); présentés dans le tableau 4.5; plus de 95 % de la variabilité observée du coût prévu est expliquée par le modèle de réponse de simulation (Montgomery, 2008). Dans la dernière colonne, les effets ont des probabilités inférieures à 0,05 ce qui indique qu'ils sont significativement différents de zéro au niveau de confiance de 95,0 %. Une analyse de la normalité des résidus et de l'homogénéité de la variance a été également effectuée pour vérifier la conformité du modèle. La surface de réponse équivalente à cette fonction est présentée dans la figure 4.5.

Tableau 4. 5 Analyse de variance pour le coût total

| Source | Somme des carrés | DDL | Moyenne quadratique | Rapport F | Proba. |
|---------------|------------------|-----|---------------------|-----------|--------|
| A:S | 646409, | 1 | 646409, | 1487,15 | 0,0000 |
| B:Q | 813893, | 1 | 813893, | 1872,47 | 0,0000 |
| C:Z1 | 1,17955E6 | 1 | 1,17955E6 | 2713,72 | 0,0000 |
| D:a | 2545,34 | 1 | 2545,34 | 5,86 | 0,0160 |
| AA | 33113,6 | 1 | 33113,6 | 76,18 | 0,0000 |
| AB | 129015, | 1 | 129015, | 296,82 | 0,0000 |
| AC | 354312, | 1 | 354312, | 815,14 | 0,0000 |
| AD | 2332,8 | 1 | 2332,8 | 5,37 | 0,0210 |
| BB | 89071,6 | 1 | 89071,6 | 204,92 | 0,0000 |
| BC | 185923, | 1 | 185923, | 427,74 | 0,0000 |
| BD | 1125,0 | 1 | 1125,0 | 2,59 | 0,1085 |
| CC | 147488, | 1 | 147488, | 339,31 | 0,0000 |
| CD | 2622,05 | 1 | 2622,05 | 6,03 | 0,0145 |
| DD | 3031,47 | 1 | 3031,47 | 6,97 | 0,0086 |
| blocs | 383,64 | 4 | 95,9099 | 0,22 | 0,9269 |
| Erreur totale | 167780, | 386 | 434,663 | | |
| Total (corr.) | 3,7586E6 | 404 | | | |

R-carré = 95,5361 pourcent(s)
R-carré (ajusté pour les ddl) = 95,3279 pourcent(s)

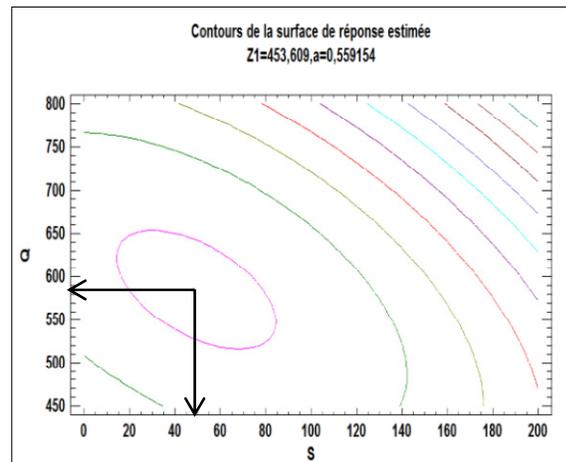


Figure 4. 5 Surface de réponse du coût total

D'après Statgraphics, la fonction de surface de réponse des variables dépendantes du système est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
COÛT = & 1859,78 - 2,19794.S - 1,04159.Q - 2,30978.Z_1 - 66,237.a \quad (4.11) \\
& + 1,98.10^{-3}.S^2 + 1,7.10^{-3}.S.Q + 2,95.10^{-3}.S.Z_1 + 73,46.10^{-2}.S.a \\
& + 5,03.10^{-3}.Q^2 + 8,57.10^{-3}.Q.Z_1 + 20,04.10^{-2}.Q.a + 1,79.10^{-3}.Z_1^2 \\
& + 5,19.10^{-3}.Z_1.a + 24,172.a^2
\end{aligned}$$

Le coût total minimum obtenu est égal à 958. Il correspond aux paramètres de commande optimaux : $S^* = 48$, $Q^* = 584$, $Z_1^* = 454$ et $a^* = 0.56$, donc : $Z_2^* = 255$.

4.2.4 Analyse de sensibilité

Nous procédons dans cette section à une analyse de sensibilité pour démontrer la robustesse de l'approche de résolution expérimentale et l'efficacité de la politique de commande étudiée. Pour cela, différentes combinaisons des paramètres du coût du système sont adoptées. Ces combinaisons de coûts sont dérivées du scénario de base et varient en augmentant et en diminuant leur valeur, un à la fois. Le tableau 4.6 résume la réaction de la politique de commande face à la variation des paramètres de coût du système.

- Variation de C_0^+ (scénarios 1 et 2)

Lorsque le coût d'inventaire de la matière première augmente, le coût total augmente. Le point de commande diminue, la quantité économique à commander, le seuil critique de production Z_1^* ainsi que celui de sélection Z_2^* augmentent. Dans le but de diminuer le coût d'inventaire de la matière première, le modèle réagit de façon à diminuer le seuil de lancement de commande pour donner plus de temps au système de production de faire la transformation de la matière première en produits finis et diminuer l'inventaire. La quantité économique à commander et le seuil de production sont augmentés afin d'éviter les pénuries. Le seuil de sélection Z_2^* est aussi augmenté pour éviter les ruptures des stocks, en faisant face aux délais de livraison lors d'un retour au fournisseur et à l'opération de contrôle. Le contraire se produit lorsque C_0^+ diminue.

- Variation de C_1^+ (scénarios 3 et 4)

Lorsque le coût d'inventaire du produit fini augmente, le coût total augmente. Le point de commande augmente, la quantité économique à commander, le seuil critique de production Z_1^* ainsi que celui de choix de politique Z_2^* diminuent. Dans le but de diminuer le coût d'inventaire, la quantité économique à commander et le seuil de production sont diminués, mais le seuil de lancement de commande est augmenté, afin de recevoir plus de lots mais à

quantité moindre pour faire face au taux de transformation. Le seuil de sélection Z_2^* est aussi diminué, afin de faire une sélection suivant la politique imposée. Le contraire est observé lorsque C_1^+ diminue.

- Variation de C_1^- (scénarios 5 et 6)

Lorsque le coût de pénurie augmente, le coût total augmente. La quantité économique à commander diminue, le point de commande et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) augmentent. Puisque le coût de pénurie est plus pénalisé, le système réagit en maintenant les trois seuils de sécurité (S^*, Z_1^*, Z_2^*) à un niveau élevé, afin d'éviter les ruptures du stock à cause des délais engendrés par la réduction de la production (panne/réparation), de contrôle par plan d'échantillonnage simple ou de retour au fournisseur. Le contraire arrive lorsque C_1^- diminue.

- Variation de C_{unit} (scénarios 7,8, 9,10, 11 et 12)

Lorsque le coût unitaire de la matière première augmente, le coût total augmente. La quantité économique à commander diminue, le point de commande et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) augmentent. Le système réagit en diminuant la quantité économique à commander, puisque la taille du lot influence directement le coût total. Le seuil de production est augmenté pour éviter les pénuries. Le contraire arrive lorsque C_{unit} diminue.

- Variation de C_{com} (scénarios 13 et 14)

Lorsque le coût de passation de commande augmente, le coût total augmente. Le point de commande diminue, la quantité économique à commander et les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*) augmentent. Le système réagit en commandant une quantité économique plus grande mais moins fréquemment, afin d'économiser sur le coût de commande. En parallèle il doit maintenir le seuil de production élevée afin d'éviter les pénuries lorsque le système de production devient non disponible. Le contraire se produit lorsque C_{com} diminue.

- Variation de C_{cq} (scénarios 15 et 16)

Lorsque le coût unitaire de contrôle de la qualité augmente, le coût total augmente. Les deux seuils (Z_1^*, Z_2^*), la quantité économique à commander augmentent et le point de commande diminue. Le système réagit en diminuant la quantité économique à commander et le nombre de commandes. La taille de l'échantillon à contrôler étant fixe pour le plan d'échantillonnage simple utilisé, le coût qui en découle donc reste fixe. Le fait que le nombre de commandes est moins fréquent la réaction du système assure la diminution du coût total. On observe le contraire lorsque C_{cq} est diminué.

- Variation de C_{rej} (scénarios 17 et 18)

Lorsque le coût d'inventaire du produit fini augmente, le coût total augmente. Le point de commande augmente, la quantité économique à commander, le seuil critique de production Z_1^* ainsi que celui de choix de politique Z_2^* diminuent. La variation du coût de rejet n'a aucun impact direct sur le coût total ni sur les paramètres optimaux, puisque le système réagit en prenant en charge une demande réelle en fonction de la qualité effective. La rétroactivité de notre système nous permet d'anticiper sur le taux de production pour assurer que le système ne tombe pas en rupture de stock. Le contraire arrive lorsque C_{rej} diminue.

- Variation de C_{prod} (scénarios 19 et 20)

Lorsque le coût de production augmente, le coût total augmente. Le point de commande augmente, la quantité économique à commander, le seuil critique de production Z_1^* ainsi que celui de choix de politique Z_2^* diminuent. Dans le but de diminuer le coût de production, la quantité économique à commander et le seuil de production sont diminués, mais le seuil de lancement de commande est augmenté afin de recevoir plus de lots pour faire face au taux de transformation.

L'analyse de sensibilité présentée dans cette section, montre bien que la politique de commande que nous proposons varie selon nos attentes.

Tableau 4. 6 Analyse de sensibilité de la politique de sélection de fournisseurs

| Scénarios | C_0^+ | C_1^+ | C_1^- | C_{unit}^1 | C_{unit}^2 | S^* | Q^* | Z_1^* | Z_2^* | Coût* | Effet |
|-------------|--------------|------------|-----------|--------------|--------------|-----------|------------|------------|------------|------------|--|
| Base | 1 | 1 | 60 | 0,5 | 0,8 | 48 | 585 | 455 | 255 | 958 | Cas de base |
| 1 | 0,9 | 1 | 60 | 0,5 | 0,8 | 99 | 543 | 405 | 213 | 932 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 2 | 1,1 | 1 | 60 | 0,5 | 0,8 | 14 | 622 | 496 | 290 | 979 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 3 | 1 | 0,9 | 60 | 0,5 | 0,8 | 12 | 587 | 514 | 288 | 915 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 4 | 1 | 1,1 | 60 | 0,5 | 0,8 | 92 | 582 | 391 | 217 | 996 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 5 | 1 | 1 | 50 | 0,5 | 0,8 | 24 | 596 | 424 | 229 | 929 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 6 | 1 | 1 | 70 | 0,5 | 0,8 | 64 | 570 | 477 | 278 | 979 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 7 | 1 | 1 | 60 | 0,4 | 0,8 | 46 | 586 | 454 | 237 | 948 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 8 | 1 | 1 | 60 | 0,6 | 0,8 | 52 | 583 | 456 | 279 | 967 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 9 | 1 | 1 | 60 | 0,5 | 0,7 | 47 | 586 | 454 | 235 | 956 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 10 | 1 | 1 | 60 | 0,5 | 0,9 | 49 | 583 | 457 | 305 | 959 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| Scénarios | C_{unit}^3 | C_{com} | C_{qt} | C_{rej} | C_{prod} | S^* | Q^* | Z_1^* | Z_2^* | Coût* | Effet |
| Base | 1,2 | 100 | 5 | 10 | 0,25 | 48 | 585 | 455 | 255 | 958 | Cas de base |
| 11 | 1,1 | 100 | 5 | 10 | 0,25 | 45 | 588 | 454 | 221 | 957 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 12 | 1,3 | 100 | 5 | 10 | 0,25 | 50 | 582 | 457 | 307 | 959 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 13 | 1,2 | 50 | 5 | 10 | 0,25 | 54 | 562 | 452 | 251 | 949 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 14 | 1,2 | 150 | 5 | 10 | 0,25 | 42 | 606 | 456 | 259 | 967 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 15 | 1,2 | 100 | 4 | 10 | 0,25 | 61 | 536 | 460 | 258 | 940 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 16 | 1,2 | 100 | 6 | 10 | 0,25 | 37 | 625 | 450 | 250 | 975 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |
| 17 | 1,2 | 100 | 5 | 9 | 0,25 | 48 | 585 | 455 | 255 | 958 | $(S, Q, Z_1, Z_2, CO\hat{U}T) \leftrightarrow$ |
| 18 | 1,2 | 100 | 5 | 11 | 0,25 | 48 | 585 | 455 | 255 | 958 | $(S, Q, Z_1, Z_2, CO\hat{U}T) \leftrightarrow$ |
| 19 | 1,2 | 100 | 5 | 10 | 0,1 | 45 | 590 | 459 | 262 | 955 | $S\downarrow, Q\uparrow, Z_1\uparrow, Z_2\uparrow, CO\hat{U}T\downarrow$ |
| 20 | 1,2 | 100 | 5 | 10 | 0,4 | 51 | 579 | 453 | 247 | 962 | $S\uparrow, Q\downarrow, Z_1\downarrow, Z_2\downarrow, CO\hat{U}T\uparrow$ |

4.3 Influence de la variation de la qualité, du délai et du coût unitaire

Dans cette section, nous faisons une analyse plus approfondie sur l'influence de la variation de la qualité effective, du délai de livraison et du coût unitaire sur le coût total de la politique de commande considérée dans ce chapitre. La structure du système étudié est présentée sur la figure 4.6

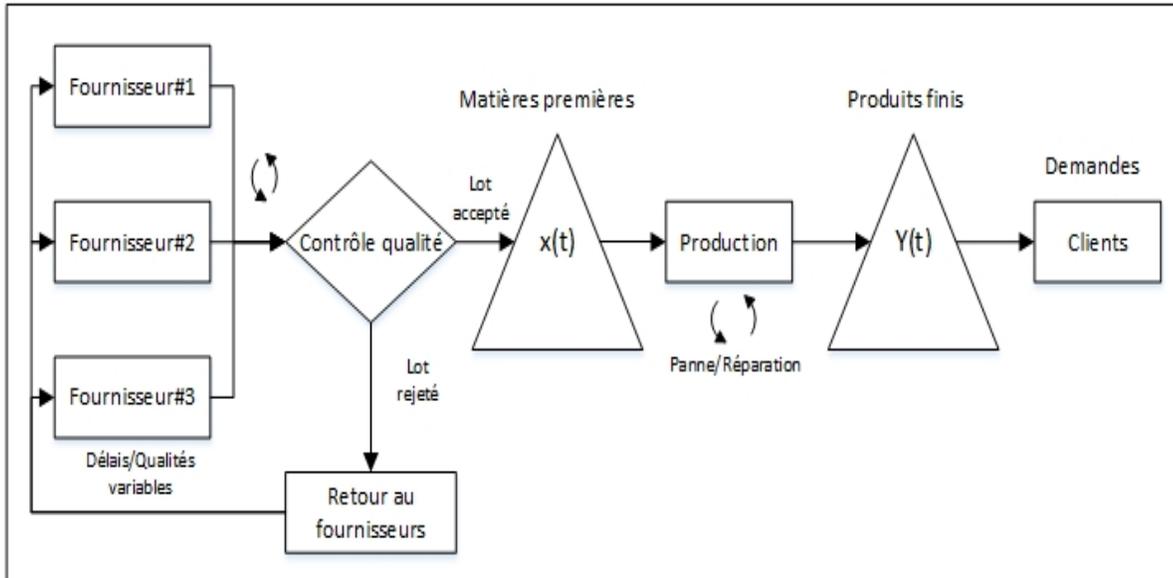


Figure 4. 6 Structure du système étudié avec trois fournisseurs

Nous avons appliqué ces variations sur différents cas d’approvisionnement avec un, deux, puis trois fournisseurs. Pour les cas de deux fournisseurs et plus, nous avons appliqué la politique de commande combinée à la sélection de fournisseurs, afin de déterminer si cette dernière est plus avantageuse, ainsi que pour valider le gain en terme de coût qu’elle présente. La méthode utilisée, consiste à fixer les valeurs d’un ou de deux fournisseurs selon le cas et de varier les valeurs de l’autre/autres. Nous avons étudié diverses combinaisons entre le fournisseur 1 et 2, le fournisseur 1 et 3 et l’ensemble des trois.

4.3.1 Influence de la variation de la qualité effective

Dans cette partie, nous avons fixé les valeurs de la qualité effective, du délai de livraison et du coût unitaire pour les fournisseurs 2 et 3 et nous avons varié les valeurs de la qualité effective du fournisseur 1 suivant le tableau 4.7.

Tableau 4. 7 Influence de la qualité effective sur la politique de commande

| | Qualité effective | Délai de livraison | Coût unitaire |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| Fournisseur#1 | 0,5 % - 3 % | 1,3 | 0,5 |
| Fournisseur#2 | 2,5 % | 1,1 | 0,8 |
| Fournisseur#3 | 3 % | 0,9 | 1,2 |

Le choix des valeurs rapproché pour ces paramètres est venu du faite que nous voulons avoir une représentation graphique avec des intersections entre les différentes courbes afin de pouvoir déterminer et visualiser les avantages de la politique de commande proposée.

4.3.1.1 Cas d'un seul fournisseur

La détérioration de la qualité effective entraine l'augmentation du coût total. La figure 4.6 nous renseigne sur les intervalles où le fournisseur1 est le plus avantageux que les autres. Lorsque la valeur de la qualité effective p est inférieure à 1,75%. Le coût total du fournisseur 1 est le moins cher (tableau 4.8), et lorsqu'elle dépasse 1,75 % les deux autres fournisseurs deviennent plus intéressants.

