جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre : 22 / 2020

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par :

Mme. DOUIRI LAMIAE

Spécialité : Génie Industriel

Sujet de la thèse :

Modélisation et optimisation des réseaux des chaînes logistiques considérant le coût de la qualité

Formation Doctorale : Sciences de l'ingénieur Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique.

Thèse présentée et soutenue le 18 Juillet 2020 à 10h30 au centre de Conférences devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Pr. Ahmed EL BIYAALI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Pr. Khalifa MANSOURI	PES	ENSET Mohammedia	Rapporteur
Pr. Abdelali ENNADI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Pr. Abdelmajid DAYA	PH	Faculté des Sciences et Techniques Errachidia	Rapporteur
Pr. Nabil MOUJIBI	PH	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Examinateur
Pr. Abdelouahhab JABRI	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Pr. Abdellah EL BARKANY	PES	Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Génie Mécanique

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

A mes parents
A tous ceux qui me sont Chers

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un travail laborieux qui a été réalisé dans le cadre du CEDoc : Sciences de l'ingénieur, Sciences Physiques, Mathématiques et Informatiques, au laboratoire Génie Mécanique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès. Coutumièrement, cette thèse de doctorat réalisée avec beaucoup de soin et d'attention, est considérée comme un travail essentiellement individuel. Cependant, ce projet ne pouvait pas être à terme sans le support et les encouragements de plusieurs personnes.

En préambule, Je voudrais exprimer ma reconnaissance dans ces quelques lignes, envers toute personne m'ayant aidée, soutenue et accompagnée durant toutes ces années de thèse.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Ahmed EL BIYAALI d'avoir accepté de présider mon Jury de thèse ainsi que Messieurs les Professeurs Khalifa MANSOURI, Abdelali ENNADI et Abdelmajid DAYA d'avoir accepté la lourde tâche d'être rapporteurs de ce mémoire. Je remercie également Messieurs les professeurs Nabil MOUJIBI et Abdelouahhab JABRI d'avoir bien voulu s'intéresser et participer à l'évaluation de ce travail en tant qu'examinateurs.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur le professeur Mustapha IJJAALI, Doyen de la FST de Fès, pour m'avoir assuré un environnement favorable pour mes travaux de recherche. Je remercie encore Monsieur le Professeur El Mestafa EL HADRAMI, Vice-Doyen chargé de la recherche, de la formation continue et des relations extérieures pour son soutien permanent et sa disponibilité.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur le Professeur Abdellah EL BARKANY, pour avoir dirigé mes travaux avec beaucoup de disponibilité, de tact et d'intérêt, et aussi pour sa très grande ouverture face à mes conditions de travail et la confiance qu'il a eu en mes capacités à rendre à terme tous mes projets. Je voudrais également exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur Abdelouahhab JABRI, Codirecteur de thèse, pour avoir dirigé mes travaux avec beaucoup de disponibilité et d'intérêt. J'ai particulièrement apprécié la pertinence de ses conseils et ses commentaires, toujours judicieux et rigoureux et ses encouragements à entreprendre et à mener à terme cette thèse.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, ainsi que les intervenants professionnels responsables pour avoir assuré différentes formations dont j'ai bénéficié durant ces années de thèse.

Je remercie aussi toute l'équipe Management et Optimisation des systèmes de production MOPS qui est plus qu'une simple équipe de recherche, car j'y ai trouvé un excellent cadre de travail et un climat très convivial et favorable pour l'avancement de mes recherches.

Mes remerciements vont également à mes parents et tous les membres de ma famille, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Je remercie aussi toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

Finalement, je souhaite bonne lecture à tous ceux et à toutes celles qui auront ce document entre les mains un jour ou l'autre.

Résumé

Plus que jamais, la compétitivité et le succès d'une entreprise de fabrication industrielle ou agroalimentaire dépendent énormément de l'efficacité et de l'efficience de son réseau de chaîne logistique. Ce dernier doit être conçu et configuré de manière à minimiser les coûts tout en maintenant un bon niveau de qualité afin de garantir la satisfaction du client en termes de coût et de qualité.

Dans cette thèse, le coût de la qualité est considéré comme une mesure de performance clé révélatrice, qui doit être intégrée dans le processus de modélisation du réseau. Le but principal de notre contribution est d'abord d'étudier un modèle de calcul du coût de la qualité (COQ) d'une chaîne logistique en série à trois échelons. Le modèle proposé traite l'impact de divers paramètres tels que le taux d'erreur d'inspection, le taux de défaillance chez les fournisseurs et le taux de reprise sur la fonction COQ, ainsi que sur le niveau de qualité général, et l'effet de ces variables internes sur les catégories COQ suivant la classification P-A-F. Une méthode basée sur un algorithme génétique (GA) a été développée pour optimiser le modèle afin de déterminer le point COQ optimal réduisant les coûts pour l'ensemble de la chaîne logistique tout en maintenant un niveau de qualité global QL. Les résultats obtenus avec la méthode des algorithmes génétiques sont illustrés par des exemples numériques pour mettre en évidence l'utilisation de ces paramètres sur la SC et aider les managers à sélectionner les fournisseurs et les détaillants fiables, et à gérer le coût de la qualité tout au long de la chaîne logistique.

La deuxième contribution de notre recherche porte sur la chaîne logistique alimentaire, dans laquelle les gestionnaires ont le défi de prendre des décisions importantes, liées à l'optimisation des coûts relatifs aux conditions de transport et de stockage. Une gestion efficace des produits alimentaires nécessite de prendre en compte leur nature périssable pour résoudre le problème de sécurité et demande aussi des efforts logistiques visant à réduire le coût total tout en maintenant la qualité des produits alimentaires au-dessus des niveaux acceptables. Dans ce contexte, nous abordons une méthodologie pour résoudre un modèle habilité pour la chaîne logistique alimentaire (FSC). Le modèle est un problème de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes sous contrainte (MINLP) qui calcule le coût de la qualité en interne pour un FSC à trois échelons, afin de minimiser le coût total sous les contraintes de niveau de qualité global, en raison du caractère périssable des produits, et des autres contraintes de la demande, de la capacité, de l'équilibre des flux et des coûts. L'application pratique du modèle est démontrée à l'aide de deux approches : une méthode exacte basée sur la technique Branch & Bound et une méthode de résolution d'algorithme génétique. Le calcul de l'écart entre les deux approches a donné un GAP de 1.37% et de 2.71% pour une dégradation de qualité égale à 3% et 30% respectivement, ce qui signifie que les performances de AG développé sont meilleures comparé au solveur, surtout lorsque la dégradation de qualité est faible.

Nous proposons ensuite une comparaison des différentes stratégies de sélection de l'AG, telles que le tournoi, l'échantillonnage stochastique sans remplacement et la sélection du tournoi de Boltzmann ; la performance de chaque méthode de sélection est étudiée à l'aide d'un «test-t» couplé d'analyse statistique ANOVA. Les résultats des tests numériques sont rapportés et discutés, et des implications et des idées pour les gestionnaires sont fournies en étudiant des exemples de taille pratique et réelle. D'après l'analyse statistique, il était évident que la sélection du tournoi était plus susceptible de produire une meilleure performance que les autres stratégies de sélection.

Mots clés : Chaîne logistique, chaîne logistique alimentaire, coût de la qualité, optimisation, algorithme génétique, recuit simulé, stratégies de sélection, ANOVA.

Abstract

More than ever before, competitiveness and success of an industrial or agrifood manufacturing company depends heavily on how effective and efficient is its network supply chain. The latter must be designed and configured in such a way as to minimize cost while maintaining a good overall quality level to guarantee customer satisfaction in terms of cost and quality.

In this thesis, the cost of quality is considered a revealing key performance measure, which must be integrated into the process of designing and configuration of the network. The main purpose of our contribution is first to study a model for computing the Cost of Quality (COQ) across a single-product three-echelon serial Supply Chain (SC). The proposed model deals with the impact of various parameters such as inspection error rate, fraction defective at suppliers and rework rate on the COQ function as well as the overall quality level, and the effect that these internal variables has on the COQ categories according to the P-A-F classification. A Genetic Algorithm (GA) based method was developed to optimize the model for determining the optimal COQ point that reduces costs for the whole Supply Chain while maintaining an overall quality level QL. Results obtained from Genetic Algorithms method are illustrated with numerical examples to highlight the use of these parameters on SC and provide an aid for decision makers to select reliable suppliers and retailers from among many and manage the cost of quality across the logistic route.

The second contribution of our research focuses on food supply chain, in which managers face the challenge of making important cost optimized decisions relating to transportation and storage conditions. An efficient management of food products requires the consideration of their perishable nature to solve the safety problem, and logistics efforts in minimizing the total cost while maintaining the quality of food products above acceptable levels. In this context, we address a methodology to resolve a capacitated model for food supply chain (FSC). The model is a constrained mixed integer nonlinear programming problem (MINLP) that computes the cost of quality internally for a three echelon FSC, to minimize the total cost under overall quality level constraints, due to the perishable nature of the products, and the other constraints of demand, capacity, flow balance, and cost. The practical application of the model is demonstrated using two approaches: an exact method based on the Branch & Bound technique, and a Genetic Algorithm solution method. The average gaps between GA and CPLEX are 1, 5% and 2, 71% for a quality degradation of 3% and 30% respectively. It means that GA perform better compared to the solver, especially when quality degradation is smaller.

Then we propose a comparison of different GA selection strategies, such as Tournament, Stochastic Sampling without Replacement and Boltzmann tournament selection; the performance of each selection method is studied using paired “T-Test” of statistical analysis ANOVA. The results of computational testing are reported and discussed, and implications and insights for managers are provided by studying instances of practical and realistic size. It was evident that the tournament selection is more likely to produce a better performance than the other selection strategies.

Key Words: Supply chain, food supply chain, cost of quality, optimization, genetic algorithm, simulated annealing, selection strategies, ANOVA.

Table des matières

Remerciements 3
Résumé 4
Abstract 5
Table des matières 6
Liste des figures 10
Liste des tableaux 12
Liste des algorithmes 14
Acronymes 15
Chapitre 1 : Problématique d'optimisation des réseaux des chaînes logistiques considérant le coût de la qualité 19
1.1 Introduction 20
1.2 Revue de littérature sur le COQ 21
1.2.1. Contexte et définition du COQ 21
1.2.2. Analyse historique de l'évolution de l'économie et du coût de la qualité 22
1.2.3. Modèles du COQ 24
1.2.3.1 Modèle de Juran 25
1.2.3.2 Modèle de Lesser 26
1.2.3.3 P-A-F ou Modèle de Crosby 26
1.2.3.4 Modèle révisé de Juran 27
1.2.3.5 Modèle de coût d'opportunité 28
1.2.3.6 Modèle de coût de processus 29
1.2.3.7 Modèle de coût basé sur l'activité (ABC) 30
1.3 Conception des réseaux de chaîne logistique SCND 31
1.3.1. Définition de la chaîne logistique 31
1.3.1.1 Structure physique de la chaîne logistique 31
1.3.2. Management de la chaîne logistique SCM 33
1.3.2.1 Définition de la SCM 33
1.3.2.2 Systèmes décisionnels 34
1.4 Conception des SCND ..... **Erreur ! Signet non défini.**
1.4.1. Les mesures de performance dans la SCND 37
1.4.2. Intégration du COQ comme mesure de performance dans la conception des SCND 38
1.5 Problèmes d'optimisation de la SCND 40
1.5.1 Définition 40

1.5.2 Classification des problèmes d'optimisation 41
1.5.3 Optimisation de la SCND 43
1.5.4 Orientation de nos travaux de recherche 46
1.6 Conclusion 52
Chapitre 2 : Modèle d'optimisation du coût de la qualité dans une chaîne logistique en série 53
2.1 Introduction 54
2.2 Définition du problème d'optimisation 54
2.2.1 Pertinence de cette étude 54
2.2.2 Description du problème 55
2.2.3 Hypothèses 56
2.3 Développement d'un modèle de conception d'une chaîne logistique intégrant le Coût de la qualité 57
2.3.1 Variables du modèle 59
2.3.2 Expressions mathématiques 60
2.3.3 Calcul des coûts de la qualité pour le modèle proposé 61
2.3.3.1 Coût de prévention **Cp** 62
2.3.3.2 Coût d'évaluation **CA** 62
2.3.3.3 Coût de défaillance interne **CIF** 62
2.3.3.4 Coût de défaillance externe **CEF** 63
2.3.4 Dérivation de la fonction qualité 65
2.3.5 Formulation mathématique du modèle d'optimisation du coût de la qualité SC-COQ 65
2.4 Résolution approchée du modèle SC-COQ: implémentation des algorithmes génétiques 66
2.4.1 Mécanisme de reproduction 66
2.4.2 Représentation des individus 67
2.4.3 Initialisation 68
2.4.4 Evaluation 68
2.4.5 Opérateurs de sélection 68
2.4.6 Opérateurs AG 69
2.4.6.1 Croisement 69
2.4.6.2 Mutation 69
2.4.7 Critères d'arrêt 70
2.4.8 Pseudo code du modèle SC-COQ 70
2.5 Résultats numériques et discussion 71
2.5.1 Optimisation du coût de la qualité 71
2.5.1.1 Etude de l'impact des variables de décision sur la contrainte QL 72
2.5.1.2 Etude de l'impact du taux de défaillance du fournisseur **Ysi** sur le COQ 74

2.5.1.3 Etude de l'impact du taux de défaillance du détaillant **Yrk** sur le COQ 75
2.5.1.4 Etude de l'impact du taux de retraitement **φ** sur le COQ 76
2.6 Synthèse sur le modèle SC-COQ 78
2.7 Conclusion 79
Chapitre 3 : Validation expérimentale : application à une chaîne logistique alimentaire 80
3.1 Introduction 81
3.2 Etat de l'art sur les chaînes logistiques alimentaires 82
3.3 Expressions de la dégradation de la qualité dans les chaînes logistiques alimentaires 83
3.4 Formulation du modèle d'optimisation de la chaîne logistique alimentaire 85
3.4.1 Représentation générique de la chaîne logistique alimentaire 85
3.4.2 Variables du modèle 86
3.4.3 Organigramme de la FSC modélisée 87
3.4.4 Expressions utilisées dans l'organigramme : 88
3.4.5 Evaluation des coûts de la chaîne logistique alimentaire FSC 88
3.4.5.1 Coûts opérationnels 88
3.4.5.2 Coût de transport 89
3.4.5.3 Coût d'obtention de la qualité des aliments 89
Coût total de la qualité des aliments COFQ 90
3.4.6 Formulation mathématique du modèle FSC-COQ 90
3.5 Résolution exacte du modèle FSC-COQ sous la contrainte du coût de la qualité 91
3.5.1 Solveur CPLEX 12.6 : ILOG OPL 91
3.5.2 Résultats numériques et discussion 92
3.5.2.1 Etude de l'impact de la dégradation de la qualité au niveau des sites de stockage sur le coût total 93
3.5.2.2 Etude de l'impact du facteur de coût de transport sur le coût total 95
3.6 Résolution approchée du modèle FSC-COQ par les algorithmes génétiques 98
3.6.1 Pseudo code AG 98
3.6.2 Calibrage des paramètres par le plan de Taguchi 99
3.6.3 Résultats numériques obtenus par les AGs 101
3.7 Comparaison des solutions 103
3.6.4.1 Comparaison des solutions par temps d'exécution 103
3.6.4.2 Comparaison des solutions par GAP 104
3.8 Conclusion 106

Chapitre 4 : Etude comparative des techniques de sélection utilisées dans les algorithmes génétiques pour l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire étudiée 107
4.1 Introduction 108
4.2 Classification des stratégies de sélection 109
4.2.1 La sélection proportionnée : 110
4.2.1.1 La sélection par roulette biaisée (roulette wheel selection) : 110
4.2.1.2 Sélection du reste stochastique 110
4.2.2 Sélection ordinale 111
4.2.2.1 Sélection par tournoi (tournament selection) 111
4.2.2.2 Sélection par rang (ranking selection) 112
4.2.2.3 Sélection du tournoi Boltzmann (Boltzmann tournament selection) 112
4.3 Évaluation des stratégies de sélection de l'algorithme AG appliqué au modèle FSC-COQ 113
4.3.3.1 Sélection Tournoi appliquée au modèle FSC-COQ 113
4.3.3.2 Sélection stochastique appliquée au modèle FSC-COQ 114
4.3.3.3 Sélection Boltzman appliquée au modèle FSC-COQ 115
4.4 Test statistique de Student ou t test 116
4.5 Résultats et discussion 117
4.5.1 vitesse de convergence 117
4.5.2 Résultats du t test 120
4.6 Conclusion 127
Conclusion Générale et Perspectives 128
Production scientifique 130
Bibliographie 132
Annexes 145
Annexe 1 : Table diagonale pour le calibrage des paramètres de l'AG 145
Annexe 2 : Table diagonale pour calibrage des paramètres de la sélection Tournoi 146
Annexe 3: Programme CPLEX 147
Annexe 4 : Table de Student 152

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Modèle classique de Juran [JUR, 1998] 25
Figure 1.2. (a) Vue classique et **(b)** moderne du modèle de Juran [SCH, 2006] 28
Figure 1.3. Total COQ considérant les coûts d'opportunité [SAN, 1998] 29
Figure 1.4. Structure du modèle de coûts de processus [VAX, 2008] 29
Figure 1.5. Exemple du modèle ABC [VAX, 2008] 30
Figure 1.6. Structure convergente d'une SC [CHE, 2007] 32
Figure 1.7. Structure divergente d'une SC [CHE, 2007] 32
Figure 1.8. Structure mixte d'une SC [CHE, 2007] 33
Figure 1.9. Exemple de réseau de chaîne logistique [KLI, 2008] 34
Figure 1.10. Les différents espaces de recherche [COL, 2002] 41
Figure 1.11 Classification générale des méthodes d'optimisation monobjectif [COL, 2002] 43
Figure 1.12. Utilisation des algorithmes d'optimisation dans la littérature 46
Figure 1.13. Outils et techniques d'optimisation conventionnels et non conventionnels [COL, 2002] 47
Figure 1.14. Diagramme d'optimisation par le Recuit Simulé [LEE, 1993] 48
Figure 1.15. Diagramme d'optimisation par les algorithmes génétiques [MIC, 2010] 50

Chapitre 2

Figure 2.1. Illustration de la SCND étudiée 56
Figure 2.3. Organigramme du modèle étudié 58
Figure 2.4. La fonction de perte quadratique de Taguchi 64
Figure 2.5. Paradigme des termes de l'AG 67
Figure 2.6. Croisement en un point 69
Figure 2.7. Tracés de niveau QL en fonction des paramètres $Ysi\ Yrk$ et φ 73
Figure 2.8. Evolution du COQ pour différents taux de défaillance des fournisseurs 75
Figure 2.9. Evolution du COQ pour différents taux de défaillance des détaillants 76
Figure 2.10. Evolution du COQ pour différents taux de retraitement 77

Chapitre 3

Figure 3.1. Dégradation de la qualité des aliments [RON, 2011] 84
Figure 3.2. Modélisation générique de la FSC étudiée 86
Figure 3.3. Organigramme de la FSC modélisée 87
Figure 3.4. Les composantes d'optimisation ILOG 92
Figure 3.5. Courbe de coût total pour les deux valeurs de Δqd 95
Figure 3.6. Exemple d'une ligne de conditionnement du poivron 96
Figure 3.7. Variation du coût de transport relatif pour différents niveaux de température [RON, 2011] 97
Figure 3.8. Courbes de coût total pour différentes valeurs de γ 98
Figure 3.9. Graphique des principaux effets pour le rapport S / N pour AG 100

Chapitre 4

Figure 4.1. Classification des schémas de sélection 109
Figure 4.2. Sélection par roulette 110
Figure 4.3. Sélection par tournoi 111
Figure 4.4. Graphique des principaux effets du rapport signal/bruit de la sélection tournoi 114
Figure 4.5. Histogramme d'une variable approximativement normalement distribuée 116
Figure 4.6. Déviation par rapport à la solution optimale 119
Figure 4.7. Courbe de convergence 119
Figure 4.8. p values agrégées 124

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1. Avance Chronologique du COQ 23
Tableau 1.2. Résumé de la catégorisation des coûts P-A-F [CAS, 2012] 27
Tableau 1.3. Modèles et catégories du COQ [VAX, 2008] 30
Tableau 1.4. Niveaux décisionnels dans une chaîne logistique [ROO, 2003] 35
Tableau 1.5. Catégories des modèles de SCND [RAM, 2008] 36
Tableau 1.6. Grille de classification des différents modèles de SCND [HUB, 2007] 37
Tableau 1.7. Classification des problèmes d'optimisation 41
Tableau 1.8. Codes des approches de modélisation 43
Tableau 1.9. Caractéristiques de modélisation des travaux révisés [DOU, 2016] 44
Tableau 1.10. Utilisation du SA pour l'optimisation de la SCND 49
Tableau 1.11. Utilisation du GA pour l'optimisation de la SCND 51

Chapitre 2

Tableau 2.1. Types d'erreurs résultant du système d'inspection 56
Tableau 2.2. Détail des expressions selon le modèle étudié 58
Tableau 2.3. Paramètres fixes d'entrée pour l'AG 71
Tableau 2.4. Paramètres utilisés pour générer des instances GA 72
Tableau 2.5. Résultats pour les différents paramètres Ysi, Yrk et φ 78

Chapitre 3

Tableau 3.1. Valeurs des paramètres utilisés en programmation pour générer les instances sur CPLEX 12.6 93
Tableau 3.2. Coûts totaux pour Δqd=0,03 93
Tableau 3.3. Coûts totaux pour Δqd=0,3 94
Tableau 3.4. Dégradation estimée de la qualité et durée de conservation des poivrons à différentes températures [RON, 2011] 96
Tableau 3.5. Le coût total et niveau de qualité optimal pour 3 niveaux de γ 97
Tableau 3.6. Niveaux considérés pour chaque facteur de l'AG 100
Tableau 3.7. Paramètres optimaux de l'AG 101
Tableau 3.8. Coût total ($) pour Δqd**=0,03** 101
Tableau 3.9. Coût total ($) pour Δqd**=0,3** 102
Tableau 3.10. Le coût total obtenu par les AGs pour 3 niveaux de γ 102
Tableau 3.11. Tests du problème étudié 103
Tableau 3.12. Temps de solution de CPLEX et AG 103
Tableau 3.13. Calcul du GAP pour Δqd=0,03 104
Tableau 3.14. Calcul du GAP pour Δqd=0,3 105
Tableau 3.15. Performance d'AG contre CPLEX pour différentes valeurs de γ 105

Chapitre 4

Tableau 4.1. Niveaux considérés pour chaque facteur de la sélection du tournoi 113
Tableau 4.2. Paramètres optimaux de la sélection du tournoi..... 114
Tableau 4.3. Paramètres d'entrée de la sélection de Boltzman..... 115
Tableau 4.4. Résultats de la meilleure solution pour les problèmes de taille 3, 5 et 10..... 118
Tableau 4.5. Paramètres d'entrée du modèle FSC-COQ 120
Tableau 4.6. Exemples de résultats obtenus avec des coûts différents 121
Tableau 4.7. Résultats statistiques des trois techniques de sélection..... 121
Tableau 4.8. Statistiques des échantillons appariés..... 123
Tableau 4.9. Les p-values..... 124
Tableau 4.10. t test des échantillons appariés 126

Liste des algorithmes

Chapitre 2 :

Algorithme 2.1. Un algorithme génétique 67
Algorithme 2 2. Algorithme génétique pour le modèle SC-COQ 70

Chapitre 3 :

Algorithme 3.1. Algorithme génétique pour le modèle FSC-COQ 99

Chapitre 4 :

Algorithme 4.1. Procédure de la sélection de Tournoi 113
Algorithme 4.2. Procédure de la sélection stochastique sans remplacement 114
Algorithme 4.3. Procédure de la sélection de Boltzman 115

Acronymes

6 σ	Six Sigma
ABC	Activity Based Costing
AHP	Analytic hierarchy process
ASQC	American Society for Quality Control
B&B	Branch and Bound
BSI	British Standards Institution
CoC	Cost of Conformance
CoNC	Cost of Non Conformance
CoQ	Cost of Quality
CPU	central processing unit
DMAIC	Define-Measure-Analyze-Improve-Check
ERP	Entreprise Ressource Planning
FSC	Food Supply Cain
GA	Genetic Algorithm
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point
ISM	Interpretive structural modelling
MILP	Mixed Integer Linear programming
MINLP	Mixed Integer Non Linear Programming
NCQ	National Cost of Quality
NRGA	Non Dominated Ranking Genetic Algorithm
NSGA	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm
P-A-F	Prevention-Appraisal-Failure
PAQ	Problème d'Affectation Quadratique
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PLOT	Production-Logistique-Outbound-Transport
PQC	Poor Quality Cost
PSO	Particle Swarm Optimization
PVC	Problème du Voyageur de Commerce
QL	Quality Level
RBF	Radial Basis Function
SA	Simulated Annealing
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Managment
SCND	Supply Chain Network Design
SD	Système Dynamique
SPC	Statistical Process Control
TQM	Total Quality Managment
TS	Tabu Search
VIKOR	Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje

Introduction générale

Dans le monde actuel des affaires, les organisations ne sont plus en concurrence en tant qu'entreprises individuelles indépendantes, mais en tant que chaîne logistique en sa totalité. La gestion efficace des chaînes logistiques est l'un des problèmes les plus critiques que confrontent les managers et les organisations en général. En effet, l'approvisionnement en matières premières et en pièces, la transformation en produits finis, l'ajout de la valeur, le stockage, le retraitement des produits défectueux, la distribution des produits aux clients, sont tous des processus principaux dans une chaine logistique de fabrication, ou agroalimentaire.

La qualité a été depuis longtemps reconnue comme un aspect important dans la prise de décision des consommateurs lorsque divers produits sont disponibles sur le marché. Afin de maximiser la valeur globale générée, une chaîne d'approvisionnement doit être configurée de manière à minimiser les coûts tout en maintenant un bon niveau de qualité pour satisfaire les objectifs finaux. Aussi, estimer le coût de la qualité (COQ) dans le contexte de la SC est considéré comme une mesure de performance clé pour examiner la performance de la chaîne logistique en termes financiers. L'approche COQ permet aux organisations de concilier deux objectifs contradictoires : optimiser la qualité et minimiser les coûts, et ensuite avoir un seul objectif : la minimisation du coût de la qualité.

La conception des chaines logistiques intégrant le coût de la qualité s'avère donc essentielle à l'amélioration de la qualité et à la réduction totale des coûts pour lesquels cette qualité a été atteinte. En intégrant des mesures de performances tels que le coût de la qualité dans leurs systèmes comptables, les entreprises tentent à minimiser les coûts tout en augmentant la qualité, atteignant ainsi la meilleure satisfaction des clients. Ceci explique l'importance imminente d'intégrer le COQ dans la conception de la SC et les programmes qualité. Les chercheurs perçoivent différemment l'impact du coût de la qualité sur les entreprises. Pour [CRO, 1984], le coût total de qualité est estimé à 20% - 35% des ventes des entreprises de fabrication et de services, pour [FEI, 1957], le COQ est estimé à 10% du chiffre d'affaires et à environ 30% du coût total de fabrication d'après [SRI, 2008]. Comme il a été remarqué par [ALT, 2006], dans un réseau de chaîne Logistique, les gestionnaires doivent prendre des décisions stratégiques viables pour que l'entreprise réduise ses coûts et maintienne ses marges bénéficiaires tout en maintenant la qualité à un niveau prédéterminé, par le biais d'une optimisation efficace du réseau de chaîne Logistique (SCND).

Les chercheurs ont publié de nombreux ouvrages dans le domaine de la conception de réseaux de chaînes logistiques SCND, tenant en compte plusieurs aspects tels que l'emplacement des entités, les problèmes de localisation des sites, attribution de la demande des clients à différentes sites, la planification multi-produits, multi-période, les conditions de stockage et de distribution (durée, température) dans le cas des produits alimentaires. Tous ces aspects ont été au centre de la recherche concernant la SCND, et elles ont été étudiées séparément ou en combinaison.

La résolution de ces problèmes a été mise en pratique via de nombreuses méthodes. Néanmoins, la programmation mathématique s'avère la méthode la plus pratique pour modéliser et résoudre de tels problèmes de conception, qui sont souvent des problèmes de complexité grandissante : la nature des décisions à prendre, les objectifs recherchés, les contraintes prises en compte et surtout la grande taille du problème dans le monde réel qui nécessite une forte puissance de calcul.

Dans cette optique, les mathématiciens proposent deux grandes catégories d'approches de résolution de ce type de problèmes : Les méthodes exactes qui fournissent des résultats optimaux, mais avec un temps de calcul qui augmente exponentiellement avec la taille du problème ; et les méthodes approchées qui garantissent une solution proche de l'optimum dans un temps de calcul très raisonnable.

Les algorithmes évolutionnaires ont prouvé leur efficacité dans l'optimisation de la chaîne logistique, ceci explique notre intérêt particulier aux Algorithmes Génétiques dans nos travaux de recherche, vu qu'ils ont été appliqués dans la SCND avec grand succès, en raison de la possibilité de traiter des problèmes d'ingénierie multidimensionnels non linéaires.

Cette recherche a deux aspects : Théorique et conceptuel. Le premier aspect concerne l'analyse des modèles COQ, et de certains travaux qui ont été effectués sur le problème de son intégration dans la conception et la modélisation de la SC, pour que les organisations qui souhaitent rester compétitives doivent implémenter ces mesures du coût de la qualité au niveau des processus internes de leurs chaînes logistiques.

Le second aspect conceptuel de la recherche est d'essayer d'explorer et de diagnostiquer le COQ, en développant un modèle mathématique qui l'intègre dans la conception de la chaîne logistique. Le but est de fournir aux managers, un outil de prise de décision leur aidant à concevoir et à planifier la qualité, par la sélection des meilleurs entités à savoir : fournisseurs, producteurs, usines, sites de stockage et détaillants, pour fabriquer un produit qui respecte le niveau de qualité requis, qui reste l'un des problèmes les plus difficiles auxquels les organisations sont confrontées.

Ce travail de recherche a été rédigé en fonction des questions suivantes : Comment les modèles du COQ ont évolué suivant le mouvement de l'évolution historique de la qualité ? Quel modèle est le plus pertinent pour le calcul du COQ ? Comment calculer les coûts de la qualité tout au long d'une chaîne logistique dans un cadre industriel ou agroalimentaire ? Quels variables de décision sont liées au coût de la qualité, et quels paramètres utiliser pour représenter la qualité pour chacune des entités de la SC ? Quel serait la modélisation mathématique correspondante pour un problème de conception qui intègre le COQ pour les industries de fabrication d'abord, puis pour les industries agroalimentaires ? Quelles sont les hypothèses du modèle, ensembles, paramètres, variables de décision et contraintes afin de modéliser les deux situations ? Quelles seraient les procédures de solution correspondantes, la voie logistique choisie lors de l'intégration du COQ dans le modèle de conception de la chaîne ?

Ce rapport s'articule autour de quatre chapitres organisés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'optimisation des problèmes de gestion de la chaine logistique. L'objectif est de rappeler les différentes catégories des problèmes de SCND, de fournir une classification des modèles associés intégrant le COQ comme mesure de performance clé dans la phase de la conception et modélisation. Nous présenterons aussi un bilan des techniques d'optimisation pour résoudre les modèles de chaîne logistique. Cette étude bibliographique nous mène à positionner notre problématique de recherche et à montrer sa pertinence scientifique et pratique.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude d'un modèle de calcul du COQ sur une chaîne logistique en série à trois échelons, selon la catégorie classique du P-A-F (Prevention –Appraisal – Failure). Une méthode basée sur les algorithmes génétiques (AGs) a été développée pour optimiser le modèle afin de déterminer le point COQ optimal réduisant les coûts pour l'ensemble de la chaîne logistique tout en maintenant un niveau de qualité global QL (Quality Level). Les résultats obtenus fournissent aux managers un outil d'aide à la décision quant à la sélection des entités et paramètres fiables et à gérer le coût de la qualité tout au long de la chaîne logistique.

Le troisième chapitre est une extension du modèle développé dans le chapitre précédent, et qui est consacré à l'intégration du coût de qualité alimentaire (COFQ) dans la prise de décision sur les conditions de stockage et de transport à travers une chaîne logistique alimentaire. Le modèle développé 'FSC-COQ' est un problème MINLP, dont l'objectif est de minimiser le coût total sous les contraintes de niveau de qualité global, en raison du caractère périssable des produits. L'application pratique du modèle est démontrée à l'aide de deux approches : une méthode exacte basée sur la technique Branch & Bound

et une méthode approchée basée sur les Algorithmes Génétiques en étudiant des exemples de taille pratique et réelle.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une étude comparative de trois techniques de sélection des algorithmes génétiques, à savoir la méthode de tournoi, l'échantillonnage stochastique sans remplacement et la sélection de tournoi de Boltzmann afin de déterminer celle la plus convenable à donner des résultats optimaux pour notre modèle FSC-COQ. La performance de chaque méthode de sélection est étudiée à l'aide des tests statistiques t-test couplé avec l'analyse ANOVA.

Finalement, nous présentons une conclusion générale qui synthétise nos contributions et qui formule quelques perspectives de recherche qui peuvent découler de ces études.

Chapitre 1 : Problématique d'optimisation des réseaux des chaînes logistiques considérant le coût de la qualité

Résumé

Nous présentons dans ce premier chapitre un état de l'art sur l'optimisation des problèmes de gestion de la chaîne logistique. L'étude vise à fournir les dernières vues et classifications des modèles de conception des réseaux des chaînes logistiques (SCND) intégrant le coût de la qualité (COQ) comme mesure de performance clé dans la phase de la conception et modélisation. Nous présenterons une étude et une analyse des différentes catégories des problèmes de SCND, leur modélisation et formulation mathématique, ainsi que les principales techniques d'optimisation à savoir l'application de certaines méta-heuristiques pour résoudre les modèles de chaîne logistique.

Chapitre 1

Problématique d'optimisation des réseaux des chaînes logistiques considérant le coût de la qualité

1.1 Introduction

Selon les tendances actuelles du marché, c'est la chaîne logistique (SC) dans sa totalité qui entre en concurrence et non seulement la société. Toutes les entités de la chaîne logistique, depuis le fournisseur jusqu'à l'utilisateur final, pourraient systématiquement affecter l'efficacité de la chaîne logistique. Ainsi, toutes les entités devraient coopérer étroitement afin de renforcer sa valeur. Dans l'environnement actuel des affaires, où la qualité est un facteur concurrentiel crucial, fournir un produit ou un service de haute qualité demeure l'objectif de toutes les chaînes logistiques. Aussi, estimer le coût de la qualité (COQ) dans le contexte de la SC est considéré comme une mesure de performance clé pour examiner la performance de la chaîne d'approvisionnement en termes financiers. L'approche COQ permet aux organisations de concilier deux objectifs contradictoires : optimiser la qualité et minimiser les coûts, et ensuite avoir un seul objectif : la minimisation du coût de la qualité.