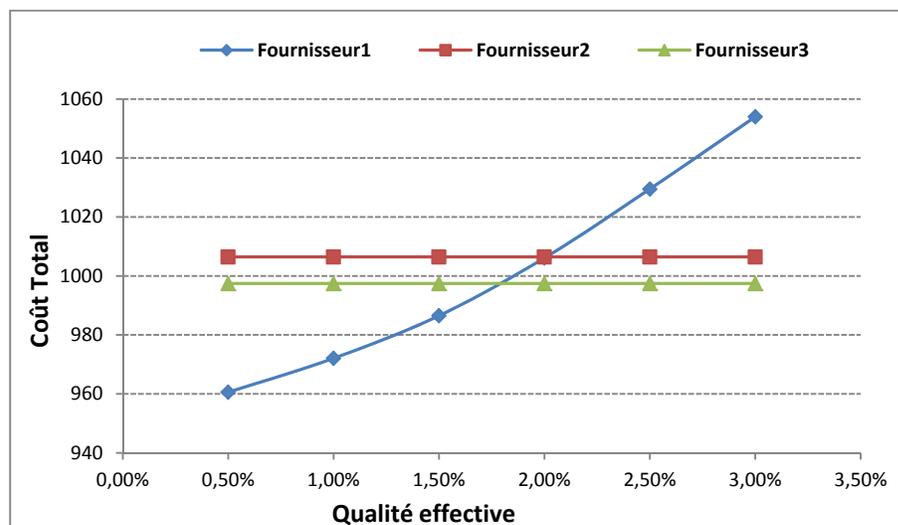


Figure 4. 7 Variation de p pour le cas du fournisseur 1

Tableau 4. 8 Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation de la qualité effective

| Qualités | Coût Total | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Fournisseur3 |
| 0,50 % | 960,54 | 1006,44 | 997,432 |
| 1,00 % | 972,07 | 1006,44 | 997,432 |
| 1,50 % | 986,51 | 1006,44 | 997,432 |
| 2,00 % | 1006,09 | 1006,44 | 997,432 |
| 2,50 % | 1029,49 | 1006,44 | 997,432 |
| 3,00 % | 1053,96 | 1006,44 | 997,432 |

4.3.1.2 Cas des fournisseurs 1 et 2

En appliquant la politique de commande sur ce cas, le coût total diminue pour toutes les variations de p . Sur la figure 4.7, on note que la valeur du coût total converge vers celle du fournisseur 2 puisque le système devient saturé et que Z_2 devient presque égales à Z_1 . Les minimums des valeurs de CDQ et DQ correspondent alors au fournisseur2.

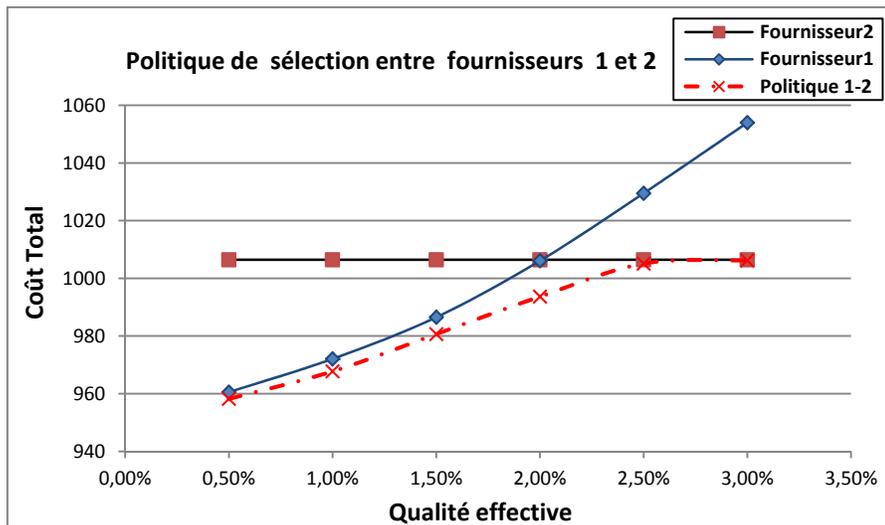


Figure 4. 8 Variation de p pour le cas des fournisseurs 1 et 2

Les valeurs du coût total pour chaque variation sont représentées dans le tableau 4.9, ainsi que les valeurs des gains qu'offre la politique proposée.

Tableau 4.9 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 2 avec variation de la qualité effective

| Qualités | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|----------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Politique 1-2 | Fournisseur1 | Fournisseur2 |
| 0,50 % | 960,54 | 1006,44 | 958,198 | 0,24 % | 4,79 % |
| 1,00 % | 972,07 | 1006,44 | 967,741 | 0,45 % | 3,85 % |
| 1,50 % | 986,51 | 1006,44 | 980,661 | 0,59 % | 2,56 % |
| 2,00 % | 1006,09 | 1006,44 | 993,665 | 1,23 % | 1,27 % |
| 2,50 % | 1029,49 | 1006,44 | 1005,112 | 2,37 % | 0,13 % |
| 3,00 % | 1053,96 | 1006,44 | 1006,200 | 4,53 % | 0,02 % |

4.3.1.3 Cas des fournisseurs 1 et 3

La même constatation est faite dans le cas de l'application de la politique de sélection entre les deux fournisseurs 1 et 3. Lorsque p dépasse le 2 %, la courbe du coût total avec la politique tend vers celle du fournisseur 3, comme présenté sur la figure 4.8.

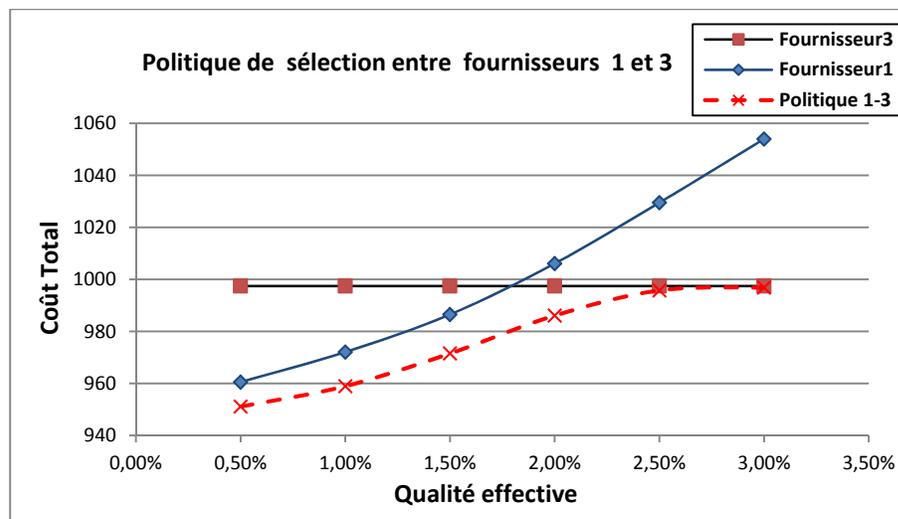


Figure 4.9 Variation de p pour le cas des fournisseurs 1 et 3

La politique de sélection entre deux fournisseurs nous permet d'avoir jusqu'à 5,42 % de gain par rapport à un seul. Comme le démontre le tableau 4.10 à chaque variation de p correspond un gain sur le coût total.

Tableau 4. 10 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 3 avec variation de la qualité effective

| Qualités | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|----------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur3 | Politique 1-3 | Fournisseur1 | Fournisseur3 |
| 0,50 % | 960,54 | 997,432 | 951,086 | 0,98 % | 4,65 % |
| 1,00 % | 972,07 | 997,432 | 958,948 | 1,35 % | 3,86 % |
| 1,50 % | 986,51 | 997,432 | 971,511 | 1,52 % | 2,60 % |
| 2,00 % | 1006,09 | 997,432 | 986,077 | 1,99 % | 1,14 % |
| 2,50 % | 1029,49 | 997,432 | 995,750 | 3,28 % | 0,17 % |
| 3,00 % | 1053,96 | 997,432 | 996,873 | 5,42 % | 0,06 % |

4.3.1.2 Cas de trois fournisseurs

L'ajout d'un troisième fournisseur dans notre sélection est davantage plus intéressant que de n'en avoir que deux (figure 4.9). La politique de sélection fait en sorte que le système réagit de façon à diminuer au maximum les pénuries, en permettant de passer d'un fournisseur à l'autre lors de la passation de commande ou de rejet d'un lot après un contrôle de la qualité.

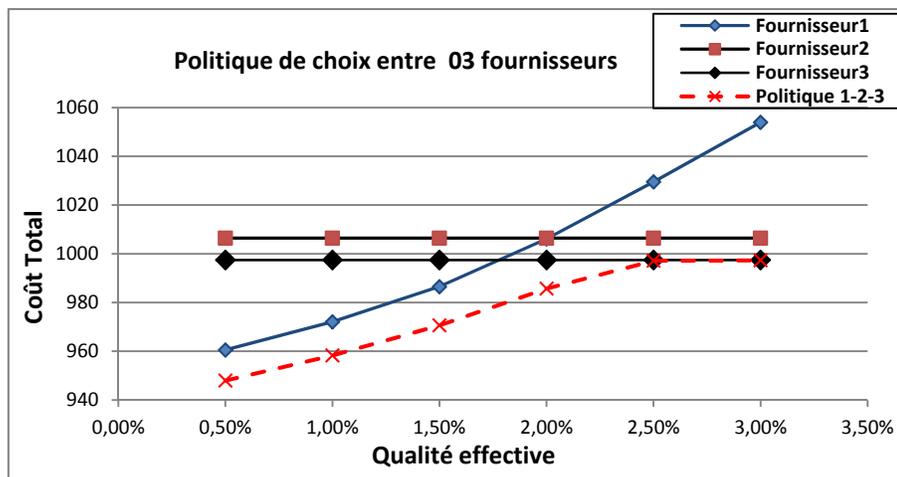


Figure 4. 10 Variation de p pour le cas de trois fournisseurs

La politique de sélection avec trois fournisseurs nous permet d'avoir un gain sur le coût total qui varie de 1 % à 5,38 % selon la variation de p , comme il est illustré sur le tableau 4.11.

Tableau 4. 11 Coût total et gain avec la politique de sélection de trois fournisseurs avec variation de la qualité effective

| Qualité | Fourn1 | Fourn2 | Fourn3 | Politique | Gain F1 | Gain F2 | Gain F3 |
|---------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| 0,50 % | 960,541 | 1006,44 | 997,432 | 947,964 | 1,31 % | 5,81 % | 4,96 % |
| 1,00 % | 972,073 | 1006,44 | 997,432 | 958,261 | 1,42 % | 4,79 % | 3,93 % |
| 1,50 % | 986,51 | 1006,44 | 997,432 | 970,611 | 1,61 % | 3,56 % | 2,69 % |
| 2,00 % | 1006,09 | 1006,44 | 997,432 | 985,691 | 2,03 % | 2,06 % | 1,18 % |
| 2,50 % | 1029,49 | 1006,44 | 997,432 | 997,132 | 3,14 % | 0,92 % | 0,03 % |
| 3,00 % | 1053,96 | 1006,44 | 997,432 | 997,308 | 5,38 % | 0,91 % | 0,01 % |

4.3.2 Influence de la variation du délai de livraison

Dans cette partie, nous avons fixé les valeurs de la qualité effective, du délai de livraison et du coût unitaire pour les fournisseurs 2 et 3 et nous avons varié les valeurs du délai de livraison du fournisseur 1 suivant le tableau 4.12.

Tableau 4. 12 Influence du délai de livraison sur la politique

| | Qualité effective | Délai de livraison | Coût unitaire |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Fournisseur#1 | 2 % | 1,1 – 1,7 | 0,3 |
| Fournisseur#2 | 1 % | 1,4 | 0,6 |
| Fournisseur#3 | 0,5 % | 1,5 | 0,8 |

4.3.2.1 Cas d'un seul fournisseur

L'augmentation du délai de livraison entraîne l'augmentation du coût total. La figure 4.10 nous renseigne sur les intervalles où le fournisseur 1 est le plus avantageux. Lorsque le délai de livraison ne dépasse pas 1,40 unité de temps, le coût total du fournisseur 1 est le moins

cher (tableau 4.13) et lorsqu'il le dépasse, les deux autres fournisseurs deviennent plus intéressants.

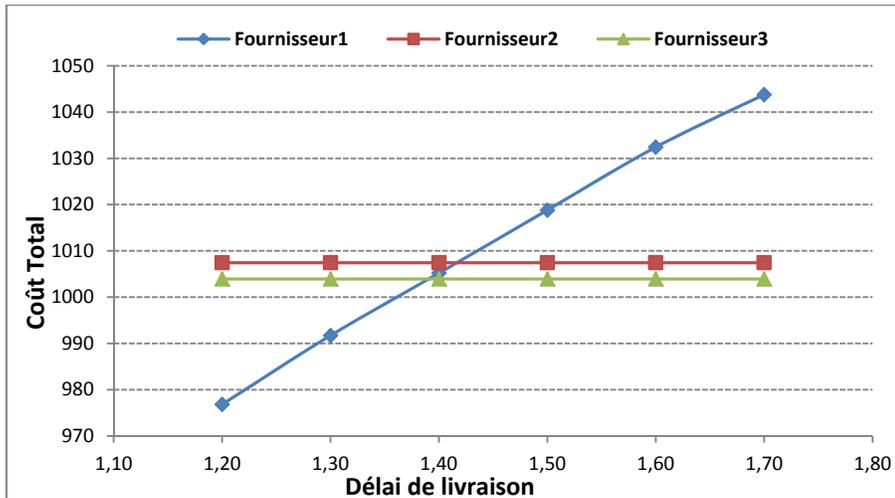


Figure 4. 11 Variation de D_l pour le cas du fournisseur 1

Tableau 4. 13 Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation du délai de livraison

| Délais | Coût Total | | |
|--------|--------------|--------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Fournisseur3 |
| 1,20 | 976,82 | 1007,43 | 1003,93 |
| 1,30 | 991,73 | 1007,43 | 1003,93 |
| 1,40 | 1005,26 | 1007,43 | 1003,93 |
| 1,50 | 1018,81 | 1007,43 | 1003,93 |
| 1,60 | 1032,42 | 1007,43 | 1003,93 |
| 1,70 | 1043,76 | 1007,43 | 1003,93 |

4.3.2.2 Cas des fournisseurs 1 et 2

La figure 4.11 démontre que la politique de sélection avec deux fournisseurs est toujours plus avantageuse que celle avec un seul. La distribution des commandes entre les deux fournisseurs permet de minimiser la rupture des deux stocks.

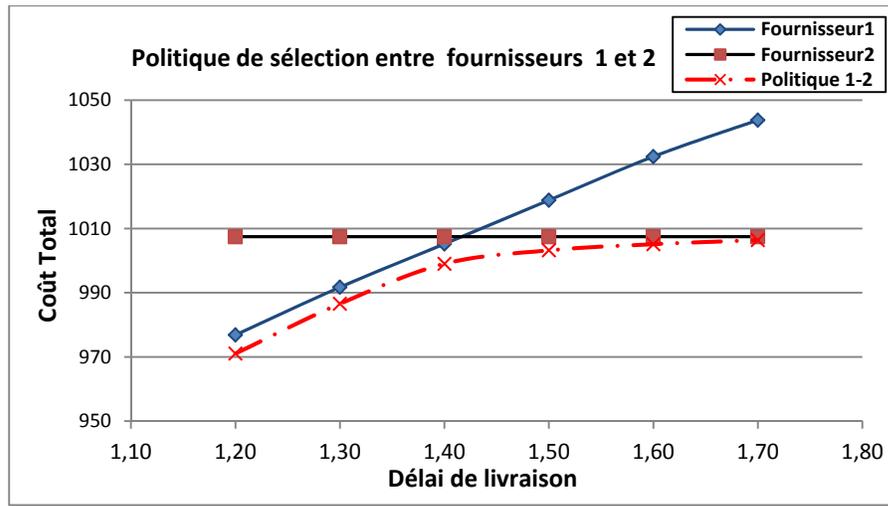


Figure 4. 12 Variation de D_l pour le cas du fournisseur 1 et 2

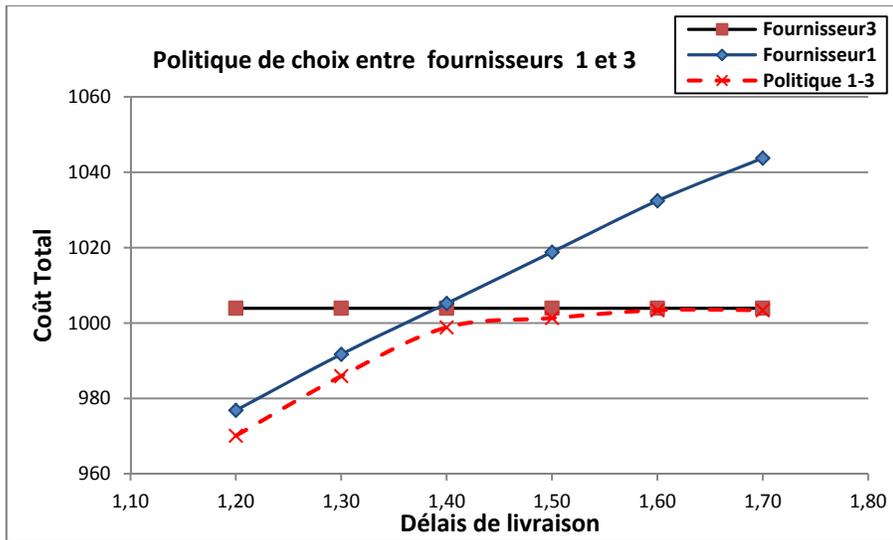
La politique de sélection avec deux fournisseurs nous permet d'avoir un gain sur le coût total qui varie de 0,1 % à 3,6 %, selon la variation du délai, comme il est illustré sur le tableau 4.14.

Tableau 4. 14 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 2 avec variation du délai

| Délais L | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|----------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Politique 1-2 | Fournisseur1 | Fournisseur2 |
| 1,20 | 976,82 | 1007,43 | 971,026 | 0,59 % | 3,61 % |
| 1,30 | 991,73 | 1007,43 | 986,548 | 0,52 % | 2,07 % |
| 1,40 | 1005,26 | 1007,43 | 999,018 | 0,62 % | 0,83 % |
| 1,50 | 1018,81 | 1007,43 | 1003,19 | 1,53 % | 0,42 % |
| 1,60 | 1032,42 | 1007,43 | 1005,11 | 2,65 % | 0,23 % |
| 1,70 | 1043,76 | 1007,43 | 1006,38 | 3,58 % | 0,10 % |

4.3.2.3 Cas des fournisseurs 1 et 3

D'après la figure 4.12 et le tableau 4.15 la politique de sélection est encore meilleure, elle propose un gain sur le coût total de 0,69 % à 3,87 %.

Figure 4. 13 Variation de D_l pour le cas du fournisseur 1 et 3

Le gain serait plus grand lorsque la différence entre les délais de livraison des deux fournisseurs augmente.

Tableau 4. 15 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 3 avec variation du délai

| Délais | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|-------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur3 | Politique 1-3 | fournisseur1 | Fournisseur3 |
| 1,20 | 976,82 | 1003,93 | 970,091 | 0,69 % | 3,37 % |
| 1,30 | 991,73 | 1003,93 | 985,915 | 0,58 % | 1,79 % |
| 1,40 | 1005,26 | 1003,93 | 998,84 | 0,63 % | 0,51 % |
| 1,50 | 1018,81 | 1003,93 | 1001,33 | 1,72 % | 0,26 % |
| 1,60 | 1032,42 | 1003,93 | 1003,41 | 2,81 % | 0,05 % |
| 1,70 | 1043,76 | 1003,93 | 1003,41 | 3,87 % | 0,05 % |

4.3.2.4 Cas de trois fournisseurs

Selon la figure 4.13 et le tableau 4.16 la politique de sélection des trois fournisseurs est nettement plus avantageuse que les autres.

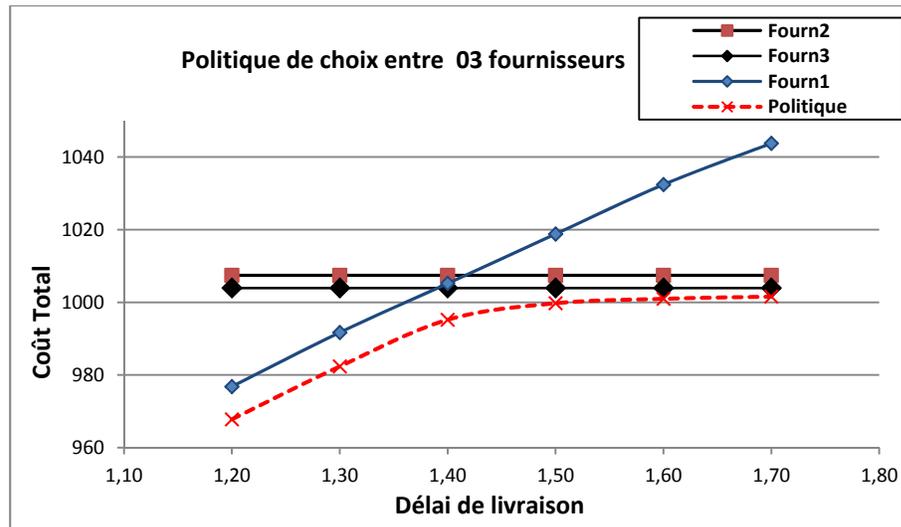


Figure 4. 14 Variation de D_l pour le cas de trois fournisseurs

La politique de sélection avec trois fournisseurs nous permet d'avoir un gain sur le coût total qui varie de 0,92 % à 4.04 % selon la variation du délai, le tableau 4.14 présente ces valeurs.

Tableau 4. 16 Coût total et gain avec la politique de sélection des trois fournisseurs avec variation du délai

| Délais L | Fourn1 | Fourn2 | Fourn3 | Politique | Gain F1 | Gain F2 | Gain F3 |
|-------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| 1,20 | 976,82 | 1007,43 | 1003,93 | 967,79 | 0,92 % | 3,93 % | 3,60 % |
| 1,30 | 991,70 | 1007,43 | 1003,93 | 983,81 | 0,94 % | 2,49 % | 2,15 % |
| 1,40 | 1005,2 | 1007,43 | 1003,93 | 995,20 | 0,99 % | 1,21 % | 0,87 % |
| 1,50 | 1018,81 | 1007,43 | 1003,93 | 999,73 | 1,87 % | 0,76 % | 0,42 % |
| 1,60 | 1032,42 | 1007,43 | 1003,93 | 1000,97 | 3,05 % | 0,64 % | 0,29 % |
| 1,70 | 1043,76 | 1007,43 | 1003,93 | 1001,57 | 4,04 % | 0,58 % | 0,24 % |

4.3.3 Influence de la variation du coût unitaire

Dans cette partie, nous avons fixé les valeurs de la qualité effective, du délai de livraison et du coût unitaire pour les fournisseurs 2 et 3 et nous avons varié la valeur du coût unitaire du fournisseur 1 suivant le tableau 4.17.

Tableau 4. 17 Influence du coût unitaire sur la politique

| | Qualité effective | Délai de livraison | Coût unitaire |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Fournisseur#1 | 2 % | 1,2 | 2-7 |
| Fournisseur#2 | 1 % | 1,4 | 4 |
| Fournisseur#3 | 1,5 % | 1.1 | 5 |

4.3.3.1 Cas d'un seul fournisseur

L'augmentation du coût unitaire entraîne l'augmentation du coût total. La figure 4.14 nous renseigne sur les intervalles où le fournisseur 1 est le plus avantageux. Lorsque ce coût ne dépasse pas 4 unités monétaires, le coût total du fournisseur 1 est le moins cher (tableau 4.18) et lorsqu'il la dépasse, les deux autres fournisseurs deviennent plus intéressants.

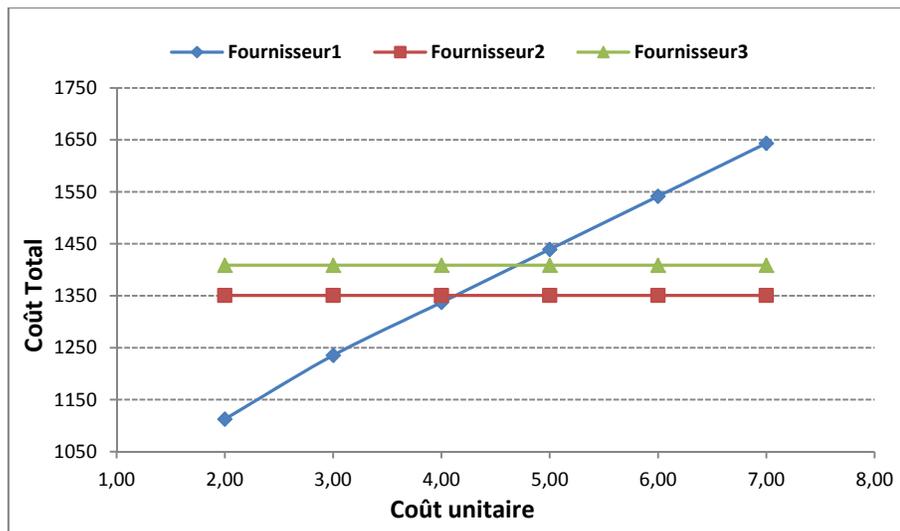
Figure 4. 15 Variation de C_{unit} pour le cas du fournisseur 1

Tableau 4. 18 Coût total pour le cas d'un fournisseur avec variation du coût unitaire

| Coûts | Coût Total | | |
|-------|--------------|--------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Fournisseur3 |
| 2,00 | 1112,59 | 1350,74 | 1408,78 |
| 3,00 | 1235,28 | 1350,74 | 1408,78 |
| 4,00 | 1337,28 | 1350,74 | 1408,78 |
| 5,00 | 1439,35 | 1350,74 | 1408,78 |
| 6,00 | 1541,43 | 1350,74 | 1408,78 |
| 7,00 | 1643,49 | 1350,74 | 1408,78 |

4.3.3.2 Cas des fournisseurs 1 et 2

Les mêmes résultats sont trouvés pour ce cas. Selon la figure 4.15, La politique de sélection reste la plus avantageuse. L'augmentation du coût unitaire influence directement le coût total, puisqu'il est multiplié par la taille du lot commandé. Le fait de choisir un fournisseur selon la pondération proposée nous assure des avantages économiques. Le gain que permet la politique de sélection varie entre 1 % et 18 % selon le coût unitaire.

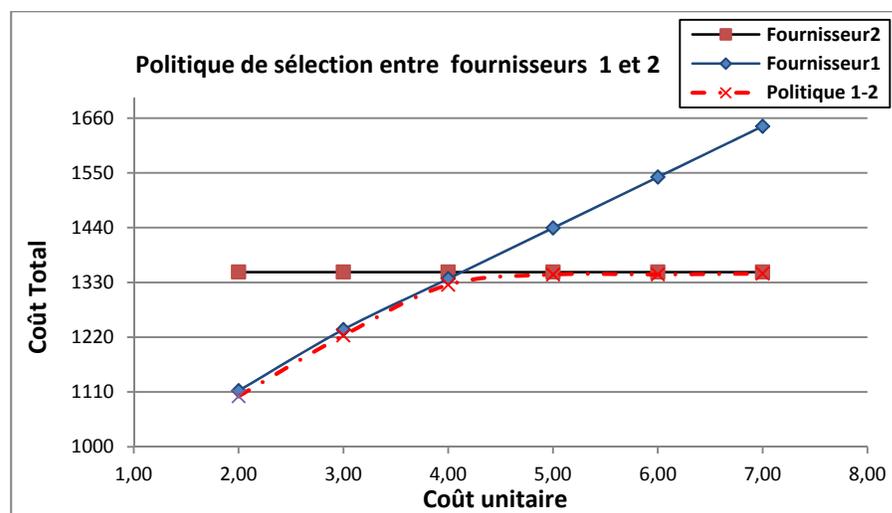


Figure 4. 16 Variation de C_{unit} pour le cas du fournisseur 1 et 2

Tableau 4. 19 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 2 avec variation du coût unitaire

| Coût u. | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|---------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur2 | Politique 1-2 | Fournisseur1 | Fournisseur2 |
| 2,00 | 1112,59 | 1350,74 | 1101,530 | 0,99 % | 18,45 % |
| 3,00 | 1235,28 | 1350,74 | 1223,420 | 0,96 % | 9,43 % |
| 4,00 | 1337,28 | 1350,74 | 1325,140 | 0,91 % | 1,90 % |
| 5,00 | 1439,35 | 1350,74 | 1345,740 | 6,50 % | 0,37 % |
| 6,00 | 1541,43 | 1350,74 | 1346,060 | 12,67 % | 0,35 % |
| 7,00 | 1643,49 | 1350,74 | 1347,670 | 18,00 % | 0,23 % |

4.3.3.3 Cas des fournisseurs 1 et 3

La politique de sélection entre les fournisseurs 1 et 3 présente une diminution sur le coût total comparativement au cas d'un seul fournisseur. La figure 4.16 présente l'allure de la courbe de cette politique. Les gains trouvés varient selon l'augmentation de la valeur du coût unitaire.

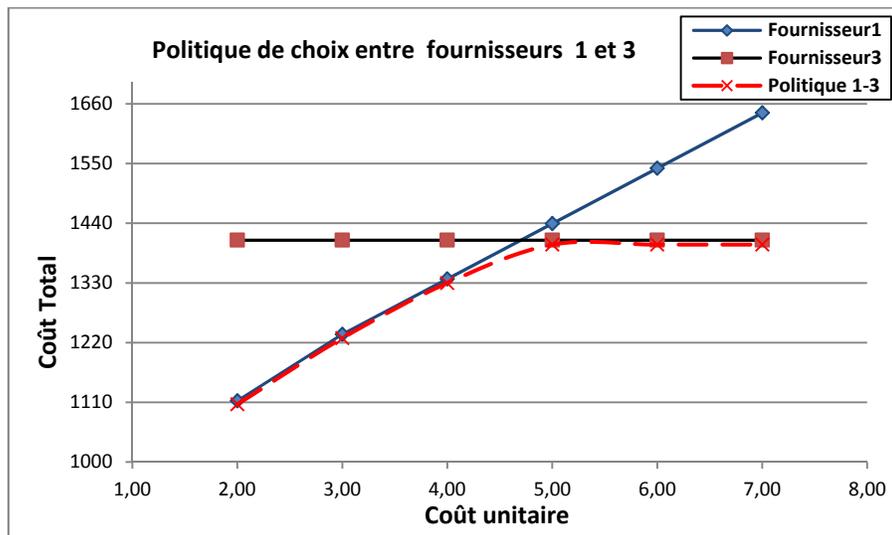


Figure 4. 17 Variation de C_{unit} pour le cas des fournisseurs 1 et 3

Tableau 4. 20 Coût total et gain avec la politique de sélection des fournisseurs 1 et 3 avec variation du coût unitaire

| Coût u | Coût Total | | | Gain de la politique avec : | |
|--------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|
| | Fournisseur1 | Fournisseur3 | Politique 1-3 | Fournisseur1 | Fournisseur3 |
| 2,00 | 1112,59 | 1408,78 | 1106,13 | 0,58 % | 21,48 % |
| 3,00 | 1235,28 | 1408,78 | 1228,140 | 0,58 % | 12,82 % |
| 4,00 | 1337,28 | 1408,78 | 1329,840 | 0,56 % | 5,60 % |
| 5,00 | 1439,35 | 1408,78 | 1400,590 | 2,69 % | 0,58 % |
| 6,00 | 1541,43 | 1408,78 | 1400,610 | 9,14 % | 0,58 % |
| 7,00 | 1643,49 | 1408,78 | 1400,710 | 14,77 % | 0,57 % |

4.3.3.4 Cas de trois fournisseurs

L'ajout d'un troisième fournisseur nous assure un gain plus intéressant que celui proposé par la sélection de deux. La figure 4.17 présente les courbes pour le cas de trois fournisseurs où on remarque que l'allure de la politique de sélection avec trois fournisseurs tend à diverger des autres courbes puisque les pondérations utilisées permettent une meilleure sélection lors de l'approvisionnement qui diminue l'effet des pénuries. Le tableau 4.21 reflète les coûts trouvés ainsi que les gains calculés.

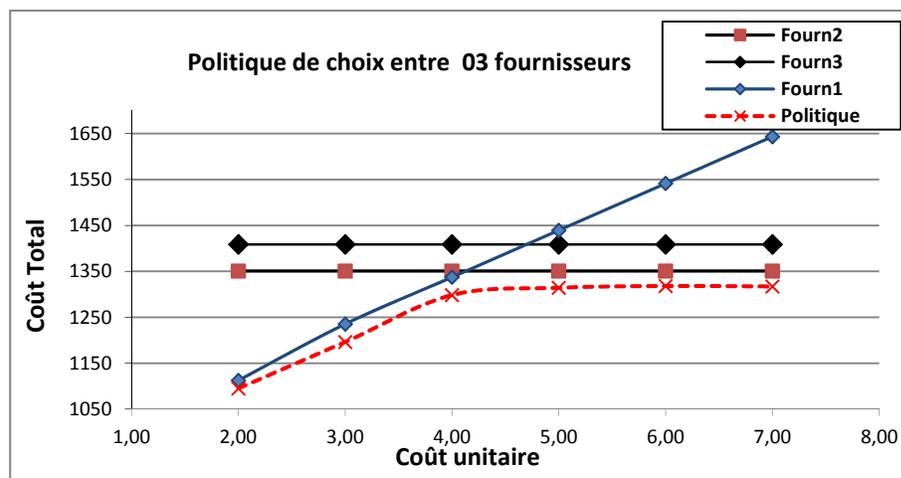


Figure 4. 18 Variation de C_{unit} pour le cas de trois fournisseurs

Tableau 4. 21 Coût total et gain avec la politique de sélection des trois fournisseurs avec variation du coût unitaire

| Coût u. | Fourn1 | Fourn2 | Fourn3 | Politique | Gain F1 | Gain F2 | Gain F3 |
|----------------|---------------|---------------|---------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| 2,00 | 1112,59 | 1350,74 | 1408,78 | 1095,110 | 1,57 % | 18,93 % | 22,27 % |
| 3,00 | 1235,28 | 1350,74 | 1408,78 | 1196,170 | 3,17 % | 11,44 % | 15,09 % |
| 4,00 | 1337,28 | 1350,74 | 1408,78 | 1298,400 | 2,91 % | 3,87 % | 7,84 % |
| 5,00 | 1439,35 | 1350,74 | 1408,78 | 1314,240 | 8,69 % | 2,70 % | 6,71 % |
| 6,00 | 1541,43 | 1350,74 | 1408,78 | 1318,07 | 14,49 % | 2,42 % | 6,44 % |
| 7,00 | 1643,49 | 1350,74 | 1408,78 | 1317,100 | 19,86 % | 2,49 % | 6,51 % |

4.3.4 Discussion générale

La politique de commande combinée à la politique de sélection nous apporte un gain considérable sur le coût total encouru pour le système étudié. Le tableau 4.22 démontre que le gain augmente à chaque fois que nous ajoutons un fournisseur. L'écart entre les gains que l'on voit sur les deux dernières colonnes, qu'il soit petit ou grand est dû essentiellement à notre choix des valeurs des paramètres. Pour ce qui est de la variation de la qualité effective on remarque que l'écart est relativement petit, car notre étude est menée dans un l'intervalle de la qualité effective [0,5 %, 3 %] qui correspond à [99,98 %, 82.03 %] de probabilité d'acceptation dans un plan d'échantillonnage simple modéré.

L'écart de gain pour la variation des délais de livraison est aussi petit, car nous avons choisi des valeurs afin de pouvoir représenter graphiquement l'intersection entre les courbes des différents fournisseurs, afin de démontrer l'allure de la courbe de la politique proposée. L'augmentation des valeurs des différents délais aura pour conséquence l'augmentation du gain. La distribution des commandes d'approvisionnement entre les fournisseurs est répartie de telle sorte que les ruptures de stock sont réduites. Enfin, lors de la variation du coût unitaire l'écart du gain est très grand, puisque ce coût multiplié par la taille optimale du lot à commander influence directement le coût total. La figure 4.19 présente une comparaison des différents cas de sélection de fournisseurs et démontre que la politique avec trois fournisseurs est toujours la plus intéressante que les autres.