Basé sur la littérature dans les années 1950, Juran et Feignebaum [JUR, 1951] ont été les premiers auteurs à démontrer la nécessité de mesurer le COQ. Depuis, de nombreux chercheurs ont proposé des modèles, des méthodes et des techniques pour estimer le COQ dans la SC. Selon [SCH, 2008], il n'existe pas de définition unique du COQ et de ses éléments, ni de modèle unique permettant d'identifier et de contrôler les coûts de la qualité. D'autre part, en 1991, le British Standards Institution (BSI) a défini le COQ comme étant la somme des coûts supportés par la prévention et les activités d'évaluation ainsi que les défaillances internes et externes. [MAS, 1998] a défini le COQ par la somme des coûts de conformité et des coûts de non-conformité. Les coûts de conformité correspondent au prix payé pour éviter la mauvaise qualité (inspection, évaluation,…), et le coût de la non-conformité est le coût engendré par la mauvaise qualité causée par l'incapacité du produit ou du service à répondre aux exigences du client (reprise, rebus,…) ainsi que tous les autres coûts payés pour obtenir un produit ou un service de bonne qualité. Selon [SRI, 2008] qui a défini les premiers pas vers l'estimation du COQ dans une chaîne logistique, le COQ est considéré comme la somme des pertes subies le long de la chaîne logistique afin de prévenir la mauvaise qualité, de garantir et d'évaluer le respect des exigences de qualité, ainsi que tout autre coût dû à une mauvaise qualité. [BOT, 1997] ajoute que les systèmes COQ sont aujourd'hui considérés comme un outil essentiel dans la gestion de la qualité et des autorités de son contrôle, comme par exemple l'ASQC (American Society for Quality Control) qui a intégré le COQ dans ses programmes de certification.

Une question pratique qui s'impose : Comment les responsables perçoivent-ils aujourd'hui l'impact du coût de la qualité sur leurs entreprises ? Le coût total de la qualité a été estimé entre 20% et 35% des ventes des entreprises de fabrication et de services par [CRO, 1984], à 10% du chiffre d'affaires selon [FEI, 1957] et à environ 30% du coût total de fabrication d'après [SRI, 2008]. Comme il a été remarqué par [ALT, 2006], dans un réseau de chaîne logistique, les gestionnaires doivent prendre des décisions stratégiques viables pour que l'entreprise réduise ses coûts et maintienne ses marges bénéficiaires tout en maintenant la qualité à un niveau prédéterminé, par le biais d'une optimisation multi-objectifs du SCND). Plusieurs études ont été menées pour résoudre les problèmes SCND, et l'utilisation des

algorithmes évolutifs a suscité un grand intérêt chez les chercheurs. [FAR, 2008] a proposé un modèle bi-objectif pour l'optimisation du réseau de distribution au sein de la SC. Les fonctions objectifs étudiées sont : minimiser simultanément le coût total et les commandes en retard des produits. La solution a été trouvée par l'application des algorithmes évolutifs. [CAS, 2014] a conçu et optimisé un réseau de chaîne d'approvisionnement, en incluant les mesures de la qualité. L'auteur a développé des algorithmes évolutifs pour résoudre le modèle qui pourrait aider les entreprises à améliorer simultanément leur rentabilité et leur qualité.

Ce chapitre commence par présenter une revue de la littérature axée sur les modèles COQ existants dans la littérature, suivie ensuite d'une discussion sur le management de la chaîne logistique et la conception des SCND intégrant le COQ. La seconde partie de ce chapitre traite les méthodes de résolution utilisées, ainsi que l'application de certains algorithmes évolutifs comme le recuit simulé (SA) et l'algorithme génétique (GA) pour résoudre les modèles de chaîne logistique. La dernière partie de ce chapitre porte sur le positionnement de notre problématique en se basant sur les références ayant décrit, analysé et développé les modèles de SCND tenant en compte le COQ.

1.2 Revue de littérature sur le COQ

1.2.1. Contexte et définition du COQ

Vers la fin du 20ème siècle, où le mouvement de la qualité a connu son début, une multitude de modèles ont été développés pour décrire le phénomène des coûts de la qualité. L'idée principale consistait à mesurer le coût engendré par un système de fabrication visant à réaliser des produits de qualité qui satisfont un segment de clientèle sur un marché défini. Bien qu'il y ait une discussion en cours sur la terminologie et la définition du COQ (connu également sous le nom de : coûts de mauvaise qualité, coûts de qualité inégale, coûts de qualité totaux, ..), on considère que cela ne limite pas son applicabilité.

[PLU, 1987] a conclu dans sa revue de littérature sur les coûts liés à la qualité qu'il existe plusieurs définitions des catégories de coût, et qu'il existe même des exemples de désaccord retrouvés pour quelques éléments de coût. Par exemple le BSI (British Standard Institution) définit la qualité comme étant : '*Les coûts de toute action entreprise pour enquêter, prévenir ou réduire les défauts et les défaillances'*. Et selon l'ASQC (American Society for Quality Control) 1967, les coûts de la qualité sont : '*Les Coûts encourus pour la planification, la mise en œuvre et la maintenance d'un système qualité garantissant la conformité aux exigences de qualité au niveau économique'.*

Pour [JUR, 1998], la qualité c'est *l'aptitude à l'utilisation*. Mais cette définition ouverte du COQ admet de nombreux coûts intangibles et rend plus difficile la détermination des coûts de la qualité. [PLU, 1987] a déclaré que sans définition claire, il ne peut y avoir de compréhension commune ni de sens sur le thème des coûts de qualité. Ce manque de définitions dans la littérature a inévitablement une incidence sur la comparabilité d'ensembles de données qui dépendent des définitions des catégories de coûts utilisées pour les collecter. En 1978, [BLA, 1978] ont défini les coûts de qualité en tant que toute affaire qui consiste à attribuer une valeur monétaire aux problèmes liés à la qualité, pour maintenir un certain niveau de qualité pour les biens et services de l'entreprise. Pour [CLA, 1986], les coûts de qualité sont liés à toutes les actions effectuées pour fabriquer un article conformément aux dessins techniques et aux spécifications avant de comptabiliser le revenu, ou bien toute action considérée comme un travail de correction des défauts. Quelques années plus tard, [WIL, 1999] a proposé une revue de littérature concernant l'évolution historique des coûts de la qualité, les différentes définitions du COQ, la collecte et l'utilisation de données du COQ, et a présenté des expériences de quelques entreprises ayant intégré le COQ, ainsi que des références rapportant des études de cas avec l'expérience réussie du COQ.

[POR, 1992] et [TSA, 1998] ont présenté une revue de littérature concernant le COQ, et ont fourni un détail sur les différents modèles de coûts de la qualité, en mettant l'accent principalement sur la catégorie prévention-évaluation-défaillance (P-A-F) et ses limites. Aussi, [BUR, 1996] a examiné cette classification et a réduit les types de modèles COQ en trois catégories. Dans ces deux dernières références, une enquête a été réalisée sur divers modèles qui suivent l'approche P-A-F, en soulignant les nombreuses différences entre ces modèles. Cependant, d'autres modèles de coûts de qualité n'ont pas été discutés du tout. [SCH, 2008] a présenté une étude de littérature sur différentes méthodes d'évaluation des coûts de la qualité ainsi que des rapports sur leur succès afin de mieux comprendre les méthodes du COQ. Cette étude a montré que la méthode la plus couramment utilisée est le modèle classique P-A-F ; cependant, d'autres modèles de coûts de qualité peuvent être utilisés avec succès, suivant la situation, l'environnement, le but et les besoins de l'entreprise. [VAX, 2008] confirme que le modèle P-A-F est l'approche internationale la plus reconnue en la matière. Néanmoins, le modèle est principalement un système de classification des coûts qui présente de sérieuses limitations. Un système TQM (Total Quality Managment) nécessite une approche processus et le modèle P-A-F échoue généralement dans ce domaine. Selon lui, l'approche processus est une alternative prometteuse au calcul de la qualité et de quantification du coût de la conformité et de la non-conformité. Tous les systèmes COQ doivent contenir de bonnes métriques globales et détaillées. [SRI, 2008] a estimé les coûts de la qualité en termes financiers conformément au modèle du P-A-F, et a utilisé la norme DMAIC (Define-Measure-Analyse-Improve-Check) comme méthodologie d'analyse, et a classifié ensuite ces coûts selon le modèle de Juran et Gryna [JUR, 1998]. Son étude de cas sur des données réelles a souligné l'importance du calcul du COQ et des coûts associés à diverses activités et de non-conformités sur les performances de l'entreprise. [HWA, 2010] a étudié différents modèles de coûts de la qualité actuellement utilisés, et a présenté un comparatif basé sur les forces et les faiblesses de chaque modèle et a mis en évidence leur application dans différents domaines. Aussi, une revue de littérature sur les modèles modernes intégrant le CoQ a été présentée dans les travaux de [DOU, 2016] qui le distinguent en quatre catégories, à savoir : les modèles P-A-F ou modèles de Crosby, les modèles basés sur les coûts d'opportunité, les modèles basés sur les coûts de processus et l'approche ABC (Activity Based Costing). A part ces travaux, aucune autre revue de la littérature portant sur les modèles COQ n'a été trouvée ni publiée à ce jour.

1.2.2. Analyse historique de l'évolution de l'économie et du coût de la qualité

Dans cette section, nous présentons une analyse des événements historiques successifs qui combinent l'évolution du mouvement de la qualité et l'analyse chronologique des modèles COQ.

Afin de décrire l'évolution du coût de la qualité, plusieurs modèles ont été développés depuis la fin du 20ème siècle, où le mouvement de la qualité a connu son début. La plupart de ces modèles étaient théoriques, c'est-à-dire qu'ils n'étaient pas basés sur des données réelles. Il y avait d'autres problèmes avec les modèles COQ. Par exemple, le manque d'attributs nécessaires pour comprendre et prévoir la dynamique de la gestion de la qualité. De même, [PLU, 1988] ont mentionné que le COQ n'est pas un indicateur de performance populaire, car très peu d'organisations mesurent le COQ en tant qu'indicateur de performance en raison de la méconnaissance de cet outil. On peut constater qu'il existait un problème de prévisibilité dans le cadre COQ. D'où la nécessité d'acquérir une compréhension plus profonde au sujet du COQ. Tout d'abord, la définition la plus acceptée de COQ indique l'importance du concept COQ dans les initiatives de gestion de la qualité, qui est le composite de quatre processus : la planification de la qualité, l'assurance qualité, le contrôle de la qualité et l'amélioration de la qualité. [ARM, 2017] ajoute que le COQ est un concept et outil que l'on peut trouver dans presque toutes les initiatives de gestion de la qualité telle que TQM et six sigma (6σ) [FRE, 2008]. Il a même suggéré que

COQ soit la première étape de toute mise en œuvre de la gestion de la qualité ou amélioration dans une organisation, afin d'atteindre l'objectif qui est "de trouver le niveau de qualité qui minimise le COQ total".

Nous présentons dans le tableau 1.1 un bref résumé ou récapitulatif chronologique des événements ayant marqué le développement du COQ. Le but est de donner une analyse qualitative pour comprendre l'évolution du COQ et fournir une plate-forme pour les futures études quantitatives. Il est à noter que les évènements énumérés dans ce tableau ne sont pas exhaustifs.

Tableau 1.1. Avance Chronologique du COQ

Année	Référence	Contribution
1943	[SCH, 2008]	Mise au point de la première analyse des coûts de la qualité par l'élaboration d'un système de reporting.
1943	[MAG, 2006]	Invention de la technique pratique cause-effet connue sous le nom de diagramme en arête de poisson.
1950	[MAG, 2006]	Faire connaître la roue PDCA aux industriels japonais.
1951	[JUR, 1951]	Proposition d'une forme graphique pour le COQ. Il a défini le COQ pendant des décennies comme «*gold in the mine* ou l'or dans la mine».
1954	[LES, 1954]	Identification des coûts de qualité intangibles.
1957	[FEI, 1957]	Proposition de la classification P-A-F dans son manuel TQC.
1960	[CAM, 1983]	Publication de l'un des premiers articles utilisant le modèle P-A-F : « *How to put Quality costs to use* ».
1961	ASQC	Formation du comité technique du coût de la qualité : « ***A**merican **S**ociety for **Q**uality **C**ontrol* ».
1962	[SCH, 2008]	Model de compromis entre deux types de défaillances.
1966	[BAN, 2012]	Publication de l'article « *cutting the cost of quality* ».
1970	ASQC	Adoption du modèle de Feigenbaum et Juran.
1977	[ROS, 1977]	Développement du modèle de coût de processus.
1979	[CRO, 1979]	Modèle de Crosby qui repose sur la classification P-A-F et qui estime que qu'un grand accent sur la prévention pourrait réduire les défauts à zéro sans connaître pendant combien de temps une production zéro défaut peut être maintenue.
1982	Motorola	Proposition du niveau de conformité 6σ pour atteindre l'objectif de zéro défaut de manière économique.
1983	[CAM, 1983]	Intégration des décisions concernant les éléments de coût dans le COQ.
1987	[SAN, 1994]	Proposition de la fonction de perte « *Quality loss function* » par Taguchi.
1987	[MOD, 1987]	Extension du modèle P-A-F pour prendre en compte des dimensions supplémentaires comme le coût de l'utilisation inefficace des ressources.
1987	[HAR, 1987]	Proposition du modèle de Harrington avec la notion de coût de la mauvaise qualité ou *PQC* (Poor Quality Cost system).
1988	[COO, 1988]	Création du modèle ABC « ***A**ctivity **B**ased **C**osting* » qui est une technique comptable qui aide à mesurer les activités avec et sans valeur ajoutée.
1988	[GOD, 1988]	Proposition d'un modèle comptable pour le calcul du COQ.
1992	[POR, 1992]	Définition du COQ en tant que fraction des revenus des ventes pour différentes industries. Détermination des coûts de non-conformité qui impliquent des investissements supplémentaires pour les activités de prévention.
1992	[CAR, 1992]	Inclusion du coût d'opportunité et rapport des preuves de son utilisation réussie dans un programme de qualité.
1993	[JUR, 1993]	Proposition du modèle révisé où le COQ peut être minimisé tenant en compte le paradigme de la qualité 6-Sigma.
1996	[ITT, 1996]	Démonstration que le modèle de compromis traditionnel peut être une représentation statique précise du coût de la qualité, et que le paradigme

		moderne de la gestion de la qualité et les modèles COQ modernes sont corrects.
1996	[BUR, 1996]	Publication de l'un des premiers modèles dynamiques du système COQ qui supporte la vision classique dans des conditions limitées de temps, et la vue moderne dans un horizon temporel infini.
1998	[SAN, 1998]	Incorporation des coûts d'opportunité dans le modèle traditionnel P-A-F.
2002	[SOW, 2002]	Statistiques : seulement 10% des entreprises mesurent le COQ aux USA. Des résultats similaires peuvent être trouvés dans d'autres pays.
2002	[CHI, 2002]	Présentation du modèle de budgétisation du capital qui présente le point de décision pour les activités d'amélioration de la qualité.
2008	[FRE, 2008]	Discussion sur les apports de la simulation des coûts de la qualité sur la planification niveaux stratégique et opérationnelle de la qualité.
2012	[CAS, 2012]	Proposition d'un modèle de calcul du COQ pour une entreprise de fabrication.
2013	[KHA, 2013]	Proposition d'un modèle avec politique Lean Manufacturing et mise en œuvre de l'approche d'inspection par simulation SD (Système Dynamique) du COQ.
2015	[BES, 2015]	Proposition du modèle NCQ (National Cost of Quality) pour mesurer la qualité au niveau macroéconomique contrairement aux études précédentes qui portaient principalement sur les aspects microéconomiques de la qualité.
2015	[RAS, 2015]	Proposition d'une initiative ERP (Entreprise Ressource Planning) pour estimer les coûts de la qualité.

D'après cette revue historique basée sur l'avance chronologique des événements ayant marqué le développement du COQ, on peut constater que le COQ a évolué parallèlement avec la gestion de la qualité. On peut voir aussi la fonction structurelle que joue le COQ dans l'innovation et dans un cadre de planification stratégique étant contraint aux étapes antérieures de l'évolution de la gestion de la qualité. Les entreprises, même celles ayant atteint un programme mature de la gestion de qualité, commencent à exploiter le potentiel stratégique invisible de cet outil, et étendre ses applications pour innover, améliorer la qualité et acquérir une meilleure position concurrentielle sur le marché.

1.2.3. Modèles du COQ

Dans cette section, nous présentons une revue de la littérature sur différents modèles du COQ. Les modèles du COQ ont été développés d'abord par Feigenbaum [FEI, 1957] dans les années 50. Peu de temps après, de nombreux chercheurs ont suggéré différentes approches pour mesurer le COQ. Par exemple, [PLU, 1988] ont mené des recherches sur les modèles de COQ basées sur des données réelles des industries. Ils ont constaté que les modèles COQ pourraient être divisés en 3 catégories distinctes : La première catégorie comprend les modèles qui prennent en considération la différence entre le point optimal de la qualité et la pente de la courbe COQ. La deuxième catégorie comprend les modèles décrivant l'évolution de la qualité dans le temps en fonction de différents niveaux de qualité. La troisième catégorie représente les coûts réels de la qualité obtenus au fil du temps via des données réelles des industries. [SCH, 2006] ont classé les modèles COQ en quatre catégories : modèle P-A-F ou Crosby, modèles de coûts d'opportunité, modèles de coûts de processus et approche ABC (Activity Based Costing).

Cependant, comme l'ont suggéré [SCH, 2006], la classification P-A-F n'est pas la seule catégorie acceptée, puisque d'autres modèles trouvés dans la littérature peuvent être discutés et utilisés. Par exemple, [CAS, 2012] ont classé le COQ avec ordre chronologique en dix groupes: modèle de Juran, contribution de Lesser, modèle P-A-F ou modèle de Crosby, modèle PQC (Poor Quality Cost), modèle COQ comptable, modèle des coûts de processus, approche ABC, modèle révisé de Juran, Modèle de coût d'opportunité et modèle de budgétisation des capitaux.

1.2.3.1 Modèle de Juran

[JUR, 1951], a présenté un modèle conceptuel et graphique du COQ dans son livre "*Quality control Handbook* ». Dans son modèle, il a distingué le COQ entre des coûts de qualité évitables et inévitables, et a utilisé le terme « *Gold in mine*» où l'or se réfère aux coûts de qualité évitables qu'il fallait identifier, et qui étaient liés aux coûts qui disparaîtraient totalement en l'absence de défaut dans le système. La figure 1.1 présente la forme graphique du modèle de Juran. Selon lui, le COQ est l'ensemble des coûts de fabrication, coûts de contrôle de la qualité et coûts évitables, plus les coûts d'inspection qui ont été intégrés plus tard. Il a affirmé que le coût total de la qualité est parabolique, les coûts de contrôle demandés pour une meilleure conformité augmentent géométriquement à l'approche de la perfection, tandis que le point optimum est toujours inférieur à la perfection et a conclu que les pertes dues aux défaillances seront réduits de manière exponentielle. Quand 100% de conformité est atteinte, le coût total et le coût de la qualité augmentent à l'infini. Sur la base de ce modèle le point optimal est juste proche de la perfection. Quand les coûts de conformité sont infinis, on obtient la perfection complète, c'est-à-dire zéro défaut. Plusieurs chercheurs ont adopté ce modèle de Juran. Par exemple, [PLU, 1988] ont présenté des cas concrets reposant sur le modèle classique de Juran. [BUR, 1996] a également simulé le modèle dans une organisation et l'a validé. [FRE, 2004] a également proposé le modèle approprié pour les entreprises à faible niveau de qualité, où les pratiques pour atteindre la perfection coûtent trop cher.

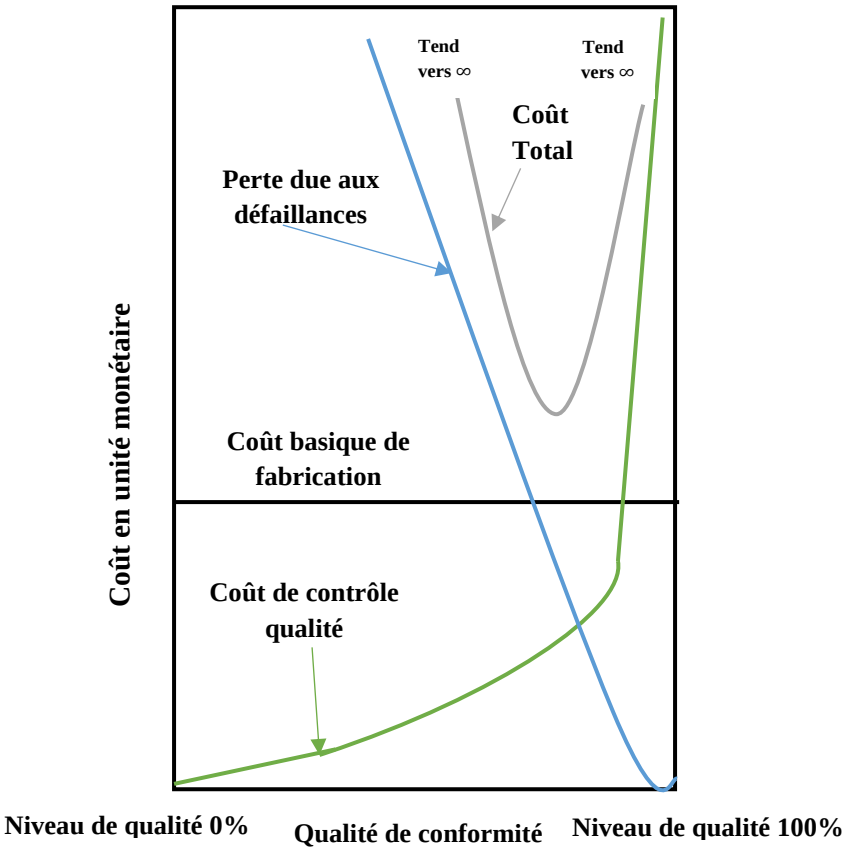


Figure 1.1. Modèle classique de Juran [JUR, 1998]

1.2.3.2 Modèle de Lesser

En 1954, [LES, 1954] a proposé un modèle basé sur la classification P-A-F. Dans sa proposition, il a distingué entre les coûts de qualité identifiables (rebus, ré usinage, réclamation client, coûts d'inspection, coûts des essais et du contrôle qualité), et les coûts de qualité cachés ou intangibles (retards de production et expédition, pertes commerciales dues à une mauvaise qualité, problèmes dans la conception). Une autre contribution de Lesser était d'établir un lien entre le coût de la qualité et le profit et entre la perte et d'autres ressources utilisées, à savoir : matériaux directs, main-d'œuvre directe, frais généraux et ingénierie [BAN, 2012].

1.2.3.3 P-A-F ou Modèle de Crosby

La classification bien connue du P-A-F a été développée par [FEI, 1957]. Plus tard, [JUR, 1993] a proposé la forme graphique du modèle COQ et le concept de coût de la qualité. Selon [POR, 1992], ce modèle suppose qu'un plus grand investissement dans les activités de prévention et d'évaluation réduira les coûts de défaillances et les coûts de la qualité. La plupart des autorités responsables de la qualité ont adopté le modèle P-A-F, par exemple l'American Society for Quality Control (ASQC) en 1970, et le British Standard Institute (BSI) en 1990, et il est employé par de nombreuses organisations qui utilisent la mesure des coûts de la qualité. [CAM, 1983] a défini chaque catégorie du P-A-F comme suit :

- **Coûts de prévention :** Les coûts de prévention sont les coûts associés à toute activité visant à éviter vérifier, prévenir et réduire la mauvaise qualité. Il s'agit des investissements engagés afin de prévenir les défaillances et erreurs des produits et des services. Exemple des coûts de prévention : développement du système, ingénierie de la qualité, formation, contrôle statistique du processus (SPC), coût de planification de la qualité, mise en œuvre et contrôle du système qualité dans l'organisation, mesures de sécurité, évaluation des fournisseurs, etc.
- **Coûts d'évaluation :** Les coûts d'évaluation sont les coûts engagés pour assurer la conformité des produits et services aux spécifications prédéfinies, c'est aussi l'ensemble de charges résultantes des procédures de contrôle, d'évaluation et de supervision des activités d'inspection. Exemple de coûts d'évaluation : test et inspection des matériaux achetés, test et inspection du produit final, essais du système de production, maintenance du matériel d'essai.
- **Coûts de défaillance interne :** Les coûts de défaillance interne sont les coûts résultants de la non-conformité du produit et du service aux spécifications prédéfinis avant la livraison ou l'expédition du produit ou service au client. Exemple de coûts de défaillance interne : coût de la ferraille, des reprises, de la réinspection et du réessaie des produits retravaillés, temps d'arrêt dû aux problèmes qualité, analyse de la cause des défauts dans la production, erreurs de logiciel de débogage.
- **Coûts de défaillance externe :** Les coûts de défaillance externes sont des coûts de non-conformité à la spécification prédéfinie après que le produit ou le service soit livré au client. Exemple de coût de défaillance externe : rappels de produits, réparations et remplacements au-delà de la période de garantie. Les coûts de défaillance externes ne peuvent pas être tolérables quand ils ne sont pas souhaitables, et quand ils sont catastrophiques quant à la sécurité du client (par exemple : industries aérospatiale, pharmaceutique et alimentaire). En ce sens, un intérêt croissant est accordé pour assurer un haut niveau de qualité, de sécurité et de traçabilité. Le problème est de définir quel élément peut être classé comme un coût de qualité et de le différencier des autres coûts.

Le tableau 1.2 présente un résumé de la catégorisation des coûts P-A-F.

Tableau 1.2. Résumé de la catégorisation des coûts P-A-F [CAS, 2012]

Coûts de Prévention	**Coûts d'évaluation**
- Planification de la qualité - Conception et développement des équipements de mesure, de test de qualité. - Etalonnage et maintenance des équipements de production utilisés pour évaluer la qualité - Assurance fournisseur - Formation de qualité - Audit qualité - Acquisition, analyse et reporting de données de qualité - Programme d'amélioration de la qualité - Planification du rappel de produit - Documentation de la politique qualité et de l'objectif qualité - Politique de qualité - Plan d'opération - Processus d'achat - Contrôle des appareils de surveillance et de mesure - Ressources nécessaires pour prévenir les dommages, la détérioration ou l'utilisation abusive	- Inspection et test - Equipements d'inspection et d'essai - Matériaux consommés lors des inspections et essais - Analyse et rapport des résultats des essais et inspections - Essais de performance sur le terrain - Evaluation du stock - Evaluation de la conception - Mesure financière - Mesure et surveillance des performances du système, des processus, de la satisfaction et du produit - Surveiller les entrées et les sorties pour vérifier que les processus individuels sont liés pour fonctionner efficacement - Analyse des données pour faciliter l'amélioration continue des processus - Evaluation des risques - Benchmarking, Auto évaluation, audit - Revue, vérification et validation de la conception et du développement
Coûts de défaillance interne	**Coûts de défaillance externe**
- Rebus - Remplacement, retraitement et réparation - Dépannage ou analyse des défaillances Réinspection et mise à l'essai - Défaut de sous-traitance - Permis de modification et concessions - Diagnostic des défauts - Détermination de disposition - Réduction des défaillances - Pertes en matériel et en temps - Contrôle de produits non conformes	- Réclamations clients - Produits retraités et retournés - Concessions, déviation - Perte de ventes - Frais de rappel - Réduction des défaillances du produit - Coût de la compensation sous garantie - Coût des clients et des marchés perdus - Gestion des clients et des marchés - Mauvaise prestation de services - Contrôle des produits non conformes

1.2.3.4 Modèle révisé de Juran

L'allure classique illustrée à la figure 1.2 (a) de la fonction coût de la qualité dans le modèle P-A-F a tout d'abord été proposée par [JUR, 1993]. Ce modèle suggère que, avec des niveaux de qualité plus élevés, les coûts de défaillance internes et externes diminuent, tandis que les coûts d'évaluation et de prévention augmentent. À mesure que les coûts d'évaluation augmentent, les coûts de défaillance tendent à diminuer. Ceci est expliqué par la découverte des défaillances à un stade antérieur. Dans un

environnement industriel, il est moins coûteux de rejeter un matériau défectueux au stade de l'entrée des marchandises que d'éliminer un article manufacturé qui contient un matériau défectueux.

Selon l'interprétation de Juran, le coût minimal résultant de la fonction de coût total représente le niveau optimal de qualité. De nombreuses références supportent la vue classique [FOX, 1989]. Cependant, la vue classique du COQ est en contradiction avec les tendances actuelles du secteur visant à obtenir la meilleure qualité possible. Le nouveau modèle COQ présenté à la figure 1.2, (b) est plus en accord avec les résultats empiriques de l'industrie. Pour ce modèle, la courbe de coût total présente une pente négative et le coût optimal passe au niveau idéal de qualité. La différence principale entre les deux modèles réside dans le fait qu'il est possible d'atteindre une qualité de conformité de 100% pour un coût fini dans le modèle moderne. En général, il est admis que le nouveau modèle COQ présente beaucoup plus de perspectives sur les coûts de la qualité et semble refléter la réalité des entreprises beaucoup plus proche que le modèle classique.

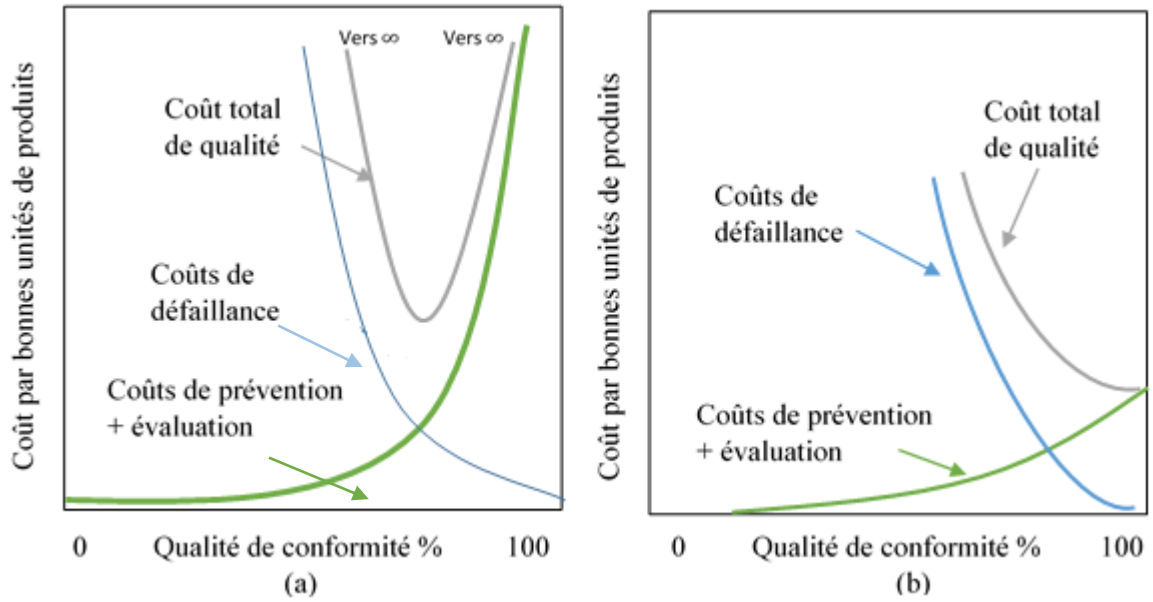


Figure 1.2. (a) Vue classique et **(b)** moderne du modèle de Juran [SCH, 2006]

1.2.3.5 Modèle de coût d'opportunité

De nombreux chercheurs ont considéré les coûts d'opportunité ou intangibles comme des coûts cachés ou indirects qui se produisent lorsque l'organisation perd des clients en raison d'un produit défectueux qui parvient sur le marché [TAT, 1996]. [CAR, 1992] a inclus les coûts d'opportunité dans la mesure du COQ. [ALB, 1992] reconnaissent également l'importance des coûts intangibles. Ils ont utilisé la fonction de perte de Taguchi pour estimer les coûts indirects de la qualité impossibles à calculer directement.

D'autres auteurs [SAN, 1998] ont étudié les coûts intangibles et ont constaté que ces coûts résultaient pour plus de 83% de la perte totale de revenu et environ 56% de la perte de profit. Comme le montre la figure 1.3, la tendance du modèle de coût d'opportunité serait similaire à la vision moderne du modèle COQ lorsque les coûts d'opportunité sont pris en considération.

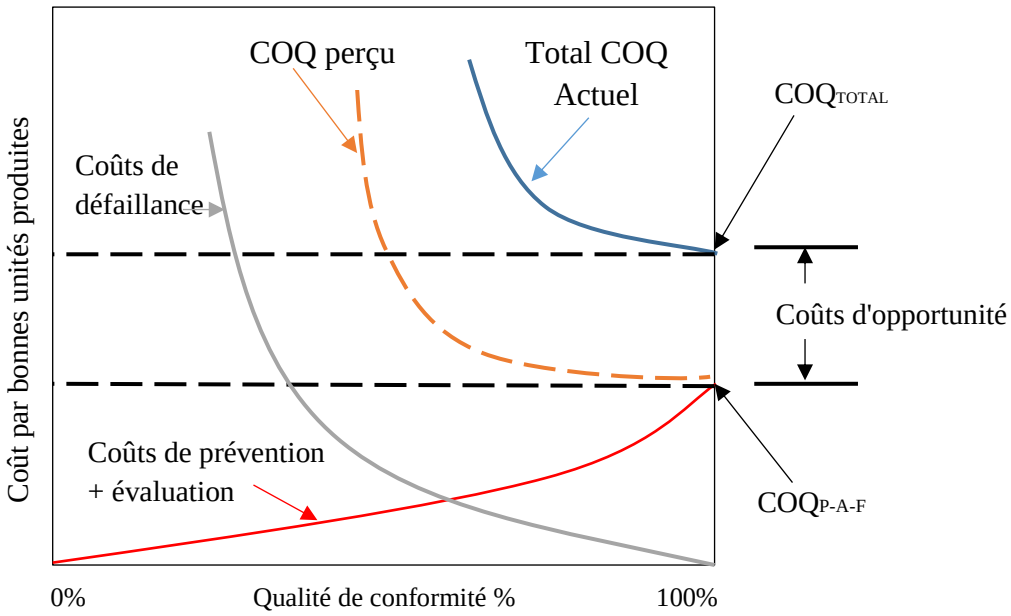


Figure 1.3. Total COQ considérant les coûts d'opportunité [SAN, 1998]

1.2.3.6 Modèle de coût de processus

Le modèle de coût de processus a été développé par [ROS, 1977], en proposant un programme informatique pour calculer le coût du processus, mais ce programme n'était pratique que pour l'environnement de fabrication. [MAR, 1989] a utilisé le modèle de coût du processus pour la mesure du COQ comme alternative au modèle P-A-F. Le coût du processus intègre le coût de la conformité (CoC) et le coût de la non-conformité (CoNC) basé sur des processus individuels. Selon [POR, 1992], le modèle de coûts de processus est utile pour déterminer si un investissement dans des activités de prévention est nécessaire ou s'il faut redéfinir un processus présentant des coûts de conformité excessifs. Beaucoup de chercheurs ont mis en évidence les avantages du modèle de coûts de processus pour faciliter la catégorisation et l'analyse des coûts de la qualité directs et indirects. Selon [VAX, 2008] le modèle de coût de processus peut être appliqué à la fois au service et industries de fabrication et il est utile dans les entreprises qui mettent en œuvre des programmes de gestion de la qualité totale. La structure du modèle de coûts de processus est présentée à la figure 1.4.