Tableau 4. 22 Total des gains pour la politique de sélection

| | Coût avec 01 fournisseur | Coût avec 02 fournisseurs | Coût avec 03 fournisseurs | Gain avec 02 fournisseurs | Gain avec 03 fournisseurs |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Qualité p | 960,541 | 958,198 | 947,964 | 0,24 % | 1,31 % |
| | 972,073 | 967,741 | 958,261 | 0,45 % | 1,42 % |
| | 986,51 | 980,661 | 970,611 | 0,59 % | 1,61 % |
| | 1006,09 | 993,665 | 985,691 | 1,23 % | 2,03 % |
| | 1029,49 | 1005,112 | 997,132 | 2,37 % | 3,14 % |
| | 1053,96 | 1006,20 | 997,308 | 4,53 % | 5,38 % |
| Délai livraison | 976,82 | 971,026 | 967,79 | 0,19 % | 0,52 % |
| | 991,73 | 986,548 | 983,81 | 0,12 % | 0,80 % |
| | 1005,26 | 999,018 | 995,20 | 0,52 % | 0,90 % |
| | 1018,81 | 1003,19 | 999,73 | 0,95 % | 1,81 % |
| | 1032,42 | 1005,11 | 1000,97 | 0,92 % | 3,04 % |
| | 1043,76 | 1006,38 | 1001,57 | 0,92 % | 4,05 % |
| Coût unitaire | 1112,59 | 1101,53 | 957,799 | 0,99 % | 13,91 % |
| | 1235,28 | 1223,42 | 983,813 | 0,96 % | 20,36 % |
| | 1337,28 | 1325,14 | 995,208 | 0,91 % | 25,58 % |
| | 1439,35 | 1345,74 | 999,735 | 6,50 % | 30,54 % |
| | 1541,43 | 1346,06 | 1000,97 | 12,67 % | 35,06 % |
| | 1643,49 | 1347,67 | 1001,57 | 18,00 % | 39,06 % |

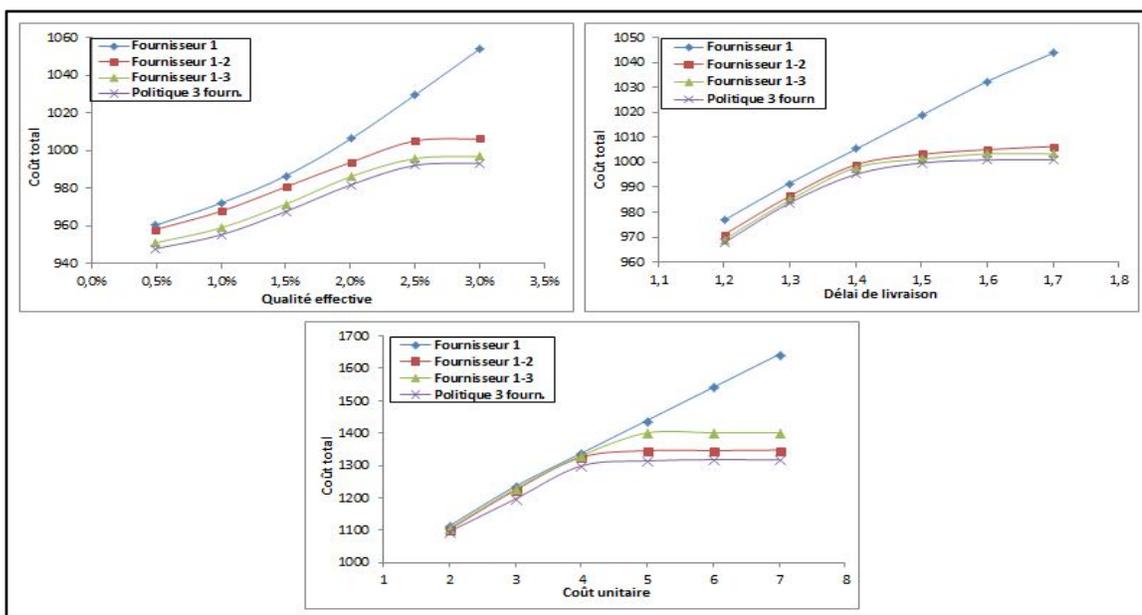


Figure 4. 19 Comparaison des différents cas de sélection de fournisseurs

Dans ce chapitre nous avons proposé une politique de commande combinée à la politique de sélection de fournisseurs, afin de mettre en évidence le fait que d'avoir plusieurs fournisseurs dans une chaîne d'approvisionnement est toujours la meilleure stratégie à adopter. Pour le système étudié, sous les contraintes des paramètres et des valeurs choisis, nous avons mis en évidence que la sélection de trois fournisseurs est mieux que celle de deux ou seulement d'un. Cette analyse nous permet donc de généraliser la politique de commande combinée à la politique de sélection sur n fournisseurs. La pondération que nous avons proposée permet de faire une sélection entre les n fournisseurs quel que soit la combinaison du coût d'acquisition, du délai de livraison et de la qualité qu'ils les caractérisent. Pour notre étude nous avons essayé du mieux de notre connaissance de faire une combinaison fidèle entre ces trois paramètres et qui reflète des cas réels dans l'approvisionnement.

CONCLUSION

Ce travail a permis de traiter la problématique de la commande optimale d'un système manufacturier non fiable dans un contexte de contrôle statistique de la qualité. Ce système est approvisionné par des fournisseurs dont les délais de livraison et la qualité effective sont variables et il fait face à un taux de demande constante.

Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature pour positionner notre recherche comparativement aux autres. Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé deux politiques de commande de la production avec un contrôle de la qualité à 100 % ou de retour au fournisseur. À la réception de la matière première, un contrôle de la qualité est effectué par échantillonnage simple, les lots rejetés sont soit inspectés en totalité, soit retournés au fournisseur générant ainsi des délais de livraison, des coûts de contrôle et de pénuries plus grands. Les lots qui sont acceptés contiennent une proportion de produits défectueux qui génère à leurs tours des coûts de rejet. Le but de cette étude était de développer des modèles réactifs, qui varient selon les niveaux d'inventaires de la matière première et du produit fini. Elle visait ainsi à trouver une politique de contrôle optimale qui minimiserait le coût total, en présence de la variation de la qualité, des coûts et des délais. L'analyse de sensibilité approfondie que nous avons menée sur les principaux paramètres caractérisant le système de production étudié montre qu'il est toujours préférable d'opter pour le choix de la politique hybride que nous avons traité dans le troisième chapitre. Une telle stratégie garantit un coût total qui est toujours inférieur à ceux du contrôle à 100 % ou du retour au fournisseur. De plus, la présence des points de commutation entre le choix d'un contrôle à 100 % ou d'un retour chez le fournisseur révèle la nécessité d'examiner les aspects dynamiques et stochastiques de tout le système d'une manière intégrée, afin de prendre les meilleures décisions. Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons proposé une politique de commande qui intègre les critères de sélection entre plusieurs fournisseurs. Cette politique consiste à sélectionner un fournisseur selon le minimum de la pondération entre le coût d'acquisition, le délai de livraison et la qualité, qui garantit un gain sur le coût encouru.

Une approche expérimentale qui combine des techniques d'optimisation statistiques telles que les plans d'expérience, l'analyse de la variance et la méthodologie de surface de réponse, avec l'outil de la simulation est utilisée le long de ce travail. Le comportement stochastique et dynamique du système rendent la simulation, un outil incontournable pour le représenter fidèlement. L'efficacité de l'approche adoptée a été démontrées par des analyses de sensibilité. Cette étude n'est qu'un début pour l'exploration du contrôle de la production, de la qualité et de l'approvisionnement, le champ est ouvert pour d'autres extensions possibles, telles que le choix d'une qualité effective aléatoire, d'une demande aléatoire, d'inclure les stratégies de maintenance et de Setup... etc.

ANNEXE I

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC CONTRÔLE DE LA QUALITÉ À 100%

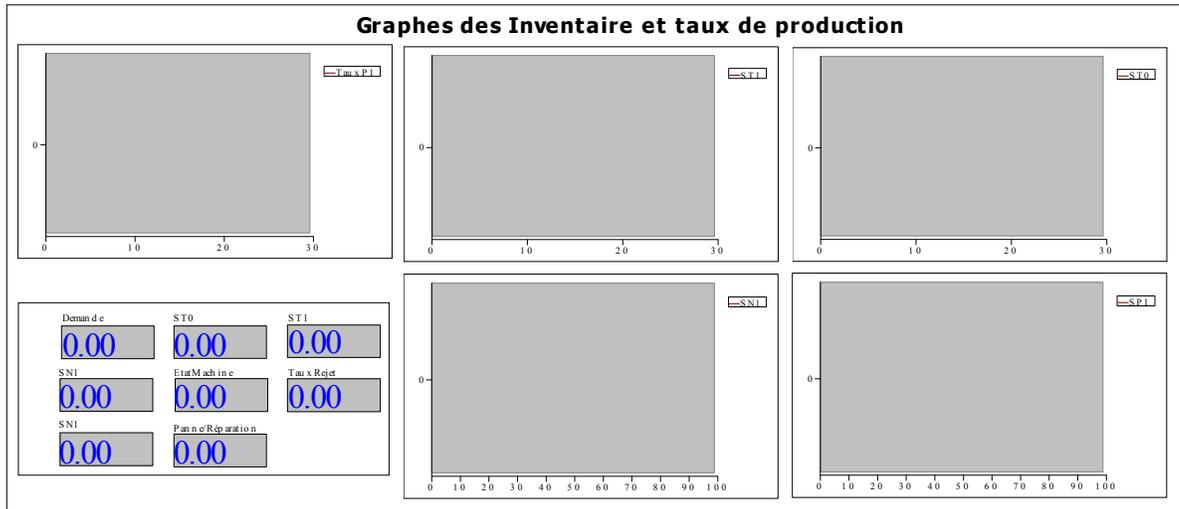


Figure A-I- 1 Tableau de bord du modèle

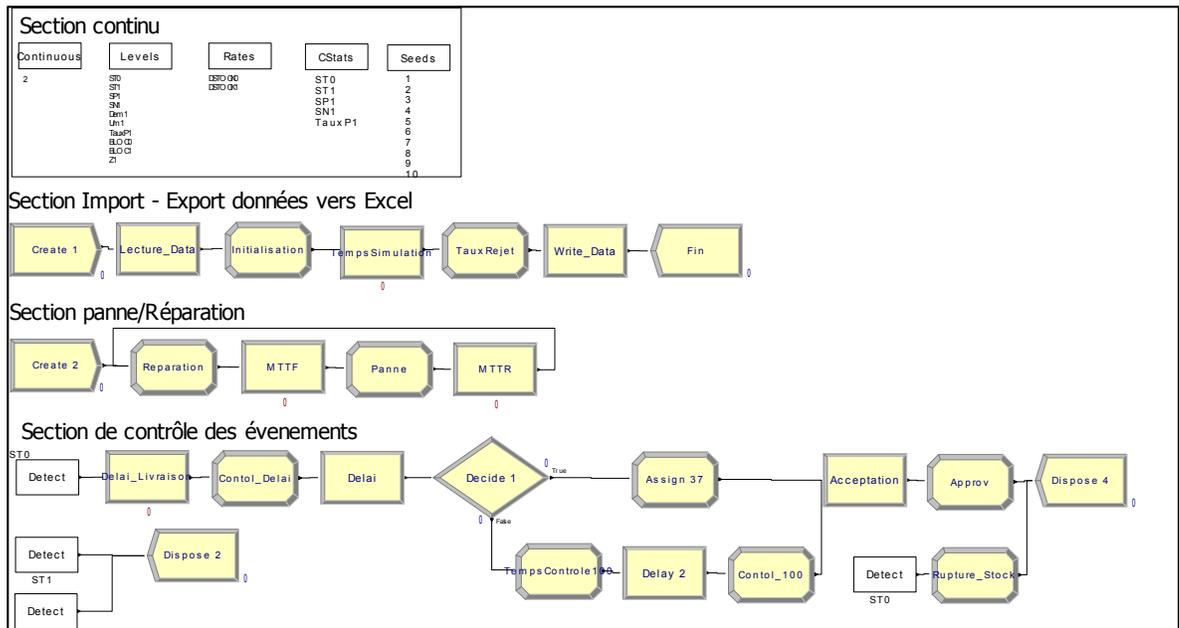


Figure A-I- 2 Modèle de simulation avec la politique de contrôle à 100%

Domaine expérimental

PROJECT, "MIP1 non-fiable avec contrôle à 100%","Lamdjed Tolba"
 ,,No,Yes,No,No,No,No,No,No,No,No;

CONTINUOUS, 2,,10e-2,0.1,,RKF(.01,.01,Warning),Warning;

ATTRIBUTES: T_Simulation,DATATYPE(Real);

FILES: File1,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Control_100\Control100\ENTREE.xlsx",
 MSExcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"entre",2):
 File2,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Control_100\Control100\SORTIE.xlsx",MSExcel2007,,D
 ispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"SORTIE",2):
 File3,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Control_100\Control100\Dynamique.xlsx",MSExcel2007
 ,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"Dynamique",2);

VARIABLES: Quantite_Control, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 TempsSimulation.WIP, CLEAR(System), CATEGORY("Exclude-
 Exclude"), DATATYPE(Real):
 Dispose 2.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 dem, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):
 TempsSimulation.NumberIn, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 Create 2.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 n, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):
 Delai_Livraison.WIP, CLEAR(System), CATEGORY("Exclude-
 Exclude"), DATATYPE(Real):
 temps_sim, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 Taux_Rejet, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 MTTF.NumberIn, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 Delai_Livraison.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 REJET, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 Dispose 4.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 NombControl, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 p1, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):
 MTTF.WIP, CLEAR(System), CATEGORY("Exclude-Exclude"), DATATYPE(Real):
 MTTR.NumberIn, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 pa, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):
 Delai_Livraison.NumberIn, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 Stock_S, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User
 Specified"), DATATYPE(Real):
 pr, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):
 Decide 1.NumberOut True, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 TempsSimulation.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 MTTR.WIP, CLEAR(System), CATEGORY("Exclude-Exclude"), DATATYPE(Real):
 Create 1.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 MTTR.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 MTTF.NumberOut, CLEAR(Statistics), CATEGORY("Exclude"):
 rej, CLEAR(System), CATEGORY("User Specified-User Specified"), DATATYPE(Real):

Num_Commande,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Quantite_C,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 STREAM,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 NombControl100,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Dispose 22.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"): ControlDelay,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Temps_control100,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Create 3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"): Decide 1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"): Fin.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"): ETAT_MACHINE,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 pa1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real);

SEEDS: 1,,Yes:
 2,,Yes:
 3,,Yes:
 4,,Yes:
 5,,Yes:
 6,,Yes:
 7,,Yes:
 8,,Yes:
 9,,Yes:
 10,,Yes;

CSTATS: 1,ST0,Stock premier,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Stock premier"):
 2,ST1,Total Stock,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Total stock"):

3,SP1,Positive Stock,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Positive stock"):

4,SN1,Negative Stock,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Negative Stock"):

5,TauxP1,TProduction;

REPLICATE, 108,,DaysToBaseTime(500000),Yes,Yes,,24,Days,No,No,,No,Yes;

LEVELS: 1,ST0,:
 2,ST1,:
 3,SP1,:
 4,SN1,:
 5,Dem1,100:
 6,Um1,500:
 7,TauxP1,0:
 8,BLOC0,1:
 9,BLOC1,1:
 10,Z1;

RATES: 1,DSTOCK0:
 2,DSTOCK1;

Modèle de simulation

```
; Model statements for module: BasicProcess.Create 1 (Create1)
;
35$ CREATE, 1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(36$);
36$ ASSIGN: Create1.NumberOut=Create1.NumberOut + 1:NEXT(2$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 4 (Lecture)
;
2$ READ, File 1,RECORDSET(Recordset 1):
      STREAM,
      Stock_S,
      Quantite_C,
      Z1,
      a,
      Pa,
      p1:NEXT(7$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 29 (Initialisation)
7$ ASSIGN: ST0=Quantite_C+Stock_S:
          T_Simulation=TFIN:
          Z2=Z1*a:
          n=99:
          Pa1=Pa/100:
          p11=p1/100:
          TauxRejet=0:NEXT(0$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 1 (Time_Simulation)
;
0$ ASSIGN: Time_Simulation.NumberIn=Time_Simulation.NumberIn + 1:
          Time_Simulation.WIP=Time_Simulation.WIP+1;
40$ DELAY: TFIN,,NVA;
87$ ASSIGN: Time_Simulation.NumberOut=Time_Simulation.NumberOut + 1:
          Time_Simulation.WIP=Time_Simulation.WIP-1:NEXT(6$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 7 (Ecriture)
;
6$ WRITE, File 2,RECORDSET(Recordset 1):
      STREAM,
      Stock_S,
      Quantite_C,
      Z1,
      Z2,
      CAVG(Stock premier),
      CAVG(Positive Stock),
      CAVG(Negative Stock),
      Num_Commande,
      Num_Out_Accept,
      Num_Out_ctrl100,
      Num_Out_Ret_Four,
```

```

CAVG(TProduction),
TauxRejet:NEXT(1$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 3 (Fin)
;
1$    ASSIGN:    Fin.NumberOut=Fin.NumberOut + 1;
90$   DISPOSE:   Yes;

3$    DETECT:    ST1,Either,Z1,0.01:NEXT(4$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 16 (Dispose 2)
;
4$    ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
91$   DISPOSE:   Yes;

5$    DETECT:    ST1,Either,0,0.01:NEXT(4$);

8$    DETECT:    ST0,Negative,0,0.01:NEXT(9$);          Tolarence_Stock 0

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 33 (Rupture_Stock)
;
9$    ASSIGN:    BLOC1=0:NEXT(15$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 22 (Dispose 4)
;
15$   ASSIGN:    Dispose 4.NumberOut=Dispose 4.NumberOut + 1;
92$   DISPOSE:   Yes;

; Model statements for module: BasicProcess.Create 2 (Create 2)
;
93$   CREATE,    1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(94$);
94$   ASSIGN:    Create 2.NumberOut=Create 2.NumberOut + 1:NEXT(10$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 19 (Reparation)
;
10$   ASSIGN:    BLOC0=1:NEXT(11$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 5 (MTTF)
;
11$   ASSIGN:    MTTF.NumberIn=MTTF.NumberIn + 1;
          MTTF.WIP=MTTF.WIP+1;
98$   DELAY:    EXPO(1/0.1,STREAM),,VA;
145$  ASSIGN:    MTTF.NumberOut=MTTF.NumberOut + 1;
          MTTF.WIP=MTTF.WIP-1:NEXT(12$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 20 (Panne)
;
12$   ASSIGN:    BLOC0=0:NEXT(13$);