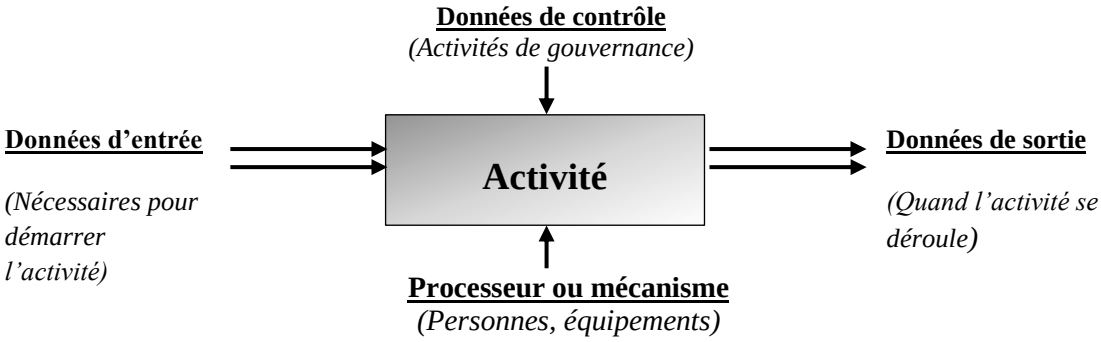


Figure 1.4. Structure du modèle de coûts de processus [VAX, 2008]

1.2.3.7 Modèle de coût basé sur l'activité (ABC)

Le calcul des coûts basé sur les activités, ou *Activity Based Costing* (ABC) est une classification des coûts basée sur leurs processus et leurs activités. Il a été développé par [COO, 1988] de la '*Harvard Business School*' comme méthode alternative pouvant être utilisée pour classer les coûts. [TSA, 1998] a été le premier à proposer une méthode de mesure de COQ en utilisant l'approche ABC, cette méthode vise à classer et à extraire les coûts de diverses activités dans le processus et élimine les activités sans valeur ajoutée. Un exemple du modèle ABC est montré à la figure 1.5.

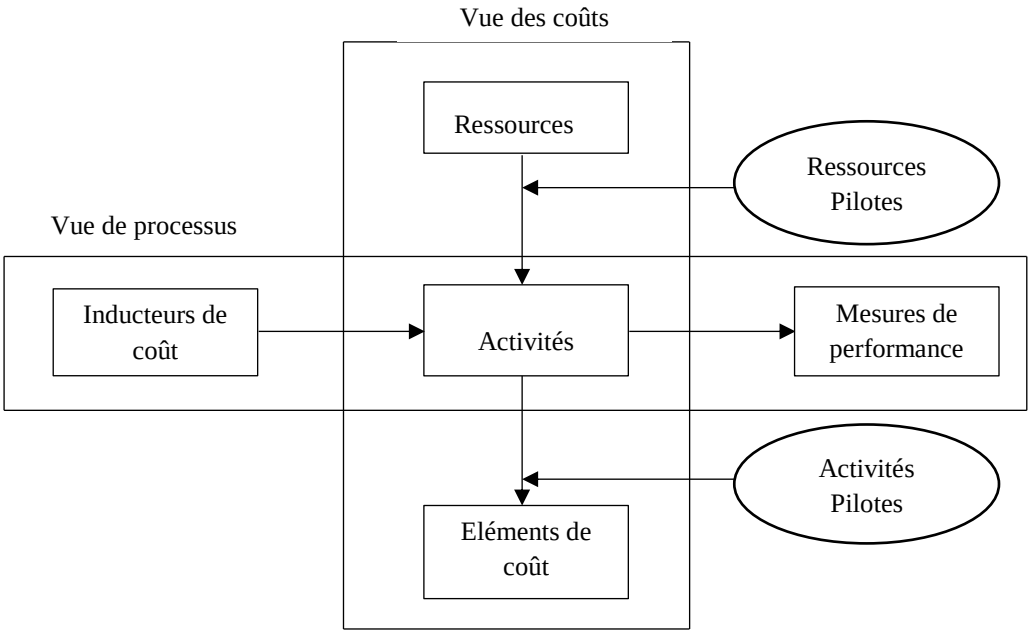


Figure 1.5. Exemple du modèle ABC [VAX, 2008]

Le tableau 1.3 résume la classification des modèles COQ dans les quatre groupes décrits précédemment et présente quelques exemples de publications développant les modèles.

Tableau 1.3. Modèles et catégories du COQ [VAX, 2008]

Modèle générique	Catégorie coût/activité	Exemples de publications
Modèle P-A-F	Prévention-Evaluation-Défaillance	[FEI, 1957]; [PLU, 1987]; [DAW, 1993]; [DAL, 1995]; [BUR, 1996]; [BOT, 1997]; [CHA, 2004]; [GUP, 2007].
Modèle des coûts d'opportunité	P-A-F + coûts d'opportunité	[JUR, 1975]; [MOD, 1987]; [CAR, 1992]; [SAN, 1998].
Modèle des coûts de processus	Conformité + Non-conformité	[ROS, 1977] ; [MAR, 1989] ; [CRO, 1990] ; [GOU, 1995].
Modèle ABC	valeur ajoutée + Non-valeur ajoutée	[COO, 1988] ; [JOR, 1992] ; [DAW, 1993] ; [TSA, 1998].

Il existe de nombreux modèles qui ne figurent pas dans le tableau ci-dessus. Par exemple: le modèle du coût de mauvaise qualité (PQC) introduit par [HAR, 1987] en 1987, modèle 'Accounting COQ' proposé par [GOD, 1988] en 1988 qui représente le modèle de COQ du point de vue comptable, le modèle de service développé en 1992 [CAR, 1992] , le modèle de Miller et Morris basé sur le profit développé en 2000, le modèle de budgétisation des immobilisations introduit par Beruvides et Chiu en 2003, qui peuvent également être utilisés avec succès.

On peut remarquer, d'après l'étude des différents modèles du COQ, que ces derniers présentent de grandes différences, malgré les principes de base qu'ils ont en commun. La plupart de ces modèles sont théoriques. Les chercheurs ont commencé à utiliser deux approches de modélisation : modélisation analytique et dynamique des systèmes, qui semblent être plus rigoureux que les modèles graphiques.

1.3 Réseaux de chaîne logistique SCND

1.3.1. Définition de la chaîne logistique

Le terme « chaîne logistique » signifie littéralement « chaîne d'approvisionnement », est définit comme « *le réseau d'entreprises qui participent, en amont et en aval, aux différents processus et activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services apportés au consommateur final* » [CHR, 1998]. En d'autres termes, une chaîne logistique est composée de plusieurs entreprises, en amont (fourniture de matières et composants) et en aval (distribution), et du client final.

Pour [LEE, 1993], la chaîne logistique est : « *un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client* ».

Ainsi, la chaîne logistique fait référence à l'intégration de multiples organisations afin d'atteindre leurs objectifs plus efficacement :

- Ensemble de relations Client-Fournisseur ;
- Ensemble d'activités créatrices de valeur ;
- Ensemble de fonctions ou processus (approvisionnement, transformation, distribution, etc.) [LEE, 1993].

1.3.1.1 Structure physique de la chaîne logistique

Les chaînes logistiques, n'étant pas toutes identiques et peuvent être structurées en différentes formes. Objectifs, types de produits, type d'opérations, durée de vie du produit et besoin de stock, sont tous des caractéristiques par lesquelles on pourra distinguer les SC. Beamon et Chen [BEA, 2001] distinguent les structures physiques de la SC en quatre types :

i. Structure dyadique

La structure dyadique se compose de deux entités, par exemple, un fournisseur et un client. Cette structure est simple et permet une analyse mathématique complète par le biais des modèles analytiques. Plusieurs structures dyadiques en cascade forment ce qu'on appelle la structure en série. Dans la littérature, la chaîne logistique en série comprend généralement un fournisseur, un fabricant et un détaillant. Les structures dyadiques sont plus complexes quand il s'agit d'une extension mathématique à la structure convergente ou divergente [BEA, 2001]. Cependant, ces structures sont étudiées en utilisant des approches de simulation.

ii. Structure convergente

Une structure convergente, représente essentiellement la chaîne logistique dans laquelle tous les éléments passant par les sites de la SC convergent vers un seul et même site, c'est le cas de l'industrie automobile, aéronautique ou navale, ou plusieurs composants et matériaux fournis par les fournisseurs sont assemblés par un seul fabricant. La configuration (par exemple, le nombre de niveaux, les pièces et le nombre de fournisseurs et de fabricants dans chaque niveau) de la structure convergente dépend de la nomenclature du produit final. Par exemple : dans le cas de l'industrie automobile, les entreprises sont constructeurs de voitures, les équipementiers de carrosserie, pare-brise sont des fournisseurs de niveau 1, les fournisseurs de matériaux textiles et sièges sont des fournisseurs de niveau 2. Cette structure a été traitée par plusieurs chercheurs tels : [BEA, 2001], [FOX, 2000], [KIM, 2002], [WUS, 1998].

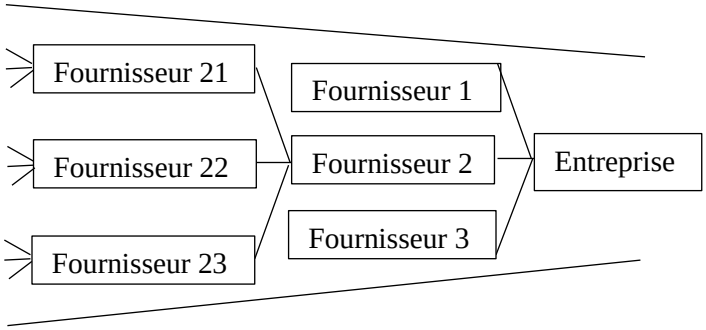


Figure 1.6. Structure convergente d'une SC [CHE, 2007]

iii. Structure divergente

Une structure divergente est une structure en série modifiée. Cette structure est utilisée pour représenter une chaîne logistique de distribution plus réaliste dans laquelle un fournisseur (par exemple, fabricant) distribue le stock à plusieurs entités en aval (par exemple, détaillant, distributeur). Les éléments partent d'une seule entité et se distribuent à travers la SC. Pour les SC avec assemblage à différentiation retardée, c'est le cas de l'industrie informatique, électronique et minière. On trouve dans la littérature plusieurs travaux portant sur les SC divergentes, par exemple : [BAN, 2001], [BEA, 2001], [CHE, 2002], [GAN, 2001], [WEN, 1999], [ZHA, 2001].

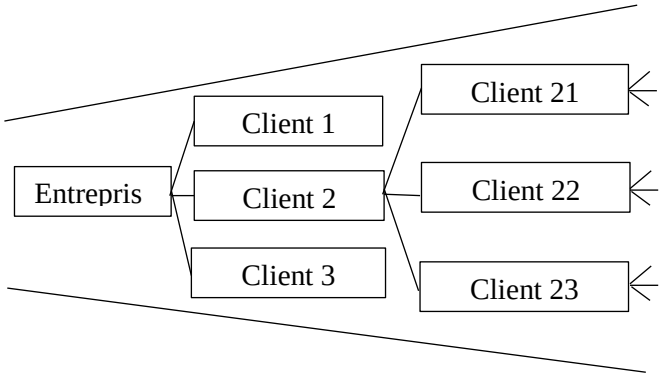


Figure 1.7. Structure divergente d'une SC [CHE, 2007]

iv. Structure mixte

Il s'agit des SC qui ne sont ni totalement convergentes ni totalement divergentes. Enfin, une structure de réseau est une combinaison des structures convergentes et divergentes. Cela représente une chaîne d'approvisionnement complexe.

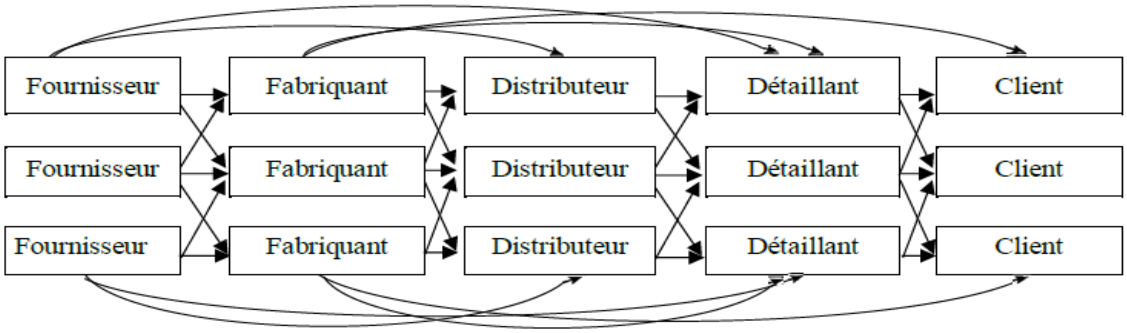


Figure 1.8. Structure mixte d'une SC [CHE, 2007]

1.3.2. Management de la chaîne logistique SCM

1.3.2.1 Définition de la SCM

Les entités de la chaîne logistique font partie intégrante d'un réseau. La mondialisation des économies, l'augmentation des coûts, le nombre limité de ressources, la durée de vie courte des produits, etc., comptent parmi les facteurs qui ont conduit à l'apparition du concept de la gestion de la chaîne logistique. La gestion d'une chaîne logistique (ou Supply Chain Management SCM) est considérée comme l'ensemble des outils et méthodes ayant pour but d'améliorer le processus d'approvisionnement en réduisant les coûts, les délais et les stocks.

Il existe de nombreuses définitions pour ce concept [JUL, 2007] :
« *Un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs, de manière à ce que la marchandise soit produite et distribuée à la bonne quantité, au bon endroit et au bon moment dans le but de minimiser les coûts et d'assurer le niveau de service requis par le client* » ;
« *La gestion de la chaîne logistique englobe la gestion des approvisionnements et des marchandises depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au produit fini (et aussi de son éventuel recyclage). La gestion de la chaîne logistique se focalise sur la façon dont les entreprises utilisent les processus, la technologie et l'aptitude à améliorer la compétitivité de leurs fournisseurs. C'est une philosophie de management qui prolonge les activités classiques intra-entreprise, rassemblant l'ensemble des partenaires commerciaux avec un but commun d'optimisation et d'efficience* » ;
« *L'intérêt du Supply Chain Management (SCM) est de faciliter les ventes en positionnant correctement les produits en bonne quantité, au bon endroit, et au moment où il y en a besoin et enfin à un coût le plus petit possible. Le principal objectif du SCM est d'allouer efficacement les ressources de production, distribution, transport et d'information, en présence d'objectifs conflictuels, dans le but d'atteindre le niveau de service demandé par les clients au plus bas prix* ».

L'enjeu de la SCM globale est la conception d'un réseau SCN prenant en compte les interactions entre les différentes entités de la chaîne logistique, ainsi que des mesures de performance externes qui doivent être intégrés à la phase de conception. Comme le montre la figure 1.9, un réseau de chaîne logistique

peut être présenté par un graphe orienté. Les nœuds de ce graphique représentent les différentes entités de la SC telles que les fournisseurs, les usines de fabrication et les clients. Le SCN est conçu en sélectionnant un réseau optimisant certaines mesures de performance telles que le coût de transport, le coût de la qualité, quantité, etc.

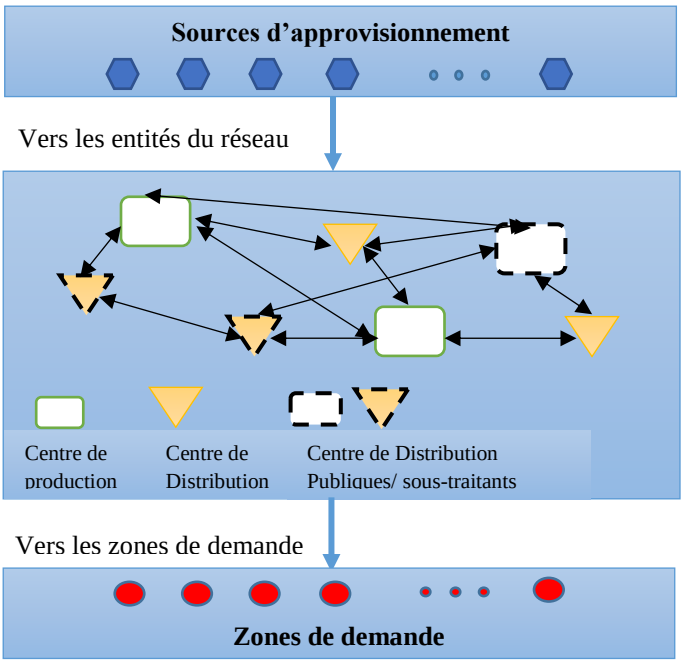


Figure 1.9. Exemple de réseau de chaîne logistique [KLI, 2008]

La conception de la chaîne logistique est une configuration stratégique dans le système décisionnel de la SC, et un facteur clé qui influence les niveaux opérationnels et tactiques, et a donc un impact durable sur les entreprises qui rendent le problème de conception des réseaux de la chaîne logistique d'une extrême importance.

1.3.2.2 Systèmes décisionnels

Dans un environnement commercial actuel, qui est de plus en plus concurrentiel et complexe, chaque décision de gestion de la chaîne logistique s'avère importante. Les entreprises se trouvent dans l'obligation de prendre les bonnes décisions rapidement et facilement, leur permettant ainsi de gérer leur chaîne d'approvisionnement depuis l'achat des matériaux jusqu'à l'utilisateur final, tout en améliorant les trois niveaux de décision du processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel.

- **Niveau Stratégique :** Ce niveau de gestion de la chaîne logistique, appelé aussi 'Strategic management', ou 'Strategic planning' comprend toutes les décisions à grande échelle qui affecteront l'ensemble du processus. Choix des fournisseurs, des gestionnaires de logistique et d'autres fonctions de la chaîne logistique, gestion des stocks et des produits, innovation et améliorations, développement d'un nouveau produit, systèmes informatiques requis, recherche de nouveaux partenaires industriels, affectation d'une nouvelle zone de marché à un centre de distribution, entre autres, sont toutes des décisions stratégiques prises par la direction générale sur le long terme.

- **Niveau Tactique :** Les processus définis à ce niveau de gestion de la chaîne logistique jouent un rôle énorme dans la maîtrise des coûts des opérations et la réduction des risques. Ce niveau décisionnel s'intéresse aux décisions à moyen et long terme où les cadres et chefs de production devront mettre en application pour assurer les objectifs fixés au niveau stratégique de l'entreprise. Les décisions tactiques portent sur la configuration des commandes, achats, niveaux d'inventaire et logistique de manière à procurer le maximum de profit possible, tout en satisfaisant la demande des clients. Elles portent aussi sur les problèmes liés à la gestion des ressources de l'entreprise, et la planification des activités sur ces ressources.
- **Niveau Opérationnel** : Les décisions prises au niveau opérationnel permettent de gérer les processus de production et les activités quotidiennes qui maintiennent l'activité de la chaîne logistique. Ces décisions sont prises par les opérateurs ou chefs d'équipes et sont limitées dans le temps (court terme) et dans l'espace puisqu'elles sont applicables au niveau d'un poste de travail. Les décisions tactiques aident à planifier le processus de production, à prévoir les ventes, faire le suivi de la logistique, à gérer les modifications, les contrats fournisseurs et les stocks, ainsi qu'à traiter les commandes des clients et à gérer le flux des produits, d'une entité à l'autre.

Le tableau 1.4 montre les différentes fonctions de l'entreprise et les processus associés pour chaque niveau décisionnel.

Tableau 1.4. Niveaux décisionnels dans une chaîne logistique [ROO, 2003]

	Les différentes fonctions de l'entreprise et les processus associés				
Niveau décisionnel/ Type de logiciel	**Acheter**	**Fabriquer**	**Stocker**	**Transporter**	**Vendre**
Stratégique	Quels fournisseurs ?	Quelles usines, quels sous-traitants ?	Quel réseau de distribution ?	Quels modes de transport, quels transporteurs ?	Quels produits, services, quels clients ?
Tactique ADVANCED PLANNING and SCHEDULING	Planification des achats	Planification de production	Planification de la distribution	Planification des transports	Prévision des ventes
Opérationnel ENTREPRISE RESSOURCE PLANNING	Gestion des achats	Gestion de la production	Gestion des stocks	Gestion des transports	Administration des ventes
Exécution SUPPLY CHAIN EXECUTION	Approvisionnement	Suivi d'atelier (manufacturing execution system)	Gestion de l'entrepôt (warehouse management system)	Gestion des tournées (Transportation management system)	Saisie des commandes

1.4 Conception des SCND

La conception du réseau de la chaîne logistique ou SCND est l'un des problèmes inclus la SCM (Supply Chain Managment). C'est une discipline stratégique qui a pour but de sélectionner la meilleure combinaison des entités de l'entreprise d'une manière efficace afin d'augmenter la performance globale de la SC. Les problèmes de SCND ont connu une grande importance au cours des dernières années, en raison de la compétitivité des marchés qui est de plus en plus accrue. Le premier travail concernant le SCND a été développé par [GEO, 1974] pour optimiser le flux de produits finis depuis les usines jusqu'aux centres de distribution. [BRE, 1987] a développé pour 'General Motors' un modèle SCND prenant en compte les quantités du produit, la sélection usine de fabrication à produire et l'objectif du marché. [CAM, 1997] a présenté un modèle mathématique d'analyse de la chaîne logistique chez 'Procter and Gamble' (P & G) afin d'améliorer l'efficacité de tous processus de travail et d'éliminer les coûts sans valeur ajoutée. En 1998, Beamon [BEA, 1998] a présenté une revue de la littérature sur la modélisation de la chaîne logistique. Il a classé les modèles de chaîne logistique en quatre catégories :

- *Modèles analytiques déterministes* : sont des modèles qui n'incluent pas d'éléments aléatoires.
- *Les modèles analytiques stochastiques* : les modèles probabilistes incorporent certains aspects de la variation statistique aléatoire.
- *Modèles économiques* : sont des cadres simplifiés conçus pour illustrer des processus complexes, en utilisant des techniques mathématiques ;
- *Modèles de simulation* : sont des modèles commerciaux mathématiques combinant des concepts mathématiques et logiques qui essayent d'imiter un système de la vie réelle en utilisant un logiciel informatique.

Nous résumons dans le tableau 1.5 les principales publications développant chaque catégorie de ces modèles.

Tableau 1.5. Catégories des modèles de SCND [RAM, 2008]

Catégories du modèle	Exemple de publications ayant développé le modèle
Modèles analytiques déterministes	[COH, 1989] ; [ARN, 1995] ; [VOU, 1996] ; [CAM, 1997].
Modèles analytiques stochastiques	[COH, 1989] ; [SVO, 1991] ; [LEE, 1993] ; [PYK, 1993]
Modèles économiques	[CHR, 1994]
Modèles de simulation	[TOW, 1991]

D'autre part, en ce qui concerne les modèles de SCND, il y a divers aspects de l'environnement décisionnel ainsi que les conditions fluctuantes du monde réel qui sont pris en considération. En effet, les problèmes de SCND couvrent un large éventail de formulations allant des modèles simples, mono produit, déterministe et linéaire, aux modèles complexes, multi-produits, stochastiques non linéaires.

D'après [HAS, 2016], ces modèles supposés plus « riches » gèrent plusieurs niveaux du réseau logistique, plusieurs périodes, produits, modes de transport et intègrent des contraintes de capacité, des décisions tactiques et des flux de produits complexes. Plusieurs études ont été menées par les chercheurs

comme [BEA, 1998] et [HUB, 2007] sur les modèles de SCND. [HUB, 2007] a classifié les modèles de SCND selon les catégories décrites dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6. Grille de classification des différents modèles de SCND [HUB, 2007]

Critère de classification	Caractéristiques
Horizon de planification	Mono période - Multi périodes
Fonction Objectif	Mono Objectif - Multi objectifs
Produits	Mono produit - Multi produits
Caractéristiques du modèle	Déterministe - Stochastique - Continu - Discret Linéaire - Non linéaire
Nature du modèle	Analytique - Simulation - Descriptif Centralisé - Distribué
Structure de la chaîne	Dyadique – Convergente - Divergente Série – Réseau - Intra-entreprise Inter-entreprises
Processus	Approvisionnement – Production - Distribution Vente - Logistique inverse
Niveau de décision	Stratégique – Tactique - Opérationnel Temps réel

1.4.1. Les mesures de performance dans la SCND

Les mesures de performance sont un ensemble de techniques permettant de mesurer la performance d'un système ou d'un processus en tenant compte, non seulement de la rentabilité obtenue mais aussi du risque pris pour obtenir cette rentabilité. Les managers doivent choisir les mesures de performance de la chaîne logistique de manière à satisfaire les objectifs de l'entreprise qui consistent à réduire les coûts tout en maintenant un bon niveau de qualité pour le client final.

Le choix de la mesure de performance appropriée demeure une tâche difficile dans la conception des SCND. La plupart des modèles de SC intègrent des coûts d'exploitation, mais le coût de la qualité a été ignoré. [BEA, 2000] a présenté un recueil d'importantes mesures de performance pour l'évaluation de l'efficacité et de l'efficience de la SC. Une mesure de performance est classée comme quantitative ou qualitative et utilisée pour évaluer l'efficacité d'un modèle et pour concevoir des modèles alternatifs. Parmi les mesures de performance qualitatives décrites par [BEA, 2000] :

- La satisfaction du client (interne, externe ou final, la satisfaction de la transaction, les garanties, les supports offerts après un achat) ;
- Efficacité et efficience du transport ;
- Degré de communication (concerne les flux physiques et d'informations) tout au long de la chaîne logistique ;
- La flexibilité et la gestion efficace des risques (liée au degré auquel la chaîne d'approvisionnement peut réagir aux changements de la structure de la demande) ;
- Performance du fournisseur (délai de livraison, niveau de livraison sans défauts, niveau de qualité requis).

Pour les mesures de performance quantitatives, on peut citer ([BEA, 2000]) :

- Minimisation du coût total de la chaîne logistique ;
- Maximisation des ventes ou des bénéfices et profits ;
- Minimisation de l'investissement dans les stocks ;
- Maximisation du retour sur investissement ;
- Réduction du temps de réponse du client, réduction du délai ;
- La minimisation des retards de produit qui mesure le délai entre la commande et le délai de livraison réel, minimisation des délais de réapprovisionnement et de la durée totale du cycle de la SC.

Le choix de la mesure de performance appropriée et efficace demeure une étape critique dans la conception et l'évaluation des SCND, de plus en plus que le système est grand et complexe. Certes, l'utilisation des mesures simples reste plus facile à implémenter dans les modèles de SCND, cependant, ils ne permettent pas d'améliorer leur efficacité.

Sur la base des recherches effectuées par [BEA, 2000], nous avons constaté que les mesures de performance les plus utilisées sont : la satisfaction du client et la réduction des coûts se rapportant généralement aux coûts opérationnels, sans aborder les coûts encourus pour éviter une mauvaise qualité dans la modélisation de la SCND.

1.4.2. Intégration du COQ comme mesure de performance dans la conception des SCND

Le coût de la qualité (COQ) est considéré comme une mesure de performance clé dans la SCND qui traduit la mauvaise qualité en termes financiers pour les gestionnaires. Il peut être mesuré, contrôlé et analysé pour atteindre un haut niveau de qualité à un coût minimal pour atteindre la satisfaction des clients. Au cours des dernières années, l'importance de l'intégration du COQ dans la conception des réseaux des chaînes logistiques en tant qu'un élément important du processus de planification de la qualité, a suscité un grand intérêt, et est considéré comme l'un des problèmes inclus dans la SCM.

[SRI, 2008] a mesuré le COQ en termes financiers à l'aide du modèle P-A-F sur certaines entités telles : les sites de fabrication en sous-traitance choisis par une société pharmaceutique leader dans le secteur de la recherche en Inde. L'auteur a collecté les données des années précédentes à l'aide des méthodes traditionnelles par le biais d'entretiens avec des clients internes et des fiches de contrôle sur les sites des sociétés. Ensuite, les éléments de coût de la qualité ont été identifiés et classés en coûts de prévention, évaluation, défaillances internes et externes. Les coûts de la qualité ont été estimés en termes financiers suivant le modèle P-A-F (prévention-évaluation-défaillance). Les facteurs déterminants du COQ dans cette SC pharmaceutique ont été analysés suivant la méthodologie d'analyse standard DMAIC (définition-mesure-analyse-amélioration-vérification).

[RAM, 2008] a également introduit un modèle intégrant le COQ dans le réseau de la chaîne d'approvisionnement et a constaté que son intégration dans la conception du réseau pourra garantir le coût global le plus bas et réduira les défauts d'environ 16%.

[CAS, 2014] a développé un modèle mathématique incorporant le COQ dans le SCND. Ils ont étudié l'impact de la défaillance et du taux d'erreur d'inspection chez le fabricant sur le COQ total et le niveau de qualité.

[DAS, 2011] a proposé un modèle de SC global (GSC) stratégique qui permet aux gestionnaires d'assurer la qualité et la sécurité des produits. Le modèle permet aux gestionnaires d'assurer la qualité et la sécurité des produits, évitant ainsi les retraitements coûteux des produits, ainsi que d'autres exigences critiques de qualité, basées sur la politique qualité. L'auteur a fourni une procédure permettant d'introduire un

processus de contrôle de la qualité pour l'amélioration continue des fournisseurs. Le modèle a été validé par une application chez les fournisseurs, les systèmes de fabrication et les systèmes de distribution.

[AYA, 2013], a développé un modèle mathématique en considérant le coût de la qualité dans la chaîne logistique. Le modèle proposé est examiné par rapport aux données du coût de la qualité en temps réel de la chaîne logistique à deux intervalles, d'abord à la période d'immaturité de qualité, puis à la période de maturité de qualité. Des outils statistiques sont utilisés pour valider le modèle et comparer son comportement dans les deux intervalles.

[WAL, 2016] a proposé un modèle intégrant le coût de la qualité dans la conception de multi-produits et multi-composants SCND. Cette recherche a été menée de manière à minimiser les coûts tout en maintenant un bon niveau de qualité pour satisfaire les besoins finaux. Un modèle mathématique à nombres entiers mixtes non linéaire MINLP a été développé pour modéliser le problème. Les solutions obtenues par les algorithmes génétiques et la recherche tabou montrent l'impact de l'intégration du coût de la qualité en tant qu'indicateur de performance, sur le processus de conception et du choix des itinéraires résultants.

[ALG, 2017] a proposé un modèle basé sur la classification P-A-F afin d'examiner les effets de l'intégration du coût d'opportunité dans les calculs des COQ, et créer un cadre général pour le comportement de tous les facteurs de coût de la qualité au sein de la SC. L'étude a souligné l'importance de l'analyse du coût d'opportunité dans la prise de décision pour les stratégies de gestion de la qualité.

[REH, 2018] a publié une étude sur les COQ en tant qu'une méthodologie qui permet à une organisation de déterminer dans quelle mesure ses ressources sont utilisées, pour éviter la mauvaise qualité, et évaluer la qualité des produits ou services qui résultent des défaillances internes et externes.

[GHA, 2018] a proposé une recherche pour la mise en œuvre réussie de la détection des coûts de la qualité dans les organisations industrielles ainsi que la restructuration des systèmes de qualité. L'auteur a fait une analyse de l'influence du coût de la qualité (coûts de prévention, d'évaluation, de défaillance interne et de défaillance externe) et sur ses avantages concurrentiels sur toutes ses dimensions : coût, qualité, flexibilité, livraison et créativité. La recherche a été effectuée sur 103 organisations. Les recherches ont abouti à de nombreuses conclusions théoriques et pratiques, qui assurent que le coût de la qualité constitue un véritable indicateur de la capacité des organisations industrielles à obtenir un avantage concurrentiel.

[MUR, 2018] a développé une approche intégrée du coût de la qualité et de Six Sigma dans les SC afin d'arrêter les défaillances avant qu'ils ne soient créés et réduire le COQ en permettant à la maintenance d'évoluer vers un modèle prédictif au lieu d'un modèle réactif.

[NAL, 2018] a développé un modèle MILP d'un SCND en boucle fermée pour un système de fabrication. L'objectif est de maximiser les profits en déterminant l'inventaire optimal de la combinaison de produits et de pièces au cours de plusieurs périodes. L'auteur a examiné la politique standard de la quantité d'ordre fixe en considérant trois principaux types de retour et récupération, à savoir : les retours commerciaux, les retours en fin d'utilisation et les retours en fin de vie. Pour développer ce modèle, l'auteur a considéré les entités suivantes : le fournisseur de matières premières, le fabricant, le distributeur, le détaillant, les clients et les principaux sites de collecte des retours tels que le site de réparation, le site de démontage, le site de recyclage et le site d'élimination. Les résultats du modèle ont été obtenus en utilisant le studio IBM ILOG CPLEX OPL et analysés à l'aide d'investigations numériques suivies d'une analyse de sensibilité.

[PAR, 2018] a développé un modèle de SCND stochastique et multi objectifs en tenant compte des perturbations ayant une incidence sur la disponibilité et la qualité de l'approvisionnement, pour déterminer les meilleures stratégies de sélection et d'inspection des fournisseurs afin d'atténuer les effets de ces perturbations. L'auteur a considéré les coûts d'exploitation, le coût de la demande non satisfaite, le coût d'expédition de produits contaminés à un client et le coût du contrôle qualité. Le but est de minimiser simultanément ces objectifs contradictoires afin d'obtenir une meilleure qualité d'approvisionnement. Un programme basé sur les algorithmes génétiques a été développé pour résoudre ce problème NP-difficile et pour identifier les configurations du SC Pareto-optimales. Cette approche proposée permet une conception efficace des SC de haute qualité et de déterminer un compromis approprié entre divers coûts.

[PAT, 2019] a présenté une étude de cas pour analyser les risques liés à l'estimation des éléments de COQ dans la SC interne d'une entreprise de fabrication d'aluminium. L'auteur a fait recours au modèle classique du P-A-F pour classifier les catégories du coût, et a analysé le risque lié à ces coûts afin d'estimer la plage et les probabilités de toutes les catégories de COQ possibles dans la SC. Les résultats obtenus par la simulation de Monte Carlo servent pour la prise de décision des mangers en matière de gestion stratégique de la qualité totale.