```

```

; Model statements for module: BasicProcess.Process 6 (MTTR)
13$   ASSIGN:   MTTR.NumberIn=MTTR.NumberIn + 1:
           MTTR.WIP=MTTR.WIP+1;
149$   DELAY:   EXPO(1/0.9,STREAM),,VA;
196$   ASSIGN:   MTTR.NumberOut=MTTR.NumberOut + 1:
           MTTR.WIP=MTTR.WIP-1:NEXT(10$);

14$   DETECT:   ST0,Negative,Stock_S,0.01:NEXT(16$);
; Model statements for module: BasicProcess.Process 8 (Delais_Fournisseur)
;
;
16$   ASSIGN:   Delais_Fournisseur.NumberIn=Delais_Fournisseur.NumberIn + 1:
           Delais_Fournisseur.WIP=Delais_Fournisseur.WIP+1;
200$   DELAY:   EXPO(1,STREAM),,VA;
247$   ASSIGN:   Delais_Fournisseur.NumberOut=Delais_Fournisseur.NumberOut + 1:
           Delais_Fournisseur.WIP=Delais_Fournisseur.WIP-1:NEXT(25$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 41 (Delai_controle)
;
;
25$   ASSIGN:   DelaiQualite=n*0.000001:NEXT(26$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 1 (Controle_Qualite)
;
;
26$   DELAY:   DelaiQualite,,Other:NEXT(18$);

; Model statements for module: BasicProcess.Decide 2 (Probabilite)
;
;
18$   BRANCH,   1:
           With,(Pa)/100,250$,Yes:
           Else,251$,Yes;
250$   ASSIGN:   Probabilite.NumberOut True=Probabilite.NumberOut True + 1:NEXT(28$);
251$   ASSIGN:   Probabilite.NumberOut False=Probabilite.NumberOut False + 1:NEXT(20$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 42 (Demande_Reelle)
;
;
28$   ASSIGN:   Dem1=100/(1-p11):
           Quantite_controle=Quantite_C:NEXT(30$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 12 (Acceptation)
;
;
30$   ASSIGN:   Acceptation.NumberIn=Acceptation.NumberIn + 1:
           Acceptation.WIP=Acceptation.WIP+1;
253$   DELAY:   SecondsToBaseTime(Triangular(0,0,0)),,VA;
300$   ASSIGN:   Acceptation.NumberOut=Acceptation.NumberOut + 1:
           Acceptation.WIP=Acceptation.WIP-1:NEXT(19$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 9 (Delai_Accept)
;
;
19$   ASSIGN:   Delai_Accept.NumberIn=Delai_Accept.NumberIn + 1:
           Delai_Accept.WIP=Delai_Accept.WIP+1;
304$   DELAY:   0.02,,VA;
351$   ASSIGN:   Delai_Accept.NumberOut=Delai_Accept.NumberOut + 1:
           Delai_Accept.WIP=Delai_Accept.WIP-1:NEXT(17$);

```

```

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 35 (Approvision)
;
17$    ASSIGN:    ST0=ST0+Quantite_Control:
                Num_Commande=Num_Commande+1:
                BLOC1=1:
                Num_Out_Accept=Acceptation.NumberOut:
                Num_Out_ctrl100=Controle_100.numberout:

TauxRejet=(Acceptation.NumberOut*p11)/(Acceptation.NumberOut+Controle_100.NumberOut):NEXT(15$);
; Model statements for module: BasicProcess.Decide 3 (Compar_Z2)
;
20$    BRANCH,    1:
                If,ST1.LT.Z2,354$,Yes:
                Else,355$,Yes;
354$    ASSIGN:    Compar_Z2.NumberOut True=Compar_Z2.NumberOut True + 1:NEXT(23$);
355$    ASSIGN:    Compar_Z2.NumberOut False=Compar_Z2.NumberOut False + 1:NEXT(24$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 39 (Controle100%)
;
23$    ASSIGN:    Controle100=(Quantite_C-n)*0.000001:NEXT(27$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 2 (Controle_delay)
;
27$    DELAY:    Controle100,,Other:NEXT(29$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 43 (Demande_100)
;
29$    ASSIGN:    Dem1=100/(1-Pa1*p11):
                Quantite_controle=Quantite_C*(1-p11):NEXT(31$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 13 (Controle_100)
;
31$    ASSIGN:    Controle_100.NumberIn=Controle_100.NumberIn + 1:
                Controle_100.WIP=Controle_100.WIP+1;
357$    DELAY:    0.0000000000000000,,VA;
404$    ASSIGN:    Controle_100.NumberOut=Controle_100.NumberOut + 1:
                Controle_100.WIP=Controle_100.WIP-1:NEXT(19$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 40 (RetourFourn)
;
24$    ASSIGN:    Dem1=100/(1-p11):NEXT(21$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 8 (Write_Data_Dynamique)
;
33$    WRITE,    File 3,RECORDSET(Recordset 1):
                TEMPS,
                ST0,
                ST1,
                Stock_S,
                Quantite_C,
                Z1,

```

```

    TauxP1,
    Politique:NEXT(34$);

```

```

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 24 (Dispose 24)
;
34$    ASSIGN:    Dispose 24.NumberOut=Dispose 24.NumberOut + 1;
462$   DISPOSE:  Yes;

```

Routine C++

```

extern "C" void cdecl cstate ()
{
    SMREAL    DSTOCK0;
    SMREAL    DSTOCK1;
    SMREAL    dST0; // INVENTAIRE MATIERE PREMIERE
    SMREAL    dST1; // INVENTAIRE PRODUIT FINI
    SMREAL    value;
    SMREAL    dBLOC0; // BLOC PANNE REPARATION
    SMREAL    dBLOC1; // BLOC RUPTURE DE STOCK
    SMREAL    dDem1; // DEMANDE
    SMREAL    dUm1;  // TAUX PRODUCTION MAX
    SMREAL    dTauxP1; // TAUX PRODUCTION
    SMREAL    dStock_S; // STOCK SECURITE
    SMREAL    dZ1;   // SEUIL CRITIQUE DE PRODUCTION

    static SMINT ST0    =1; //Note: these numbers must match those
    static SMINT ST1    =2; // entered in the Levels and Rates
    static SMINT SP1    =3; // modules of Controle_100.doe
    static SMINT SN1    =4;
    static SMINT Dem1   =5;
    static SMINT Um1    =6;
    static SMINT TauxP1 =7;
    static SMINT BLOC0  =8;
    static SMINT BLOC1  =9;
    static SMINT Z1     =10;

    // METRE AJOUR LE STOCK DU PRODUIT, CAS DE PANNE PAS DE PRODUCTION BLOC0==0

    dST0 =    getss(&ST0);
    dBLOC0 =  getss(&BLOC0);
    dBLOC1 =  getss(&BLOC1);
    dDem1 =   getss(&Dem1);
    dUm1 =    getss(&Um1);
    dTauxP1 = getss(&TauxP1);
    dZ1 =     getss(&Z1);
    dST1 =    getss(&ST1);

    if (dST1 < dZ1)
    {
        dTauxP1 = dUm1;
    }

    else

```

```

{
    dTauxP1 = dDem1;
}

DSTOCK0 = -dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setd(&ST0, &DSTOCK0);

DSTOCK1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1 - dDem1;
setd(&ST1, &DSTOCK1);

dTauxP1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setss(&TauxP1, &dTauxP1);

// INTEGRALE DANS LE TEMPS DE STOCK POSITIF ET STOCK NEGATIF

    if (dST1 >= 0)
    {
        value = dST1;
        setss(&SP1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SP1, &value);
    }

    if (dST1 < 0)
    {
        value = -dST1;
        setss(&SN1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SN1, &value);
    }

return;

```


ANNEXE II

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC RETOUR AU FOURNISSEUR

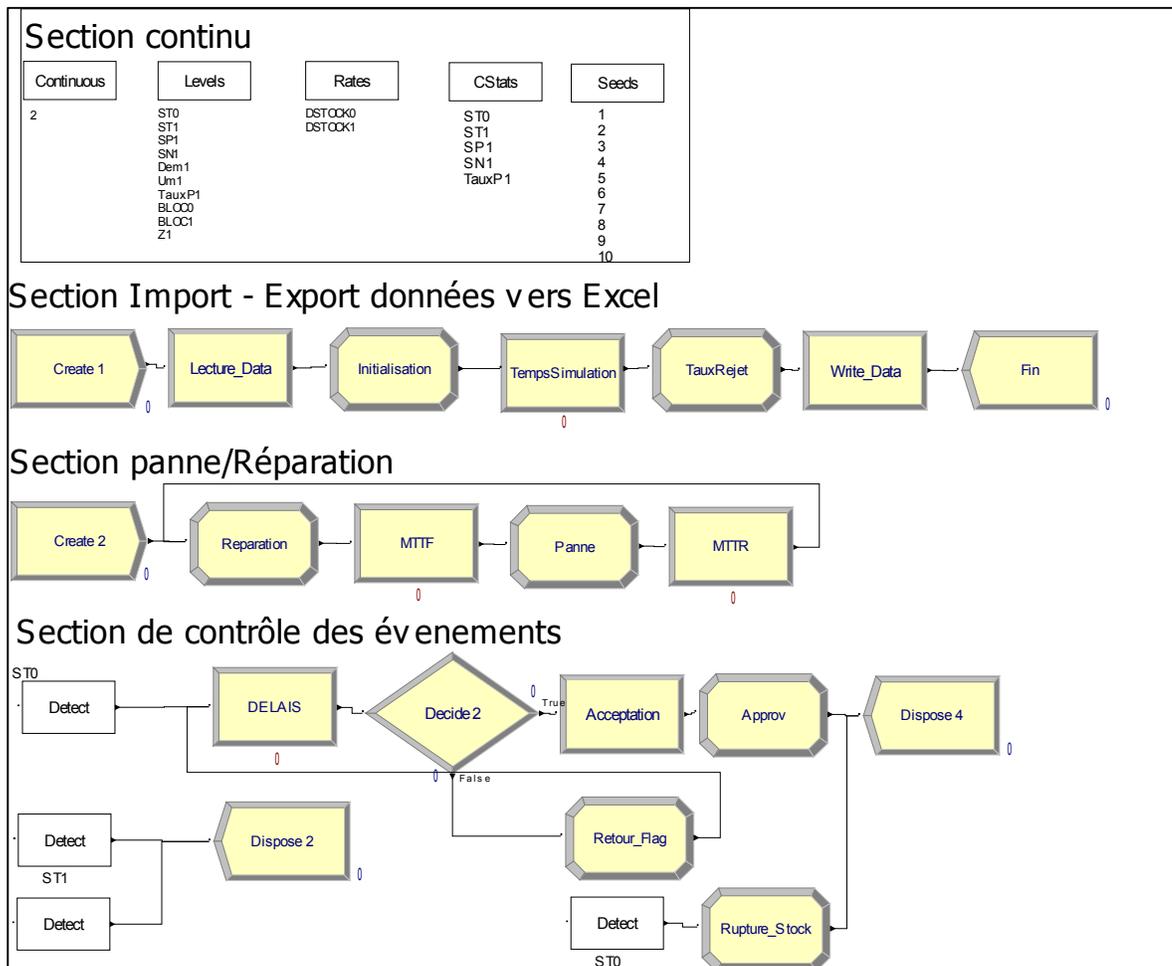


Figure A-II- 1 Modèle de simulation avec politique de retour au fournisseur

Domaine expérimental

PROJECT, "M1P1 avec Retour Fournisseur", "Lamdjed Tolba",,,No, Yes,No,No,No,No,No,No,No,No,No;

CONTINUOUS, 2,,10e-8,1,,RKF(.1,.1,Warning),Warning;

ATTRIBUTES: T_Simulation,DATATYPE(Real);

FILES:

```
File1,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Retour_Fourni\ENTREE.xlsx",MSExcel2007,,Dispose,,H
old,RECORDSET(Recordset 1,"entre",2):
File2,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Retour_Fourni\SORTIE.xlsx",MSExcel2007,,Dispose,,H
old,RECORDSET(Recordset 1,"SORTIE",2):
File3,"C:\Users\Lamdjed\Desktop\Retour_Fourni\Dynamique.xlsx",MSExcel2007,,Dispose,
,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"Dynamique",2);
```

```
VARIABLES:  Dispose 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Create 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
DELAIS.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Taux_Rejet,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
MTTF.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
REJET,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
Dispose 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Retour,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
p1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
MTTF.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
MTTR.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
pa,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
Stock_S,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
pr,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
Decide 1.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
MTTR.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
Create 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Time of simulation.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
MTTR.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Time of simulation.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
Exclude"),DATATYPE(Real):
MTTF.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Marche,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
rej,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
Num_Commande,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
Quantite_C,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
STREAM,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
DELAIS.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
Time of simulation.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
DELAIS.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Decide 1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
Fin.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
ETAT_MACHINE,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
Specified"),DATATYPE(Real):
pa1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real);
```

```
SEEDS:  1,,Yes:
        2,,Yes:
        3,,Yes:
```

```

4,,Yes:
5,,Yes:
6,,Yes:
7,,Yes:
8,,Yes:
9,,Yes:
10,,Yes;

CSTATS:      1,ST0,Stock premier,,DATABASE(,""Continuous"",""User
              Specified"",""Stock premier""):
              2,ST1,Total Stock,,DATABASE("Continuous", "User Specified", "Total stock"):
              4,SP1,Positive Stock,,DATABASE("Continuous", "User Specified", "Positive stock"):
              5,SN1,Negative Stock,,DATABASE("Continuous", "User Specified", "Negative Stock"):
              7,TauxP1,TProduction;

REPLICATE,   108,,DaysToBaseTime(500000),Yes,Yes,,,,,24,Days,No,No,,,No,Yes;

LEVELS:      1,ST0,:
              2,ST1,:
              3,SP1,:
              4,SN1,:
              5,Dem1,100:
              6,Um1,500:
              7,TauxP1,0:
              8,BLOC0,1:
              9,BLOC1,1:
              10,Z1;

RATES:       1,DSTOCK0:
              2,DSTOCK1;

```

Modèle de simulation

```

; Model statements for module: BasicProcess.Create 1 (Create 1)

22$ CREATE,   1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(23$);

23$ ASSIGN:   Create 1.NumberOut=Create 1.NumberOut + 1:NEXT(2$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 4 (Read_Data)
;
2$ READ,     File 1,RECORDSET(Recordset 1):
              STREAM,
              Stock_S,
              Quantite_C,
              Z1,
              pa,
              pr:NEXT(6$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 29 (Initialisation)

```

```

;
6$    ASSIGN:    ST0=Quantite_C+Stock_S:
          T_Simulation=TFIN:
          Retour=-100:
          pa1=pa/100:
          REJET=0:
          rej=0:
          p1=pr/100:
          Num_Commande=0:
          Dem1=Dem1/(1-p1):NEXT(0$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 1 (Time of simulation)
;
0$    ASSIGN:    Time of simulation.NumberIn=Time of simulation.NumberIn + 1:
          Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP+1;
27$   DELAY:    TFIN,,NVA;
74$   ASSIGN:    Time of simulation.NumberOut=Time of simulation.NumberOut + 1:
          Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP-1:NEXT(20$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 36 (TauxRejet)
;
20$   ASSIGN:    Taux_Rejet=rej/TNOW:NEXT(21$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 8 (Write_Data)
;
21$   WRITE,    File 2,RECORDSET(Recordset 1):
          STREAM,
          Stock_S,
          Quantite_C,
          Z1,
          CAVG(Stock premier),
          CAVG(Positive Stock),
          CAVG(Negative Stock),
          Num_Commande,
          Taux_Rejet,
          CAVG(TProduction):NEXT(1$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 3 (Fin)
;
1$    ASSIGN:    Fin.NumberOut=Fin.NumberOut + 1;
77$   DISPOSE:   Yes;

3$    DETECT:    ST1,Either,Z1,0:NEXT(4$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 16 (Dispose 2)
4$    ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
78$   DISPOSE:   Yes;

5$    DETECT:    ST1,Either,0,0:NEXT(4$);

7$    DETECT:    ST0,Negative,Stock_S,0:NEXT(10$);
; Model statements for module: BasicProcess.Process 7 (DELAIS)

```

```

;
10$    ASSIGN:    DELAIS.NumberIn=DELAIS.NumberIn + 1:
                DELAIS.WIP=DELAIS.WIP+1;
80$    DELAY:     EXPO(1.1,STREAM),,VA;
127$   ASSIGN:    DELAIS.NumberOut=DELAIS.NumberOut + 1:
                DELAIS.WIP=DELAIS.WIP-1:NEXT(14$);

; Model statements for module: BasicProcess.Decide 1 (Decide 1)
;
14$    BRANCH,   1:
                With,(pa)/100,130$,Yes:
                Else,131$,Yes;
130$   ASSIGN:    Decide 1.NumberOut True=Decide 1.NumberOut True + 1:NEXT(13$);
131$   ASSIGN:    Decide 1.NumberOut False=Decide 1.NumberOut False + 1:NEXT(19$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 1 (Acceptation)
;
13$    DELAY:     0.02,,Other:NEXT(11$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 32 (Approv)
;
11$    ASSIGN:    Num_Commande=Num_Commande+1:
                ST0=ST0+Quantite_C:
                BLOC1=1:
                Retour=-100:
                rej=rej+(Quantite_C*p1):NEXT(8$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 21 (Dispose 4)
;
8$     ASSIGN:    Dispose 4.NumberOut=Dispose 4.NumberOut + 1;
132$   DISPOSE:  Yes;

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 35 (Retour_Flag)
;
19$    ASSIGN:    Retour=-200:NEXT(10$);

9$     DETECT:    ST0,Negative,0,0:NEXT(12$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 33 (Rupture_Stock)
;
12$    ASSIGN:    BLOC1=0:NEXT(8$);
; Model statements for module: BasicProcess.Create 2 (Create 2)
133$   CREATE,   1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(1),1:NEXT(134$);
134$   ASSIGN:    Create 2.NumberOut=Create 2.NumberOut + 1:NEXT(15$);
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 19 (Reparation)
15$    ASSIGN:    BLOC0=1:
                ETAT_MACHINE=BLOC0*BLOC1*50:
                Marche=-100:NEXT(16$);
; Model statements for module: BasicProcess.Process 5 (MTTF)

```

```

;
16$    ASSIGN:    MTF.NumberIn=MTF.NumberIn + 1:
                MTF.WIP=MTF.WIP+1;
138$   DELAY:    EXPO(1/0.1,STREAM),VA;
185$   ASSIGN:    MTF.NumberOut=MTF.NumberOut + 1:
                MTF.WIP=MTF.WIP-1:NEXT(17$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 20 (Panne)
17$    ASSIGN:    BLOC0=0:
                Marche=-200:NEXT(18$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 6 (MTTR)
;
18$    ASSIGN:    MTTR.NumberIn=MTTR.NumberIn + 1:
                MTTR.WIP=MTTR.WIP+1;
189$   DELAY:    EXPO(1/0.9,STREAM),VA;
236$   ASSIGN:    MTTR.NumberOut=MTTR.NumberOut + 1:
                MTTR.WIP=MTTR.WIP-1:NEXT(15$);