1.5 Problèmes d'optimisation de la SCND

1.5.1 Définition

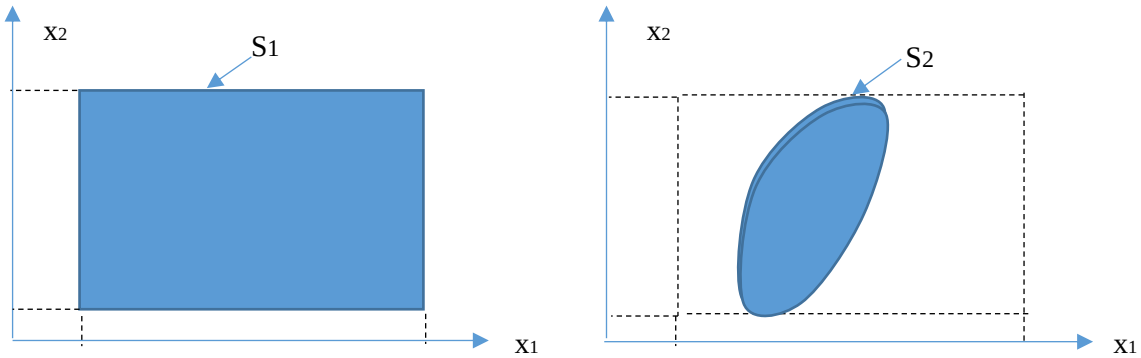
L'optimisation est une branche des mathématiques qui consiste à modéliser un problème concret, et le résoudre analytiquement. L'optimisation intervient dans plusieurs domaines : en recherche opérationnelle, en analyse numérique, en automatique et en ingénierie, notamment dans la résolution des problèmes liés à la conception et modélisation des réseaux des chaînes logistiques. Lors de la conception des SCND, les managers confrontent souvent des problèmes de complexité grandissante : La nature des décisions à prendre, les objectifs recherchés, les contraintes prises en compte, etc. Le problème à résoudre est généralement exprimé sous la forme d'un problème d'optimisation, avec une fonction coût dite fonction objectif (ou plusieurs dans le cas d'une optimisation multi objectifs). Un problème d'optimisation consiste à rechercher l'optimum qui est soit le minimum ou le maximum d'une fonction objectif donnée, par rapport à tous les paramètres ou variables de décision concernés.
Les variables de la fonction objectif ne peuvent évoluer que dans l'espace de recherche fixé par les contraintes du problème. Ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.
En particulier, la solution proposée est dite réalisable, si tous les paramètres et variables liés à cette solution respectent les contraintes du problème.

Selon [COL, 2002], la forme mathématique d'un problème d'optimisation mono objectif est généralement présentée par :

$$\begin{cases} minimiser\ f(\overrightarrow{x}) \\ avec\ \overrightarrow{g}(\overrightarrow{x}) \leq 0 \\ et\ \overrightarrow{h}(\overrightarrow{x}) = 0 \end{cases} \qquad \text{([COL, 2002])}$$

Avec :
$f(\overrightarrow{x})$: La fonction à optimiser, $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$
$\overrightarrow{g}(\overrightarrow{x}) \in \mathbb{R}^m$, avec m le nombre de contraintes d'inégalité.
$\overrightarrow{h}(\overrightarrow{x}) \in \mathbb{R}^p$, avec p le nombre de contraintes d'égalité.

Dans le cas où la fonction objectif est linéaire en fonction des variables de décision, c'est donc la programmation linéaire qu'on utilise pour la résolution de ce type de problème.
La solution optimale appartient à l'espace des solutions réalisables (b) qui, lui-même appartient à l'espace de recherche (a), comme décrit sur la figure 1.10.



(a) Espace de recherche (b) Espace des valeurs réalisables

Figure 1.10. Les différents espaces de recherche [COL, 2002]

Le but est donc de déterminer s'il existe, dans l'espace des solutions, une solution pour laquelle la fonction objectif soit supérieure (resp. inférieure) ou égale à une valeur donnée.

En pratique, les problèmes comportent généralement une ou plusieurs complications, par exemple : la non linéarité de la fonction objectif, ou des contraintes, ou dans le cas d'une optimisation à plusieurs objectifs contradictoires, et ceci met en défaut le choix des méthodes de résolution les plus simples : les méthodes exactes. Les différentes méthodes de résolution sont détaillées dans la partie suivante.

1.5.2 Classification des problèmes d'optimisation

Dans la pratique, nous rencontrons des classifications différentes des problèmes d'optimisation. Ces classifications adoptent le nombre et type des variables de décision, type de la fonction objectif, formulation du problème, etc. Le tableau 1.7 résume la classification des problèmes d'optimisation.

Tableau 1.7. Classification des problèmes d'optimisation

Critère de classification	Caractéristiques
Nombre des variables de décision	Mono variable - Multi variables
Type des variables de décision	Entier (Optimisation combinatoire / Programmation en nombres entiers) Réel (Optimisation continue/ Programmation linéaire (LP) / Programmation non linéaire (NLP)) Combinatoire (Programmation mixte)
Type de la fonction objectif	Linéaire – Quadratique - Non linéaire - Convexe Différentiable - Non différentiable
Formulation du problème	Avec contraintes - Sans contraintes

L'optimisation se distingue en deux catégories : l'optimisation combinatoire et l'optimisation continue.

i. Optimisation continue

L'optimisation continue consiste à rechercher les paramètres d'un modèle numérique pour approcher au mieux des données réelles [HAC, 2013]. Dans l'optimisation continue, on distingue les problèmes linéaires qui relèvent de la programmation linéaire, et les problèmes non linéaires, où l'on retrouve dans l'optimisation difficile. Cette dernière peut avoir des solutions en exploitant les gradients de la fonction objectif par le biais de la recherche locale répétitive, ou bien par une méthode de recherche globale si le nombre de minima locaux est très important. Le recours aux méta-heuristiques dans ce cas s'impose.

ii. Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire appartient à la classe des problèmes NP-difficiles dont la résolution exacte n'est pas possible en un temps de calcul proportionnel à Nn, où N désigne le nombre de paramètres inconnus du problème, et n : est un entier, et sont généralement difficiles à résoudre, vu qu'ils ne possèdent pas une solution algorithmique efficace valable pour toutes les données [JIN, 1999]. Parmi les problèmes combinatoires, on cite : Le Problème du Voyageur de Commerce (PVC), Le Problème d'Affectation Quadratique (PAQ), Les problèmes d'ordonnancement [ALA, 2012]. Plusieurs méthodes de résolution ont été développées. Ces méthodes sont classées en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées.

a) Les méthodes exactes

Une méthode exacte consiste à donner, d'une manière complète, l'ensemble des solutions de l'espace de recherche, à l'aide des techniques de calcul des bornes supérieures et inférieures, et d'heuristiques pour orienter les choix des solutions. Le principe de cette méthode consiste donc à rechercher l'optimum global. Par exemple : les techniques de séparation, évaluation progressive (SEP), les algorithmes avec retour arrière et la méthode de "Branch and Bound" dans laquelle on effectue les étapes suivantes :

- l'espace de recherche est divisé en sous-espaces,
- Chaque sous espace de recherche doit avoir une borne minimale
- Les "mauvais" sous-espaces sont éliminés,
- Les étapes précédentes sont réitérés jusqu'à obtention de l'optimum global.

Cette méthode rencontre des difficultés face aux applications dont l'espace de recherche est de taille trop importante. En effet, elle permet juste de trouver des solutions optimales pour des problèmes de petite taille et demandent un temps de traitement assez important.

b) les méthodes approchées

Ces méthodes donnent des solutions optimales approximatives mais efficaces. Dans le cas d'une optimisation d'un problème difficile (par exemple le nombre de minima locaux est très élevé), on a recours ou bien aux heuristiques spécialisées à un problème donné, ou bien aux méthodes approchées dites méta heuristiques. Ces méthodes s'appliquent à tous les problèmes combinatoires, et s'adaptent également aux problèmes continus. Les méta-heuristiques sont des méthodes générales de recherche dédiées aux problèmes d'optimisation difficile [SAI, 1999]. Ces méthodes sont, en général, présentées sous la forme de concept et reprennent des idées inspirées par des analogies avec la physique : recuit simulé, diffusion simulée, etc., avec la biologie : algorithmes génétiques (dont le détail sera présenté dans le chapitre suivant), recherche tabou, etc. ou avec l'éthologie : colonies de fourmis, essaims de particules, etc. [COL, 2002].

La figure1.11 montre cette classification générale des méthodes d'optimisation.

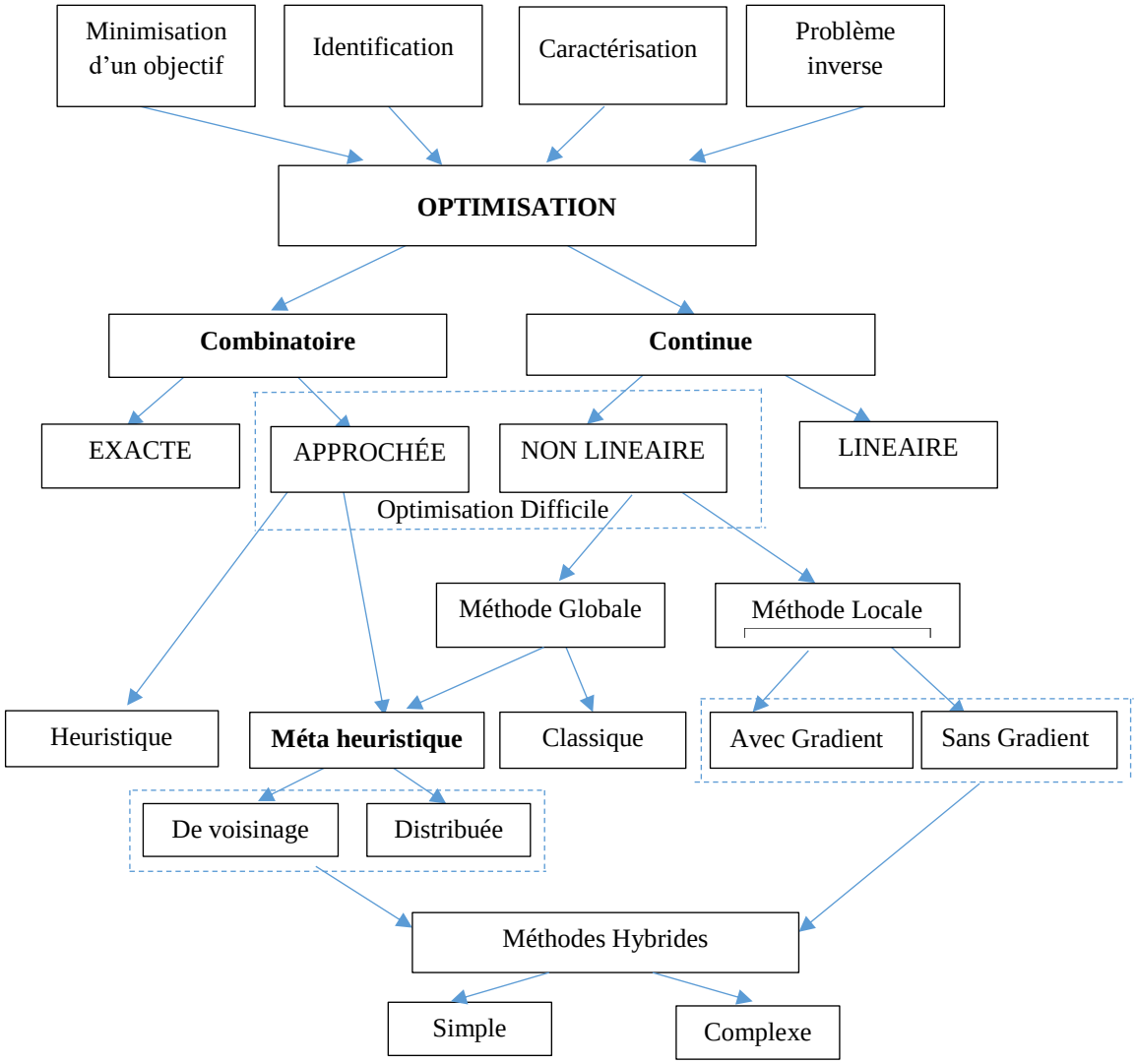


Figure 1.11 Classification générale des méthodes d'optimisation monobjectif [COL, 2002]

1.5.3 Optimisation de la SCND

Pour structurer la revue de la littérature des problèmes de la SCND, nous allons présenter un état de l'art pour passer en revue les travaux existants sur les problèmes de SCND en termes de structure de réseau et approches de modélisation. Les notations utilisées pour ces modèles sont données dans le tableau 1.8.

Tableau 1.8. Codes des approches de modélisation

Catégorie	Détail	Code
Objectif du modèle	Coût total	C
	Coût de la qualité	COQ
	Profit	Pr
	Robustesse	Ro
	Délai de livraison	Dp

	Risque financier	Fr
	Niveau de service	Re
Décisions du modèle	Emplacement/affectation	La
	Satisfaction de demande	Ds
	Transportation	Tv
	Taux de défaut	Rd
	Taux d'erreur d'inspection	Ir
	Quantité	Q
	Capacité de l'entité	Fc
	Nombre de périodes	T
	Nombre de fournisseurs	J
Catégories du modèle	**Période**	
	Multi-période	MP
	Mono- période	SP
	Product	
	Multi-produit	MPr
	Mono –produit	SPr
	Paramètres	
	Déterministes	D
	Stochastique	S

Dans le but d'élaborer une bibliographie générale et complète sur les travaux d'optimisation des SCND avec ou sans considération du COQ, plusieurs bases de données ont été examinées dont on cite les principales : IEEE Xplore, Science Direct, Web of Knowledge, Taylor et Francis Online, Springer, Elsevier, et Scopus. Une examination soigneuse des articles scientifiques, articles professionnels et thèses de doctorat nous a permis d'établir le tableau 1.9 qui représente les principaux travaux d'optimisation de SCND ainsi que leurs caractéristiques de modélisation

Tableau 1.9. Caractéristiques de modélisation des travaux révisés [DOU, 2016]

N°	Références	COQ incorporé?	Variables de décision	Catégorie du modèle	Objectif du modèle	Méthode d'optimisation
1	[ROS, 1977]	Non	Tr, Q	SPr, SP, D	C	Recuit simulé + Recherche tabou
2	[BEA, 2000]	Non	La, Tv	SP, MPr, S	C, Re	ε-constraint method
3	[SYA, 2002]	Oui	La, Tv	SPr, MP, D	COQ, Pr	Algorithmes génétiques (AG)
4	[JAY, 2003]	Oui	Tv, La	SPr, MP, D	COQ, Pr	Recuit simulé (SA)
5	[ALT, 2006]	Non	Q	SPr, SP,D	C, Re, V	Genetic Algorithm (AG)
6	[REZ, 2007]	Non	La, Tr, Fc	SPr, MP, S	Pr, Re	ε-constraint method
7	[RAM, 2008]	Oui	Rd, Q	SPr, MP, S	COQ, C	LINGO
8	[ASI, 2008]	Oui	Q, Fc	SPr, MP,D	COQ	Gradient search matlab 7.0
9	[IZQ, 2008]	Non	Q	SP, MPr, D	C	Essaims particulaires (PSO)

10	[OZG, 2009]	Oui	Dp, Q	Spr, Sp, D	COQ	Algorithmes Génétiques(AG)
11	[FUL, 2009]	Non	Q	SPr, MP, D	C	Algorithmes Génétiques(AG)
12	[PAK, 2010]	Non	Q, Ds, Tv	Spr, Sp, D	C, Dp, Re	LINGO
13	[PIS, 2010]	Oui	La, Tr, Fc	SPr, SP, D	COQ, Re	Recuit simulé (SA)
14	[SHI, 2010]	Non	Ds, Q, T	MP, SPr, D	C	TS
15	[ARM, 2011]	Non	Tv, Ds, Q	MP, MPr, D	C	TS
16	[DAS, 2011]	Non	La, Fc	SPr, MP, S	Pr	LINGO
17	[ALB, 2011]	Non	Q, Ds, La	MPr, MP, S	C	Weighting Method
18	[RUI, 2011]	Non	La, Ts	SPr, Sp, D	C	Decomposition methods
19	[FLE, 2011]	Non	L, Ts	SPr, Sp, D	C	CPLEX
20	[BEN, 2011]	Non	Fc, Q, Tv	MPr, MP, S	C	LINGO
21	[ABB, 2011]	Non	Q	MPr, Mp, S	C	hGA = AG + PS (Algorithmes Génétiques+ pattern search technique)
22	[BOZ, 2012]	Non	Tv, La	Mpr, Sp, D	C	Algorithmes Génétiques(GA)
23	[KIR, 2012]	Non	Q, Ds	MP, SPr, S	Re, C	(PSO)
24	[CHE, 2012]	Non	Q, Tv, Fc	MP, MPr, D	C	PSO
25	[RAJ, 2012]	Non	Tv, Fc, Ds	MP, MPr, S	C	PSO
26	[RAD, 2013]	Non	Tv, Q	MP, MPr, D	C, Dp	PSO
27	[SHA, 2013]	Oui	Q	MPr, MP, S	COQ, V	Differential Evolution Algorithm
28	[MAJ, 2013]	Non	Q, T, J	MPr, MP, D	C, Pr	Algorithmes Génétiques(AG)
29	[KRY, 2014]	Oui	Tv, Q	SPr, SP, S	COQ, Pr	Algorithmes Génétiques(AG)
30	[SEY, 2014]	Non	Q, La	Spr, Sp, D	Dp, C	Algorithmes Génétiques(AG)
31	[ANI, 2015]	Non	Q, La, Ds	Mpr, Mp, S	C	Fuzzy optimisation model
32	[YAS, 2016]	Non	Ds, Fc	MPr, Sp, D	C	Geographic Information System (GIS)
33	[MAC, 2016]	Non	Fc, Ds	SP, MPr, D	C	Recherche tabou (TS)
34	[NAL, 2018]	Non	La, T, Fc	MP, SPr, D	C	CPLEX
35	[PAR, 2018]	Non	La, Fc, Ds	SP, SPr, S	C, COQ	Algorithmes génétiques (AG)

Comme le montre le tableau 1.9, une grande partie des problèmes SCND est déterministe et implique des problèmes simultanés : l'optimisation des problèmes avec au moins deux fonctions objectifs en conflit (exemple maximiser le profit et minimiser le coût). Une plus petite partie (25.75 %) est associée à l'optimisation de la SCND en tenant compte du coût de la qualité.