```

Routine C++

```

extern "C" void cdecl cstate ()
{
    SMREAL    DSTOCK0;
    SMREAL    DSTOCK1;
    SMREAL    dST0; // INVENTAIRE MATIERE PREMIERE
    SMREAL    dST1; // INVENTAIRE PRODUIT FINI
    SMREAL    value;
    SMREAL    dBLOC0; // BLOC PANNE REPARATION
    SMREAL    dBLOC1; // BLOC RUPTURE DE STOCK
    SMREAL    dDem1; // DEMANDE
    SMREAL    dUm1; // TAUX PRODUCTION MAX
    SMREAL    dTauxP1; // TAUX PRODUCTION
    SMREAL    dStock_S; // STOCK SECURITE
    SMREAL    dZ1; // SEUIL CRITIQUE DE PRODUCTION

    static SMINT ST0 =1; //Note: these numbers must match those
    static SMINT ST1 =2; // entered in the Levels and Rates
    static SMINT SP1 =3; // modules of Controle_100.doe
    static SMINT SN1 =4;
    static SMINT Dem1 =5;
    static SMINT Um1 =6;
    static SMINT TauxP1 =7;
    static SMINT BLOC0 =8;
    static SMINT BLOC1 =9;
    static SMINT Z1 =10;

// METRE AJOUR LE STOCK DU PRODUIT, CAS DE PANNE PAS DE PRODUCTION BLOC0==0

    dST0 = getss(&ST0);
    dBLOC0 = getss(&BLOC0);
    dBLOC1 = getss(&BLOC1);
    dDem1 = getss(&Dem1);
    dUm1 = getss(&Um1);
    dTauxP1 = getss(&TauxP1);
    dZ1 = getss(&Z1);

```

```

    dST1 =      getss(&ST1);

if (dST1 < dZ1)
{
    dTauxP1 = dUm1;
}

else
{
    dTauxP1 = dDem1;
}

DSTOCK0 = -dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
    setd(&ST0, &DSTOCK0);

DSTOCK1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1- dDem1;
    setd(&ST1, &DSTOCK1);

dTauxP1 = dTauxP1 * dBLOC0*dBLOC1;
setss(&TauxP1, &dTauxP1);

// INTEGRALE DANS LE TEMPS DE STOCK POSITIF ET STOCK NEGATIF
    if (dST1 >= 0)
    {
        value = dST1;
        setss(&SP1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SP1, &value);
    }

    if (dST1 < 0)
    {
        value = -dST1;
        setss(&SN1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SN1, &value);
    }

return;

```


ANNEXE III

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC LA POLITIQUE HYBRIDE

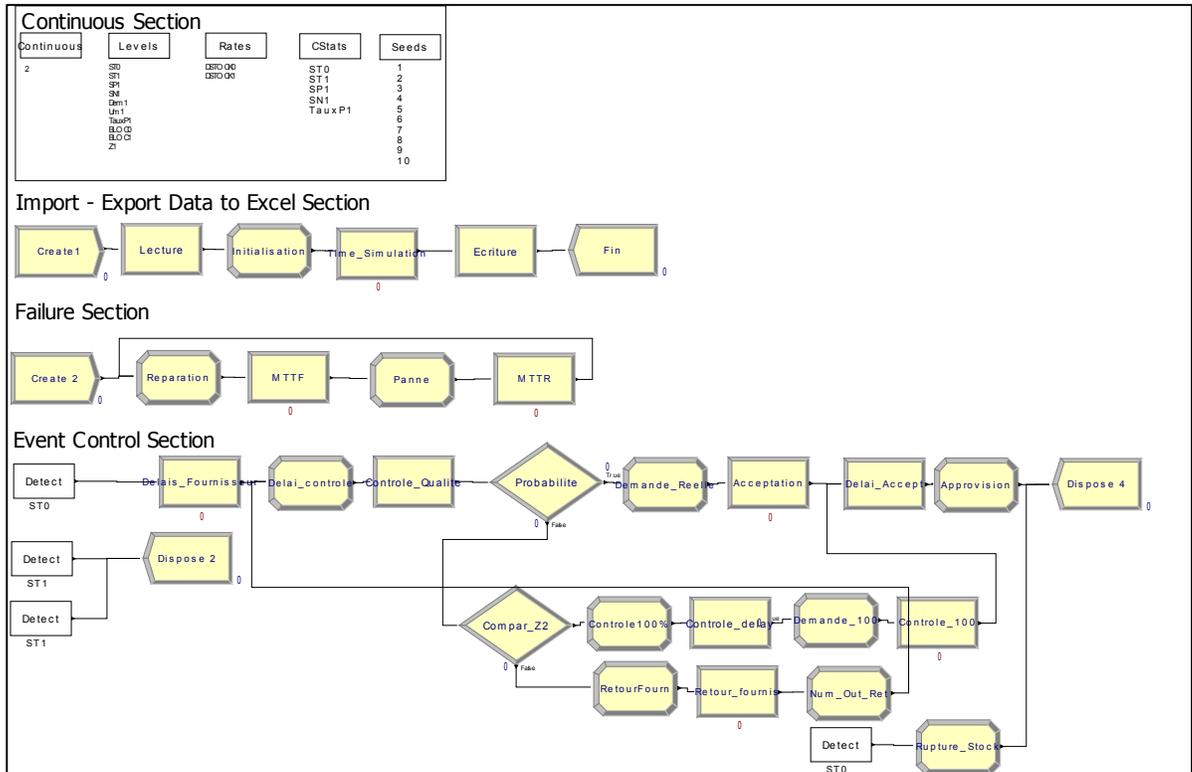


Figure A-III- 1 Modèle de simulation avec la politique hybride

Domaine expérimental

PROJECT, "M1P1 , Politique hybride", "Lamdjed Tolba",,,
No, Yes, No, No, No, No, No, No, No, No, No;

CONTINUOUS, 2,, 10e-3, 1,, RKF(.1, .1, Warning), Warning;

ATTRIBUTES: T_Simulation, DATATYPE(Real);

FILES:

File 1, "C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Hybride\ENTREE.xlsx", MSEXCEL2007,, Dispose,, Hold, RECORDSET(Recordset 1, "ENTR", 2);

File 2, "C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Hybride\SORTIE.xlsx", MSEXCEL2007,, Dispose,, Hold, RECORDSET(Recordset 1, "SORTIE", 2);

File 3,"C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Hybride\Dynamique1.xlsx",MSEXcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"Dynamique",2);

VARIABLES: Quantite_controle,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Dispose 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Z2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Dispose 24.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Probabilite.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Controle_100.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Retour_Fournis.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 a,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Create 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 n,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Num_Out_Ret_Four,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Politique,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 TauxRejet,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Num_Out_ctrl100,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Retour_Fournis.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Compar_Z2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Controle_100.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 MTTF.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Probabilite.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Compar_Z2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Delai_Accept.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Dispose 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 p1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTF.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 MTTR.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Delai_Accept.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Create1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Pa,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Time_Simulation.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Delai_Accept.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Stock_S,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Retour_Fournis.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Create 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Acceptation.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Controle100,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTR.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Delais_Fournisseur.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Controle_100.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Delais_Fournisseur.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):

DelaiQualite,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTR.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 MTTF.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Num_Commande,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Time_Simulation.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Quantite_C,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 STREAM,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 TEMPS,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Delais_Fournisseur.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Acceptation.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Num_Out_Accept,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Acceptation.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 p11,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Fin.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Time_Simulation.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Pa1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real);

SEEDS: 1,,Yes:
 2,,Yes:
 3,,Yes:
 4,,Yes:
 5,,Yes:
 6,,Yes:
 7,,Yes:
 8,,Yes:
 9,,Yes:
 10,,Yes;

CSTATS: 1,ST0,Stock premier,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Stock premier"):
 2,ST1,Total Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Total stock"):
 3,SP1,Positive Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Positive stock"):
 4,SN1,Negative Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Negative Stock"):
 5,TauxP1,TProduction;

REPLICATE, 405,,DaysToBaseTime(500000),Yes,Yes,,,,24,Days,No,No,,,No,Yes;

LEVELS: 1,ST0,:
 2,ST1,:
 3,SP1,:
 4,SN1,:
 5,Dem1,100:
 6,Um1,500:
 7,TauxP1,0:
 8,BLOC0,1:

9,BLOC1,1:
10,Z1;

RATES: 1,DSTOCK0:
2,DSTOCK1:

Modèle de simulation

```

; Model statements for module: BasicProcess.Create 1 (Create1)
;
35$ CREATE, 1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(36$);
36$ ASSIGN: Create1.NumberOut=Create1.NumberOut + 1:NEXT(2$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 4 (Lecture)
;
2$ READ, File 1,RECORDSET(Recordset 1):
    STREAM,
    Stock_S,
    Quantite_C,
    Z1,
    a,
    Pa,
    p1:NEXT(7$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 29 (Initialisation)
;
7$ ASSIGN: ST0=Quantite_C+Stock_S:
    T_Simulation=TFIN:
    Z2=Z1*a:
    n=99:
    Pa1=Pa/100:
    p11=p1/100:
    TauxRejet=0:NEXT(0$);

;
; Model statements for module: BasicProcess.Process 1 (Time_Simulation)
;
0$ ASSIGN: Time_Simulation.NumberIn=Time_Simulation.NumberIn + 1:
    Time_Simulation.WIP=Time_Simulation.WIP+1;
40$ DELAY: TFIN,,NVA;
87$ ASSIGN: Time_Simulation.NumberOut=Time_Simulation.NumberOut + 1:
    Time_Simulation.WIP=Time_Simulation.WIP-1:NEXT(6$);

;
; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 7 (Ecriture)
;
6$ WRITE, File 2,RECORDSET(Recordset 1):
    STREAM,
    Stock_S,
    Quantite_C,
    Z1,
    Z2,
    CAVG(Stock premier),
    CAVG(Positive Stock),

```

```

    CAVG(Negative Stock),
    Num_Commande,
    Num_Out_Accept,
    Num_Out_ctrl100,
    Num_Out_Ret_Four,
    CAVG(TProduction),
    TauxRejet:NEXT(1$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 3 (Fin)
;
1$    ASSIGN:    Fin.NumberOut=Fin.NumberOut + 1;
90$   DISPOSE:   Yes;

3$    DETECT:    ST1,Either,Z1,0.01:NEXT(4$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 16 (Dispose 2)
;
4$    ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
91$   DISPOSE:   Yes;

5$    DETECT:    ST1,Either,0,0.01:NEXT(4$);

8$    DETECT:    ST0,Negative,0,0.01:NEXT(9$);          Tolerance_Stock 0

;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 33 (Rupture_Stock)
;
9$    ASSIGN:    BLOC1=0:NEXT(15$);

;
; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 22 (Dispose 4)
;
15$   ASSIGN:    Dispose 4.NumberOut=Dispose 4.NumberOut + 1;
92$   DISPOSE:   Yes;

;
; Model statements for module: BasicProcess.Create 2 (Create 2)
;
93$   CREATE,    1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(94$);
94$   ASSIGN:    Create 2.NumberOut=Create 2.NumberOut + 1:NEXT(10$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 19 (Reparation)
;
10$   ASSIGN:    BLOC0=1:NEXT(11$);
; Model statements for module: BasicProcess.Process 5 (MTTF)
;
11$   ASSIGN:    MTTF.NumberIn=MTTF.NumberIn + 1;
        MTTF.WIP=MTTF.WIP+1;
98$   DELAY:    EXPO(1/0.1,STREAM),,VA;

```

```

145$    ASSIGN:    MTTF.NumberOut=MTTF.NumberOut + 1:
                MTTF.WIP=MTTF.WIP-1:NEXT(12$);
;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 20 (Panne)
;
12$    ASSIGN:    BLOC0=0:NEXT(13$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 6 (MTTR)
;
13$    ASSIGN:    MTTR.NumberIn=MTTR.NumberIn + 1:
                MTTR.WIP=MTTR.WIP+1;
149$   DELAY:    EXPO(1/0.9,STREAM),,VA;
196$   ASSIGN:    MTTR.NumberOut=MTTR.NumberOut + 1:
                MTTT.WIP=MTTR.WIP-1:NEXT(10$);

14$    DETECT:    ST0,Negative,Stock_S,0.01:NEXT(16$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 8 (Delais_Fournisseur)
;
16$    ASSIGN:    Delais_Fournisseur.NumberIn=Delais_Fournisseur.NumberIn + 1:
                Delais_Fournisseur.WIP=Delais_Fournisseur.WIP+1;
200$   DELAY:    EXPO(1,STREAM),,VA;
247$   ASSIGN:    Delais_Fournisseur.NumberOut=Delais_Fournisseur.NumberOut + 1:
                Delais_Fournisseur.WIP=Delais_Fournisseur.WIP-1:NEXT(25$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 41 (Delai_controle)
;
25$    ASSIGN:    DelaiQualite=n*0.000001:NEXT(26$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 1 (Controle_Qualite)
;
26$    DELAY:    DelaiQualite,,Other:NEXT(18$);
;
; Model statements for module: BasicProcess.Decide 2 (Probabilite)
;
18$    BRANCH,   1:
                With,(Pa)/100,250$,Yes:
                Else,251$,Yes;
250$   ASSIGN:    Probabilite.NumberOut True=Probabilite.NumberOut True + 1:NEXT(28$);

251$   ASSIGN:    Probabilite.NumberOut False=Probabilite.NumberOut False + 1:NEXT(20$);
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 42 (Demande_Reelle)
;
28$    ASSIGN:    Dem1=100/(1-p11):
                Quantite_controle=Quantite_C:NEXT(30$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 12 (Acceptation)
;
30$    ASSIGN:    Acceptation.NumberIn=Acceptation.NumberIn + 1:
                Acceptation.WIP=Acceptation.WIP+1;
253$   DELAY:    SecondsToBaseTime(Triangular(0,0,0)),,VA;
300$   ASSIGN:    Acceptation.NumberOut=Acceptation.NumberOut + 1:
                Acceptation.WIP=Acceptation.WIP-1:NEXT(19$);

```

```

;
; Model statements for module: BasicProcess.Process 9 (Delai_Accept)
;
19$    ASSIGN:    Delai_Accept.NumberIn=Delai_Accept.NumberIn + 1:
                Delai_Accept.WIP=Delai_Accept.WIP+1;
304$   DELAY:    0.02,,VA;
351$   ASSIGN:    Delai_Accept.NumberOut=Delai_Accept.NumberOut + 1:
                Delai_Accept.WIP=Delai_Accept.WIP-1:NEXT(17$);

;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 35 (Approvision)
;
17$    ASSIGN:    ST0=ST0+Quantite_Control:
                Num_Commande=Num_Commande+1:
                BLOC1=1:
                Num_Out_Accept=Acceptation.NumberOut:
                Num_Out_ctrl100=Controle_100.numberout:

TauxRejet=(Acceptation.NumberOut*p11)/(Acceptation.NumberOut+Controle_100.NumberOut):NEXT(15$);
;
; Model statements for module: BasicProcess.Decide 3 (Compar_Z2)
;
20$    BRANCH,   1:
                If,ST1.LT.Z2,354$,Yes:
                Else,355$,Yes;
354$   ASSIGN:    Compar_Z2.NumberOut True=Compar_Z2.NumberOut True + 1:NEXT(23$);
355$   ASSIGN:    Compar_Z2.NumberOut False=Compar_Z2.NumberOut False + 1:NEXT(24$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 39 (Controle100%)
;
23$    ASSIGN:    Controle100=(Quantite_C-n)*0.000001:NEXT(27$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 2 (Controle_delay)
;
27$    DELAY:    Controle100,,Other:NEXT(29$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 43 (Demande_100)
;
29$    ASSIGN:    Dem1=100/(1-Pa1*p11):
                Quantite_control=Quantite_C*(1-p11):NEXT(31$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 13 (Controle_100)
;
31$    ASSIGN:    Controle_100.NumberIn=Controle_100.NumberIn + 1:
                Controle_100.WIP=Controle_100.WIP+1;
357$   DELAY:    0.01,,VA;
404$   ASSIGN:    Controle_100.NumberOut=Controle_100.NumberOut + 1:
                Controle_100.WIP=Controle_100.WIP-1:NEXT(19$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 40 (RetourFourm)

```

```

;
24$    ASSIGN:    Dem1=100/(1-p11):NEXT(21$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Process 11 (Retour_Fournis)
;
21$    ASSIGN:    Retour_Fournis.NumberIn=Retour_Fournis.NumberIn + 1:
Retour_Fournis.WIP=Retour_Fournis.WIP+1;
408$   DELAY:    EXPO(1,STREAM),,VA;
455$   ASSIGN:    Retour_Fournis.NumberOut=Retour_Fournis.NumberOut + 1:
Retour_Fournis.WIP=Retour_Fournis.WIP-1:NEXT(22$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 37 (Num_Out_Ret)
;
22$    ASSIGN:    Num_Out_Ret_Four=Retour_fournis.numberout:NEXT(25$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Create 4 (Create 4)
;
458$   CREATE,   1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(1),1:NEXT(459$);
459$   ASSIGN:    Create 4.NumberOut=Create 4.NumberOut + 1:NEXT(32$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 44 (Assign 44)
;
32$    ASSIGN:    TEMPS=TNOW:NEXT(33$);
;
;    Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 8 (Write_Data_Dynamique)
;
33$    WRITE,    File 3,RECORDSET(Recordset 1):
TEMPS,
ST0,
ST1,
Stock_S,
Quantite_C,
Z1,
TauxP1,
Politique:NEXT(34$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Dispose 24 (Dispose 24)
;
34$    ASSIGN:    Dispose 24.NumberOut=Dispose 24.NumberOut + 1;
462$   DISPOSE:   Yes;

```

Routine C++

```

extern "C" void cdecl cstate ()
{
SMREAL    DSTOCK0;
SMREAL    DSTOCK1;
SMREAL    dST0;
SMREAL    dST1;
SMREAL    value;
SMREAL    dBLOC0;//Note: BLOC0 PANNE ET BLOC1 COMMANDE
SMREAL    dBLOC1;

```

```

SMREAL    dDem1;
SMREAL    dUm1;
SMREAL    dTauxP1;
SMREAL    dStock_S;
SMREAL    dZ1;
SMREAL    dZ2;

static SMINT ST0  =1; //Note: these numbers must match those
static SMINT ST1 =2; //   entered in the Levels and Rates
static SMINT SP1  =3; //   modules of HYBRIDE.doe
static SMINT SN1  =4;
static SMINT TauxP1 =5;
static SMINT Dem1  =6;
static SMINT Um1  =7;
static SMINT BLOC0 =8;
static SMINT BLOC1 =9;
static SMINT Z1   =10;
static SMINT Z2   =11;

// METRE AJOUR LE STOCK DU PRODUIT, CAS DE PANNE PAS DE PRODUCTION BLOC0==0

dST0 = getss(&ST0);
dBLOC0 = getss(&BLOC0);
dBLOC1 = getss(&BLOC1);
dDem1 = getss(&Dem1);
dUm1 = getss(&Um1);
dTauxP1 = getss(&TauxP1);
dZ1 = getss(&Z1);
dZ2 = getss(&Z2);
dST1 = getss(&ST1);
if (dST1 < dZ1)
{
    dTauxP1 = dUm1;
}
else
{
    dTauxP1 = dDem1;
}

DSTOCK0 = -dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setd(&ST0, &DSTOCK0);

DSTOCK1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1 - dDem1;
setd(&ST1, &DSTOCK1);

dTauxP1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setss(&TauxP1, &dTauxP1);

// INTEGRALE DANS LE TEMPS DE STOCK POSITIF ET STOCK NEGATIF

```

```
    if (dST1 >= 0)
    {
        value = dST1;
        setss(&SP1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SP1, &value);
    }
```

```
    if (dST1 < 0)
    {
        value = -dST1;
        setss(&SN1, &value);
    }
    else
    {
        value = 0;
        setss(&SN1, &value);
    }
```

```
return;
```

```
}
```

ANNEXE IV

MODÈLE DE SIMULATION DES SYSTÈMES MANUFACTURIERS NON-FIABLES AVEC SÉLECTION DE FOURNISSEURS

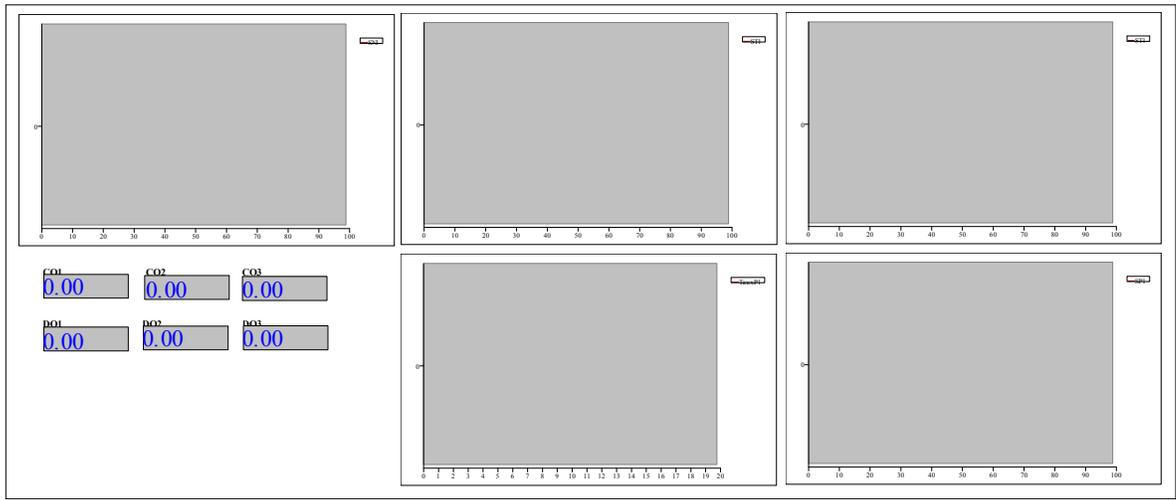


Figure A-IV- 1 Tableau de bord du modèle

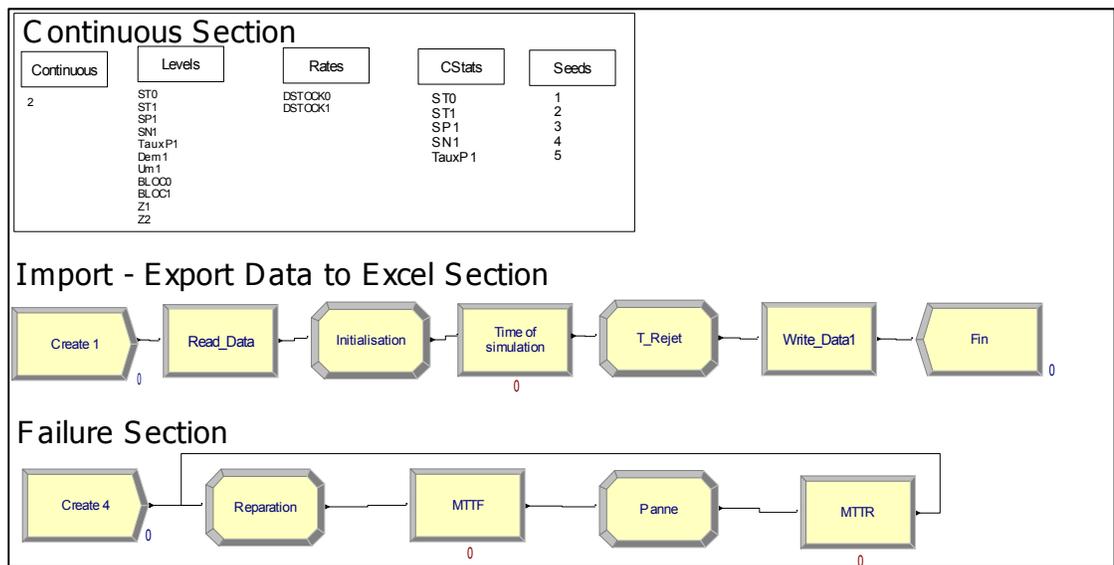


Figure A-IV-2 Modélisation section continu, données et panne/réparation

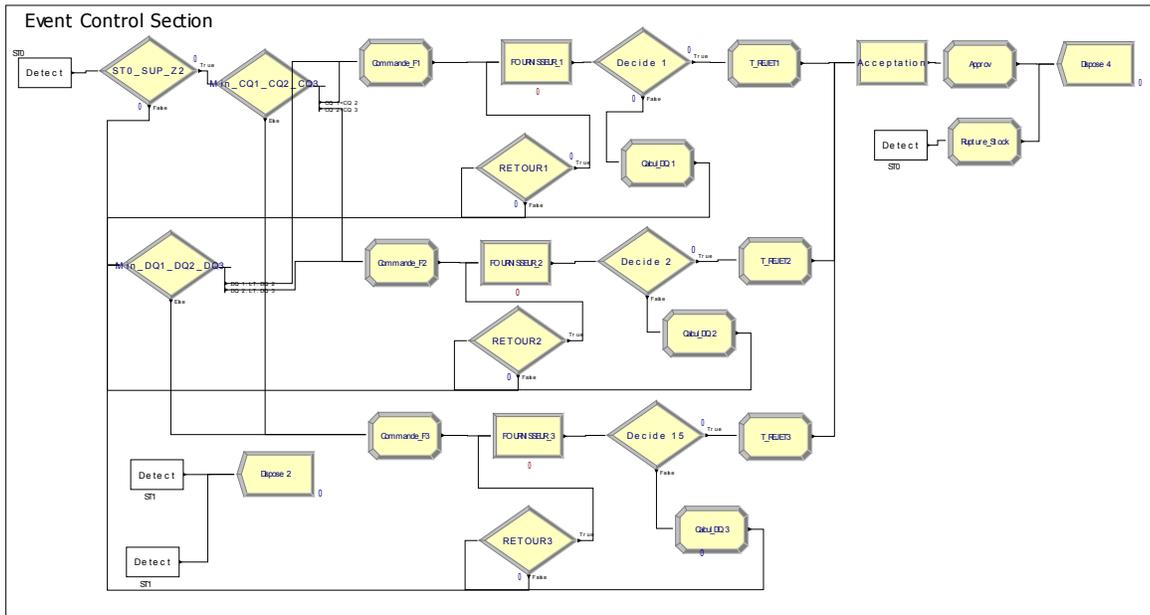


Figure A-IV-3 Modélisation de la section évènement et sélection fournisseurs

Domaine expérimental

PROJECT, "Sélection_3 Fournisseurs","Lamdjed Tolba",,
No,Yes,No,No,No,No,No,No,No,No;

CONTINUOUS, 2,,10e-2,1,,RKF(.1,.1,Warning),Warning;

ATTRIBUTES: T_Simulation,DATATYPE(Real);

FILES:

- File 1,"C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Four\Choix_Fournisseurs\Choix_trois_fournisseurs\ENTREE.xlsx", MSEXcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"data",2):
- File 2,"C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Four\Choix_Fournisseurs\Choix_trois_fournisseurs\SORTIE.xlsx", MSEXcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 2,"sorties",2):
- File 3,"C:\Documents and Settings\utolbla\Bureau\Four\Choix_Fournisseurs\Choix_trois_fournisseurs\Dynamique.xlsx" MSEXcel2007,,Dispose,,Hold,RECORDSET(Recordset 1,"Dynamique",2);

VARIABLES:

- Dispose 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
- C_Rejet1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
- C_Rejet2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
- C_Rejet3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
- Decide 2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
- REJ1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
- REJ2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
- REJ3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

p33,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Dispose 24.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 ST0_SUP_Z2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 L1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 L2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 L3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 a,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 FOURNISSEUR_3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 REJET1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 REJET2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 REJET3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 RETOUR3.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 FOURNISSEUR_2.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
 Exclude"),DATATYPE(Real):
 MTTF.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 N1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 N2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 N3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 RETOUR1.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Dispose 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Retour,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Nbr_Com_F1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 FOURNISSEUR_1.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Nbr_Com_F2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 Nbr_Com_F3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 FOURNISSEUR_3.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 p1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTF.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 Dynamique_Create.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 p2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 p3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTR.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Decide 15.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 ST0_SUP_Z2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Stock_S,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Decide 1.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 FOURNISSEUR_2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Create 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 CU_F1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 CU_F2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 CU_F3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 MTTR.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"),DATATYPE(Real):
 RETOUR2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Create 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Time of simulation.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 MTTR.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Time of simulation.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
 Exclude"),DATATYPE(Real):
 pa11,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

Decide 15.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 MTTF.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 FOURNISSEUR_1.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
 Exclude"),DATATYPE(Real):
 Marche,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 CQ1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 CQ2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 CQ3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 pa22,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Num_Commande,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 Quantite_C,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 Decide 2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 STREAM,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User
 Specified"),DATATYPE(Real):
 temps,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 pa33,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 RETOUR1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 RETOUR3.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Time of simulation.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 FOURNISSEUR_3.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-
 Exclude"),DATATYPE(Real):
 DQ1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 FOURNISSEUR_1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 DQ2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 DQ3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 FOURNISSEUR_2.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Decide 1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 p11,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 Fin.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 RETOUR2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 pa1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 pa2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 pa3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):
 p22,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),DATATYPE(Real):

SEEDS: 1,,Yes:
 2,,Yes:
 3,,Yes:
 4,,Yes:
 5,,Yes;

CSTATS: 1,ST0,Stock premier,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Stock premier");
 2,ST1,Total Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Total stock");
 3,SP1,Positive Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Positive stock");
 4,SN1,Negative Stock,,DATABASE("Continuous","User Specified","Negative Stock");
 5,TauxP1,TauxProduction,,DATABASE(,"Continuous",,"User Specified",,"Stock premier");

REPLICATE, 405,,DaysToBaseTime(500000),Yes,Yes,,24,Days,No,No,,No,No;

LEVELS: 1,ST0,:
 2,ST1,:

3,SP1,:
 4,SN1,:
 5,TauxP1:
 6,Dem1,100:
 7,Um1,500:
 8,BLOC0,1:
 9,BLOC1,1:
 10,Z1:
 11,Z2;

RATES: 1,DSTOCK0:
 2,DSTOCK1;

Modèle de simulation

```
; Model statements for module: BasicProcess.Create 1 (Create 1)
;
43$ CREATE, 1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(44$);
44$ ASSIGN: Create 1.NumberOut=Create 1.NumberOut + 1:NEXT(3$);
;
; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 4 (Read_Data)
;
3$ READ, File 1,RECORDSET(Recordset 1):
    STREAM,
    Stock_S,
    Quantite_C,
    Z1,
    a,
    Z2,
    L1,
    L2,
    L3,
    pa1,
    p1,
    pa2,
    p2,
    pa3,
    p3,
    CU_F1,
    CU_F2,
    CU_F3,
    C_Rejet1,
    C_Rejet2,
    C_Rejet3:NEXT(8$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 29 (Initialisation)
;
```

```

8$    ASSIGN:    ST0=Quantite_C+Stock_S:
                T_Simulation=TFIN:
                pa11=pa1/100:
                pa22=pa2/100:
                pa33=pa3/100:
                p11=p1/100:
                p22=p2/100:
                p33=p3/100:
                CQ1=L1*(CU_F1+(100/Quantite_C))/PA11:
                CQ2=L2*(CU_F2+(100/Quantite_C))/PA22:
                CQ3=L3*(CU_F3+(100/Quantite_C))/PA33:
                DQ1=0:
                DQ2=0:
                DQ3=0:NEXT(1$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Process 1 (Time of simulation)
;
1$    ASSIGN:    Time of simulation.NumberIn=Time of simulation.NumberIn + 1:
                Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP+1;
48$   DELAY:    TFIN,,NVA;
95$   ASSIGN:    Time of simulation.NumberOut=Time of simulation.NumberOut + 1:
                Time of simulation.WIP=Time of simulation.WIP-1:NEXT(28$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 41 (T_Rejet)
;
28$   ASSIGN:    REJ1=REJET1/TFIN:
                REJ2=REJET2/TFIN:
                REJ3=REJET3/TFIN:
                Num_Commande=Nbr_Com_F1 + Nbr_Com_F2+Nbr_Com_F3:NEXT(7$);

;    Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 7 (Write_Data1)
;
7$    WRITE,    File 2,RECORDSET(Recordset 2):
                STREAM,
                Stock_S,
                Quantite_C,
                Z1,
                Z2,
                CAVG(Stock premier),
                CAVG(Positive stock),
                CAVG(Negative stock),
                Num_Commande,
                Nbr_Com_F1,
                Nbr_Com_F2,
                Nbr_Com_F3,
                REJ1,
                REJ2,
                REJ3,
                CAVG(TauxProduction):NEXT(2$);

;
;    Model statements for module: BasicProcess.Dispose 3 (Fin)
;
2$    ASSIGN:    Fin.NumberOut=Fin.NumberOut + 1;

```

```

98$    DISPOSE:    Yes;

4$     DETECT:    ST1,Either,Z1,0.01:NEXT(5$);

;     Model statements for module: BasicProcess.Dispose 16 (Dispose 2)
;
5$     ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
99$    DISPOSE:    Yes;

6$     DETECT:    ST1,Either,0,0.01:NEXT(5$);

9$     DETECT:    ST0,Negative,stock_s,0.01:NEXT(20$);

;     Model statements for module: BasicProcess.Decide 6 (ST0_SUP_Z2)
;
20$    BRANCH,    1:
                If,ST1.GE.Z2,100$,Yes:
                Else,101$,Yes;
100$   ASSIGN:    ST0_SUP_Z2.NumberOut True=ST0_SUP_Z2.NumberOut True + 1:NEXT(23$);
101$   ASSIGN:    ST0_SUP_Z2.NumberOut False=ST0_SUP_Z2.NumberOut False + 1:NEXT(35$);

;     Model statements for module: BasicProcess.Decide 8 (Min_CQ1_CQ2_CQ3)
;
23$    BRANCH,    1:
                If,CQ1<CQ2,18$,Yes:
                If,CQ2<CQ3,19$,Yes:
                Else,30$,Yes;

;
;     Model statements for module: BasicProcess.Assign 48 (Commande_F3)
;
30$    ASSIGN:    Nbr_Com_F3=Nbr_Com_F3:NEXT(29$);

;     Model statements for module: BasicProcess.Process 9 (FOURNISSEUR_3)
;
29$    ASSIGN:    FOURNISSEUR_3.NumberIn=FOURNISSEUR_3.NumberIn + 1:
                FOURNISSEUR_3.WIP=FOURNISSEUR_3.WIP+1;
105$   DELAY:    EXPO(L3,STREAM),VA;
152$   ASSIGN:    FOURNISSEUR_3.NumberOut=FOURNISSEUR_3.NumberOut + 1:
                FOURNISSEUR_3.WIP=FOURNISSEUR_3.WIP-1:NEXT(34$);

;
;     Model statements for module: BasicProcess.Decide 15 (Decide 15)
;
34$    BRANCH,    1:
                With,(pa3)/100,155$,Yes:
                Else,156$,Yes;
155$   ASSIGN:    Decide 15.NumberOut True=Decide 15.NumberOut True + 1:NEXT(33$);
156$   ASSIGN:    Decide 15.NumberOut False=Decide 15.NumberOut False + 1:NEXT(31$);

;     Model statements for module: BasicProcess.Assign 50 (T_REJET3)

```

```

33$    ASSIGN:    REJET3=REJET3+(Quantite_C*p33):
                Nbr_Com_F3=Nbr_Com_F3+1:
                Dem1=100/(1-P33):NEXT(14$);

;    Model statements for module: AdvancedProcess.Delay 1 (Acceptation)
;
14$    DELAY:    0.02,,Other:NEXT(12$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 32 (Approv)
;
12$    ASSIGN:    ST0=ST0+Quantite_C:
                BLOC1=1:NEXT(10$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Dispose 21 (Dispose 4)
;
10$    ASSIGN:    Dispose 4.NumberOut=Dispose 4.NumberOut + 1;
157$   DISPOSE:  Yes;

;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 49 (Calcul_DQ3)
;
31$    ASSIGN:    DQ3=DQ3+L3*(1-pa33)**N3:
                N3=N3+1:NEXT(32$);

;
;    Model statements for module: BasicProcess.Decide 13 (RETOUR3)
;
32$    BRANCH,   1:
                If,ST1.GE.Z2,158$,Yes:
                Else,159$,Yes;
158$   ASSIGN:    RETOUR3.NumberOut True=RETOUR3.NumberOut True + 1:NEXT(29$);
159$   ASSIGN:    RETOUR3.NumberOut False=RETOUR3.NumberOut False + 1:NEXT(35$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Decide 16 (Min_DQ1_DQ2_DQ3)
;
35$    BRANCH,   1:
                If,DQ1.LT.DQ2,18$,Yes:
                If,DQ2.LT.DQ3,19$,Yes:
                Else,30$,Yes;

;
;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 34 (Commande_F1)
;
18$    ASSIGN:    Nbr_Com_F1=Nbr_Com_F1:NEXT(0$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Process 7 (FOURNISSEUR_1)
;
0$     ASSIGN:    FOURNISSEUR_1.NumberIn=FOURNISSEUR_1.NumberIn + 1:
                FOURNISSEUR_1.WIP=FOURNISSEUR_1.WIP+1;

163$   DELAY:    EXPO(L1,STREAM),,VA;
210$   ASSIGN:    FOURNISSEUR_1.NumberOut=FOURNISSEUR_1.NumberOut + 1:
                FOURNISSEUR_1.WIP=FOURNISSEUR_1.WIP-1:NEXT(15$);

;
;    Model statements for module: BasicProcess.Decide 1 (Decide 1)

```

```

15$    BRANCH,    1:
        With,(pa1)/100,213$,Yes:
        Else,214$,Yes;
213$   ASSIGN:    Decide 1.NumberOut True=Decide 1.NumberOut True + 1:NEXT(26$);

214$   ASSIGN:    Decide 1.NumberOut False=Decide 1.NumberOut False + 1:NEXT(21$);

;
;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 39 (T_REJET1)
;
26$    ASSIGN:    REJET1=REJET1+(Quantite_C*p11):
        Nbr_Com_F1=Nbr_Com_F1+1:
        Dem1=100/(1-P11):NEXT(14$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 36 (Calcul_DQ1)
;
21$    ASSIGN:    DQ1=DQ1+L1*(1-pa1)**N1:
        N1=N1+1:NEXT(24$);

; Model statements for module: BasicProcess.Decide 9 (RETOUR1)
;
24$    BRANCH,    1:
        If,ST1.GE.Z2,215$,Yes:
        Else,216$,Yes;
215$   ASSIGN:    RETOUR1.NumberOut True=RETOUR1.NumberOut True + 1:NEXT(0$);

216$   ASSIGN:    RETOUR1.NumberOut False=RETOUR1.NumberOut False + 1:NEXT(35$);
;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 35 (Commande_F2)
19$    ASSIGN:    Nbr_Com_F2=Nbr_Com_F2:NEXT(16$);

; Model statements for module: BasicProcess.Process 8 (FOURNISSEUR_2)
;
16$    ASSIGN:    FOURNISSEUR_2.NumberIn=FOURNISSEUR_2.NumberIn + 1:
        FOURNISSEUR_2.WIP=FOURNISSEUR_2.WIP+1;
218$   DELAY:    EXPO(L2,STREAM),,VA;
265$   ASSIGN:    FOURNISSEUR_2.NumberOut=FOURNISSEUR_2.NumberOut + 1:
        FOURNISSEUR_2.WIP=FOURNISSEUR_2.WIP-1:NEXT(17$);

;
; Model statements for module: BasicProcess.Decide 2 (Decide 2)
;
17$    BRANCH,    1:
        With,(pa2)/100,268$,Yes:
        Else,269$,Yes;
268$   ASSIGN:    Decide 2.NumberOut True=Decide 2.NumberOut True + 1:NEXT(27$);

269$   ASSIGN:    Decide 2.NumberOut False=Decide 2.NumberOut False + 1:NEXT(22$);

; Model statements for module: BasicProcess.Assign 40 (T_REJET2)
;

```

```

27$    ASSIGN:    REJET2=REJET2+(Quantite_C*p22):
                Nbr_Com_F2=Nbr_Com_F2+1:
                Dem1=100/(1-P22):NEXT(14$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 37 (Calcul_DQ2)
;
22$    ASSIGN:    DQ2=DQ2+L2*(1-pa22)**N2:
                N2=N2+1:NEXT(25$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Decide 10 (RETOUR2)
;
25$    BRANCH,    1:
                If,ST1.GE.Z2,270$,Yes:
                Else,271$,Yes;
270$    ASSIGN:    RETOUR2.NumberOut True=RETOUR2.NumberOut True + 1:NEXT(16$);
271$    ASSIGN:    RETOUR2.NumberOut False=RETOUR2.NumberOut False + 1:NEXT(35$);

11$    DETECT:    ST0,Negative,0,0.01:NEXT(13$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 33 (Rupture_Stock)
;
13$    ASSIGN:    BLOC1=0:NEXT(10$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Create 4 (Create 4)
;
272$    CREATE,    1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 2:DaysToBaseTime(EXPO(1)),1:NEXT(273$);
273$    ASSIGN:    Create 4.NumberOut=Create 4.NumberOut + 1:NEXT(36$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 53 (Reparation)
;
36$    ASSIGN:    BLOC0=1:NEXT(37$);
;
;    Model statements for module: BasicProcess.Process 12 (MTTF)
;
37$    ASSIGN:    MTTF.NumberIn=MTTF.NumberIn + 1:
                MTTF.WIP=MTTF.WIP+1;
277$    DELAY:    EXPO(1/0.1,STREAM),,VA;
324$    ASSIGN:    MTTF.NumberOut=MTTF.NumberOut + 1:
                MTTF.WIP=MTTF.WIP-1:NEXT(38$);

;    Model statements for module: BasicProcess.Assign 54 (Panne)
;
38$    ASSIGN:    BLOC0=0:NEXT(39$);
;    Model statements for module: BasicProcess.Process 13 (MTTR)
;
39$    ASSIGN:    MTTR.NumberIn=MTTR.NumberIn + 1:
                MTTR.WIP=MTTR.WIP+1;
328$    DELAY:    EXPO(1/0.9,STREAM),,VA;
375$    ASSIGN:    MTTR.NumberOut=MTTR.NumberOut + 1:
                MTTR.WIP=MTTR.WIP-1:NEXT(36$)

```

```

; Model statements for module: BasicProcess.Create 7 (Dynamique_Create)
;
378$ CREATE, 1,DaysToBaseTime(0.0),Entity 1:DaysToBaseTime(1):NEXT(379$);
379$ ASSIGN: Dynamique_Create.NumberOut=Dynamique_Create.NumberOut + 1:NEXT(40$);
;
; Model statements for module: BasicProcess.Assign 58 (Assign 58)
;
40$ ASSIGN: temps=TNOW:NEXT(41$);

; Model statements for module: AdvancedProcess.ReadWrite 10 (Write_Data_Dynamique)
;
41$ WRITE, File 3,RECORDSET(Recordset 1):
      temps,
      ST0,
      ST1,
      Stock_S,
      Quantite_C,
      Z1,
      TauxP1,
      Marche,
      Retour:NEXT(42$);

; Model statements for module: BasicProcess.Dispose 24 (Dispose 24)
;
42$ ASSIGN: Dispose 24.NumberOut=Dispose 24.NumberOut + 1;
382$ DISPOSE: Yes;

```

Routine C++

```

extern "C" void cdecl cstate ()
{
  SMREAL DSTOCK0;
  SMREAL DSTOCK1;
  SMREAL dST0;
  SMREAL dST1;
  SMREAL value;
  SMREAL dBLOC0;//Note: BLOC0 PANNE ET BLOC1 COMMANDE
  SMREAL dBLOC1;
  SMREAL dDem1;
  SMREAL dUm1;
  SMREAL dTauxP1;
  SMREAL dStock_S;
  SMREAL dZ1;
  SMREAL dZ2;

  static SMINT ST0 =1; //Note: these numbers must match those
  static SMINT ST1 =2; // entered in the Levels and Rates
  static SMINT SP1 =3; // modules of HYBRIDE.doe
  static SMINT SN1 =4;
  static SMINT TauxP1 =5;

```

```

static SMINT Dem1 =6;
static SMINT Um1 =7;
static SMINT BLOC0 =8;
static SMINT BLOC1 =9;
static SMINT Z1 =10;
static SMINT Z2 =11;

// METTRE AJOUR LE STOCK DU PRODUIT, CAS DE PANNE PAS DE PRODUCTION BLOC0==0

dST0 = getss(&ST0);
dBLOC0 = getss(&BLOC0);
dBLOC1 = getss(&BLOC1);
dDem1 = getss(&Dem1);
dUm1 = getss(&Um1);
dTauxP1 = getss(&TauxP1);
dZ1 = getss(&Z1);
dZ2 = getss(&Z2);
dST1 = getss(&ST1);
if (dST1 < dZ1)
{
    dTauxP1 = dUm1;
}

else
{
    dTauxP1 = dDem1;
}

DSTOCK0 = -dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setd(&ST0, &DSTOCK0);

DSTOCK1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1 - dDem1;
setd(&ST1, &DSTOCK1);

dTauxP1 = dTauxP1 * dBLOC0 * dBLOC1;
setss(&TauxP1, &dTauxP1);

// INTEGRALE DANS LE TEMPS DE STOCK POSITIF ET STOCK NEGATIF

if (dST1 >= 0)
{
    value = dST1;
    setss(&SP1, &value);
}
else
{
    value = 0;
    setss(&SP1, &value);
}

if (dST1 < 0)
{
    value = -dST1;
}

```

```
    setss(&SN1, &value);  
    }  
    else  
    {  
        value = 0;  
        setss(&SN1, &value);  
    }  
    return;  
    }
```


BIBLIOGRAPHIE

- Akella, R., & Kumar, P.R. (1986). Optimal Control of Production Rate in a Failure Prone Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(2), p. 116-126.
- Bai, S.X., & Elhafsi, M. (1997). Scheduling of an unreliable manufacturing system with non-resumable set-ups. *Computers Ind. Eng.*, 32, p. 909-925.
- Baillargeon, G. (1995). *Plans d'échantillonnage en contrôle de la qualité : contrôle par attributs*. Trois-Rivières, Québec: Éditions SMG.
- Barlow, R. E. & Hunter, L. (1960). Optimal preventive maintenance policies. *Operations Research*, 8, p. 90-100.
- Berthaut, F., Gharbi, A., Kenné, J. P., & Boulet, J. F. (2010). Improved joint preventive maintenance and hedging point policy. *International Journal of Production Economics*, 127(1), p. 60-72.
- Besterfield, D. H. (2009). *Quality Control*, 8th Ed. Prentice Hall.
- Bielecki, T., & Kumar, P. (1988). Optimality of zero-inventory policies for unreliable manufacturing systems. *Operations research*, 36(4), 532-541.
- Boukas, E.K., & Haurie, A. (1990). Manufacturing Flow Control and Preventive Maintenance: A Stochastic Control Approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(9), p. 1024-1031.
- Bousslah, B., Gharbi, A., Pellerin, R., & Hajji, A. (2011). Optimal production control policy in unreliable batch processing manufacturing systems with transportation delay Submitted to the *International Journal of Production Research*.
- Caramanis, M., & Sharifnia, A. (1991). Near Optimal Manufacturing Flow Controller Design. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3, p. 321-336.
- Càrdenas-Barròn, L.E., 2000. Observation on: Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics* 67 (2), 201.
- Chan, H.K., Chan, F.T.S., (2010). A review of coordination studies in the context of supply chain dynamics. *International Journal of Production Research* 48 (10), 2793-2819.
- Chiu, S. W., Wang, S. L., & Chiu, Y. S. P. (2007). Determining the optimal run time for EPQ model with scrap, rework, and stochastic breakdowns. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 664-676.

- Chuang, C.L., (2004). Supplier selection and order allocation in supply chain management. Ph.D. Thesis. The University of Iowa.
- Feng, Y. & Yan, H. (2000). Optimal Production Control in a Discrete Manufacturing System with Unreliable Machines and Random Demands. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(11), p. 2280-2296.
- Gershwin, S. B. (1994). *Manufacturing systems engineering*: Prentice Hall
- Gharbi, A., & Kenné, J. (2000). Production and preventive maintenance rates control for a manufacturing system: an experimental design approach. *International Journal of Production Economics*, 65(3), 275-287.
- Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2003). Optimal production control problem in stochastic multiple-product multiple-machine manufacturing systems. *IEEE Transactions*, 35, p. 941-952.
- Gharbi, A., Kenné, J. P., & Hajji, A., (2006). Operational level-based policies in production rate control of unreliable manufacturing systems with set-ups. *International Journal of Production Research*, 44 (3), p. 545-567.
- Gharbi, A., Kenné, J. P. & Beit, M. (2007). Optimal safety stocks and preventive maintenance periods in unreliable manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 107, p. 422-434.
- Gharbi, A., Hajji, A., & Dhouib, K., (2011). Production rate control of an unreliable manufacturing cell with adjustable capacity. *International Journal of Production Research*, 49(21), p. 6539-6557.
- Groenevelt, H., Pintelon, L., & Seidmann, A. (1992a). Production Lot Sizing with Machine Breakdowns. *Management Science*, 38, 104-123.
- Hajji, A., Gharbi, A., & Kenné, J. P. (2004). Production and set-up control of a failure-prone manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 33(7), p. 620-625.
- Hajji, A., Gharbi, A., & Kenné, J. (2009). Joint replenishment and manufacturing activities control in a two stage unreliable supply chain. *International Journal of Production Research*, 47(12), 3231-3251.
- Hajji, A., Gharbi, A., & Kenne, J. (2010). Joint production and supply control in three levels flexible manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 21(2), 195- 204.

- Hajji, A., Gharbi, A., Kenné, J. P., & Pellerin, R. (2010). Production control and replenishment strategy with multiple suppliers. *European Journal of Operational Research*, 67-74.
- Harris, F. (1913). How many parts to make at once. *Factory, Mag. Manage.* 10 (152) (1913) 135–136, 152.
- Huang, C.K., (2004). An optimal policy for a single-vendor single buyer integrated production–inventory problem with process unreliability consideration. *International Journal of Production Economics*, 91 (1), 91–98.
- Kelton, W. David, Randall P. Sadowski, & David T. Sturrock. (2007). *Simulation with Arena*. 4th edition. New York : The McGraw-Hill Companies, 630 p.
- Kenné, J. P. & Gharbi, A. (1999). Experimental design in production and maintenance control problem of a single machine, single product manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 37 (3), p. 621-637.
- Kenné, J. P. & Gharbi, A. (2000). Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control*, 11 (6), p. 581-588.
- Kenné, J., & Gharbi, A. (2001). A simulation optimization approach in production planning of failure prone manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12(5), 421-431.
- Kenné, J.P., Boukas, E.K., and Gharbi, (2003). Control of production and corrective maintenance rates in a multiple-machine,multiple-product manufacturing system *Mathematical and Computer Modelling*, 38 (3),pp. 307-318.
- Kim, C. H., Hong, Y., & Kim, S-Y. (1997). An extended optimal lot sizing model with an unreliable machine. *Production Planning & Control*, 8(6), 577-585.
- Kimemia, J. & Gershwin, S.B. (1983). An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System. *IIE Transactions*, 15(4), p. 353-362.
- Koren, Y., Jovane, F., Heisel, U., Moriwaki,, T., Pritschow G., Ulsoy G., & VanBrussel, H. (1999) Reconfigurable Manufacturing Systems. *A Keynote paper. CIRP Annals*, 48 (2), p. 6-12.
- Kushner, H.J., & Dupuis, P.G., (1992). *Numerical Methods for Stochastic Control Problems in Continuous Time*. New York: Springer-Verlag.

- Lavoie, P., Kenné, J. P., & Gharbi, A. (2007). Production control and combined discrete continuous simulation modeling in failure-prone transfer lines. *International Journal of Production Research*, 45(24), p. 5667-5685.
- Lavoie, P., Gharbi, A. & Kenné, J. P. (2010). A comparative study of pull control mechanisms for unreliable homogenous transfer lines. *International Journal of Production Economics*, 124, p. 241–251.
- Lee, E.K., Ha, S., Kim, S.K, (2001). Supplier selection and management system considering relationships in supply chain management. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48 930, 307-318.
- Lee, H. L., & Rosenblatt, M. J. (1987). Simultaneous determination of production cycle and inspection schedules in a production systems. *Management Science*, 1125-1136.
- Liao, G. L., Chen, Y. H., & Sheu, S. H. (2009). Optimal economic production quantity policy for imperfect process with imperfect repair and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 195(2), 348-357.
- McClain, J. O., Thomas, L. J., & Mazzola, J. B. (1985). *Operations Management*: Prentice Hall.
- Moinzadeh, K., Nahmias, S., 1988. A continuous review model for an inventory system with two supply modes. *Management science* 34, 761-773.
- Montgomery, D.C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*, 7th ed., New York : John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2009). Introduction to statistical quality control, 6th Ed. NY: Wiley
- Myers, R. H., Anderson-Cook, C. M., & Montgomery, D. C. (2009). Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments, 3rd Ed. NJ: John Wiley & Sons.
- Olsder, G. J., & Suri, R. (1980). Time-optimal control of parts-routing in a manufacturing system with failure-prone machines. *Proceedings of the 19th conference on decision and control*. Albuquerque, NM.
- Parlar, M., Perry, D., 1995. Analysis of a (Q,r,T) inventory policy with deterministic and random yields when future supply is uncertain. *European Journal of Operational Research* 84, 431-443.
- Parlar, M., Perry, D., 1996. Inventory models of future supply uncertainty with single and multiple suppliers. *Naval research Logistics* 43, 191-210.

- Pegden, C. D., Shannon, R. E., Sadowski, R. P., & Corp, S. M. (1995). *Introduction to simulation using SIMAN* : McGraw-Hill.
- Porteus, E. L. (1990). The impact of inspection delay on process and inspection lot sizing *Management Science*, 999-1007.
- Richel, R. (1975). Dynamic programming and minimum principles for systems with jump Markov disturbances. *SIAM Journal on Control*, 13, p. 338–371.
- Rosenblatt, M. J., & Lee, H. L. (1986). Economic production cycles with imperfect production processes. *IIE Transactions*, 18(1), 48-55.
- Salameh, M., & Jaber, M. (2000). Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 59-64.
- Schilling, E. G., & Neubauer, D. V. (2009). *Acceptance sampling in quality control* Chapman & Hall/CRC.
- Sethi, S. P., Suo, W., Taksar, M. I., & Yan, H. (1998). Optimal Production Planning in a Multi-Product Stochastic Manufacturing System with Long-Run Average Cost. *Discrete Event Dynamic Systems*, 8(1), 37-54.
- Sethi, S. P., Suo, W., Taksar, M. I., & Yan, H. (1998). Optimal Production Planning in a Multi-Product Stochastic Manufacturing System with Long-Run Average Cost. *Discrete Event Dynamic Systems*, 8(1), 37-54.
- Sethi, S. P., & Zhang, Q., (1999). Average-Cost Optimal Policies for an Unreliable Flexible Multiproduct Machine. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, p. 147–157.
- Sharifnia, A. (1988). Production Control of a Manufacturing System with Multiple Machine States. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-33(7), p. 600–626.
- Shih, W., 1980. Optimal inventory policies when stockouts result from defective products *International Journal of Production Research* 18 (6), 677–686.
- Silver, E.A., (1976). Establishing the reorder quantity when the amount received is uncertain. *INFOR* 14 (1), 32–39.
- Tan, K.C., Kannan, V.R., Handfield, R.B., (1998). Supply chain management : Supplier performance and firm performance. *International Journal of Purchasing and Materials Management* 34 (3), 2-9.
- Wee, H.M., Yu, J., Chen, M.C., (2007). Optimal inventory model for items with imperfect quality and shortage backordering. *Omega* 35 (1), 7–11.

Whittle, P. (1996). *Optimal Control : Basics and Beyond*. New York : John Wiley & Sons, 474 p.

Zhang, V.L, (1996). Ordering policies for an inventory system with three supply modes
Naval research Logistics 43, 691-708.