A propos des méthodes utilisées pour la résolution des problèmes de SCND, les méthodes approchées représentent 61.29% de la documentation étudiée, le reste soit 38.71% c'est des résolutions par des méthodes exactes. La figure 1.12 montre le pourcentage de l'utilisation des algorithmes d'optimisation dans la littérature pour les problèmes de SCND.

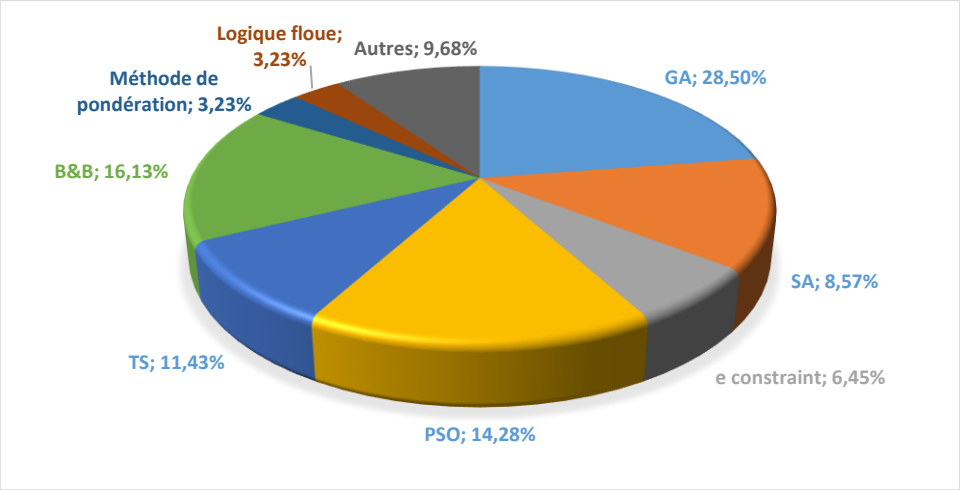


Figure 1.12. Utilisation des algorithmes d'optimisation dans la littérature

Selon l'analyse du tableau 1.9, on constate aussi que la méthode Branch & Bound représente une grande partie des méthodes exactes utilisées. Concernant les méthodes approchées, les algorithmes évolutionnaires sont les plus utilisés. Le GA vient en tête de ces algorithmes avec une utilisation de 28,50%, vient ensuite le PSO avec une part de 14,28% et le SA avec 8,57% d'utilisation.

1.5.4 Orientation de nos travaux de recherche

Bien que la majorité des modèles SCND impliquent une optimisation simultanée avec au moins deux fonctions objectifs, les techniques évolutionnaires telles que les AGs et le recuit simulé (SA) pour l'optimisation de la chaîne logistique, ont été appliqués en raison de la possibilité de traiter des problèmes d'ingénierie multidimensionnels non linéaires ([PIN, 2004], [FAR, 2008]). Cela justifie notre grand intérêt d'utiliser ces algorithmes pour résoudre ce type de problèmes. La fonction objectif est dans la majorité des travaux porte sur la minimisation du coût total, mais le COQ n'est considéré que dans quelques travaux d'optimisation des SCND en général, et en particulier dans les SCND alimentaires. Dans notre étude, nous présentons une revue de l'application du SA et des AGs pour la résolution des problèmes SCND. [COL, 2002] a détaillé ces outils et techniques d'optimisation comme le montre la figure 1.13.

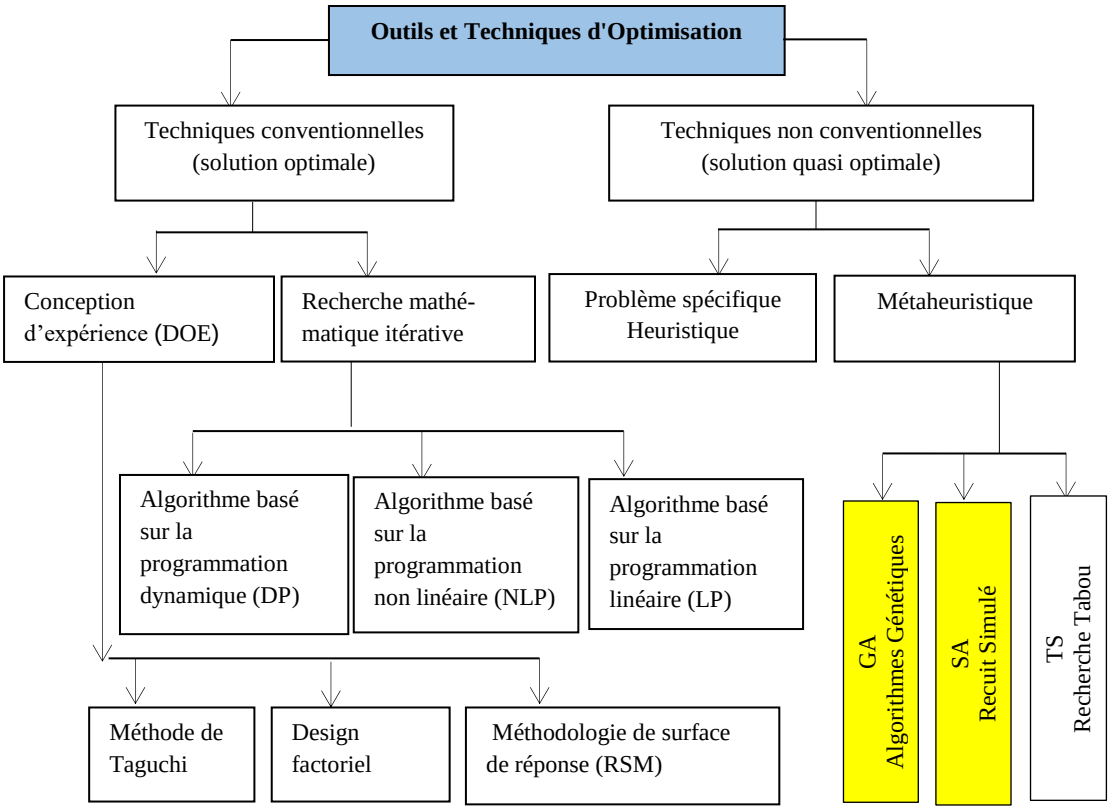


Figure 1.13. Outils et techniques d'optimisation conventionnels et non conventionnels [COL, 2002]

1.5.3.1 Le recuit simulé et ses applications

Le recuit simulé a été proposé en 1983 par [KIR, 1983]. C'est une méthode inspirée du procédé qui a été adoptée à partir du processus de refroidissement progressif du métal dans la nature [MET, 1953]. Il fonctionne en imitant le processus physique par lequel un solide est lentement refroidi de sorte que finalement sa structure soit gelée. SA est une technique de recherche stochastique, qui a été conçue pour guider la procédure de recherche afin d'échapper au piège de l'optimalité locale.

Le premier algorithme a été développé par [COL, 1988] afin de résoudre des problèmes d'optimisation avec des variables continues. Les éléments de base du recuit simulé (SA) sont décrits dans l'organigramme comme le montre la figure 1.14.

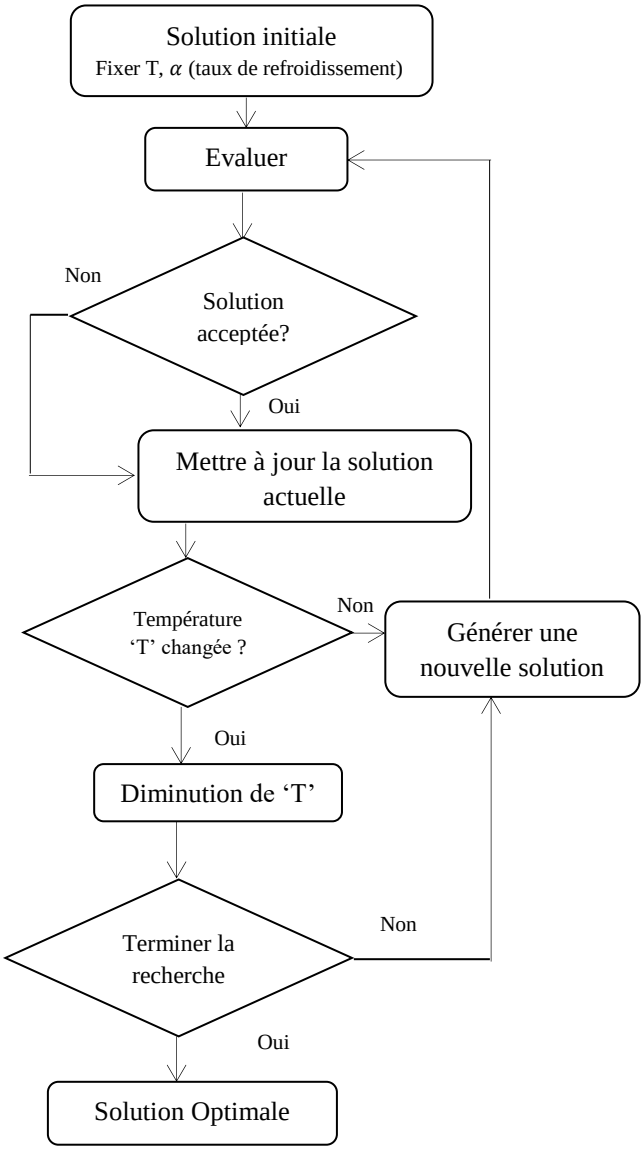


Figure 1.14. Diagramme d'optimisation par le Recuit Simulé [LEE, 1993]

Selon [JAY, 2003], l'application du Recuit Simulé est très efficace pour la résolution des problèmes complexes de la SCND. Pour son système de conception PLOT (Production, Logistique, Outbound, Transport), la fonction objectif vise à minimiser les coûts fixes pour actionner les entrepôts et les centres de distribution, les coûts de transport des produits depuis les entrepôts vers les centres de distribution et les coûts liés à la fourniture de produits à partir des centres de distribution pour satisfaire la demande des clients. L'algorithme (SA) s'est avéré très rapide et efficace dans divers contextes expérimentaux.

[ROS, 2003] ont développé un algorithme SA pour optimiser l'emplacement des centres de distribution dans la conception du réseau de la chaîne logistique, à travers deux fonctions objectifs. La première fonction représente le modèle stratégique et vise à minimiser les coûts fixes et les coûts de transport. La deuxième fonction représente le modèle opérationnel utilisé pour minimiser les coûts d'approvisionnement et de transport des produits. L'auteur a intégré le recuit simulé avec deux

approches : la recherche Tabou le 're-scaling' et a comparé les deux méthodes appelés 'TABU SA' et 'RESCALE-SA'. L'étude expérimentale a montré que 'TABU-SA' fournissait des solutions de meilleure qualité en moins de temps.
[PIS, 2010] ont proposé une méthodologie d'optimisation pour la conception d'un réseau de logistique inverse utilisant un SA. Les réglages des paramètres SA dans son étude sont les suivants : température initiale = 100 et k = 7. Le modèle proposé aide à trouver des emplacements, le nombre de centres de collecte ainsi que la quantité de transport entre les installations. Le SA est codé en MATLAB 7.0, et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par le logiciel LINGO 8.0. LINGO est basé sur un algorithme de branchement et de liaison pour résoudre les problèmes et trouver la solution optimale globale. La performance de l'algorithme SA a été évaluée sous différents paramètres de SA.

[CAS, 2012] a utilisé SA comme procédure heuristique pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire dans la Conception de la chaîne logistique intégrant le coût de la qualité. Le modèle développé vise à choisir les entités de SC qui maximisent le profit et minimise le COQ total pour déterminer le taux d'erreur lors de l'inspection et la probabilité de défaillance lors de la fabrication. Les réglages des paramètres SA dans son étude sont les suivants : Taux de refroidissement (α) : inf 0,7, sup = 0,9 ; Température initiale (To) : inf = 400, sup = 500 ; Probabilité de mutation : inf = 0,2, sup = 0,8. L'étude montre que les instances problématiques de taille réaliste peuvent être résolues rapidement en utilisant SA.

[ALR, 2013] a étudié un problème d'optimisation stochastique d'une chaîne logistique multi objectifs. L'auteur a développé un algorithme basé sur le recuit simulé pour résoudre ce problème. L'algorithme utilise le critère de 'hill-climbing' pour échapper au piège du minimum local. Ensuite, l'algorithme proposé a été appliqué à un exemple d'inventaire et les résultats numériques ont démontré que l'algorithme est capable de construire un ensemble de solutions de Pareto non dominé.

Nous résumons dans le tableau 1.10 quelques références qui ont développé une approche de solution basée sur le recuit simulé.

Tableau 1.10. Utilisation du SA pour l'optimisation de la SCND

Références	Taux de refroidissement	T0	Probabilité de mutation	Taille
[CAS, 2012]	0.7-0.9	400-500	0.2-0.8	3/2/2 to 9/4/7
[JAY, 2003]	0.2-0.95	NS*	NS	5/ 10/ 30/ 2 to 5/15/ 75/ 3.
[PIS, 2010]	0.03-0.15	70-100	NS	NS
[ALR, 2013]	0.05-0.15	T_k	NS	NS

*NS : Non spécifié

La méthode du SA donne des résultats plus fins et sa puissance provient de la bonne technique de sélection et de recuit. Cependant, il existe peu de recherches sur l'utilisation de la méthode de recuit simulé pour l'optimisation SCND afin de minimiser le COQ. Sauf les travaux précédemment traités, il n'y a pas d'utilisation de SA dans le réseau logistique.

1.5.3.2 L'Algorithme Génétique et ses applications

Les Algorithmes Génétiques sont des techniques d'optimisation évolutifs développés par [HOL, 1975] et ses collaborateurs dans les années 1970, inspiré par la théorie de Darwin sur l'évolution. L'algorithme GA est démarré avec un ensemble de solutions appelé population initiale. Cette population est codée sous forme de tableaux de bits ou de chaînes de caractères (chromosomes). L'essence des

algorithmes génétiques implique l'utilisation d'opérateurs génétiques comme le croisement, la recombinaison, la mutation et sélection pour obtenir une nouvelle population avec l'espoir que la nouvelle population sera meilleure que l'ancienne. Ceci est répété jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit remplie. La procédure des AGs est décrite dans le diagramme présenté dans la figure 1.15.

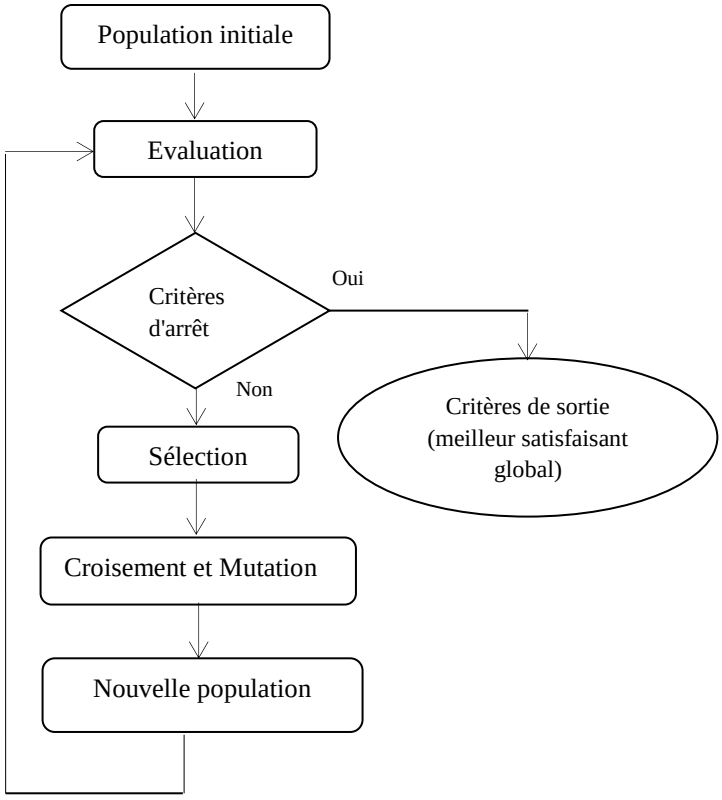


Figure 1.15. Diagramme d'optimisation par les algorithmes génétiques [MIC, 2010]

On trouve dans la littérature un certain nombre d'études traitant l'application des algorithmes génétiques pour l'optimisation des SCND. [SEY, 2014] a utilisé GA pour trouver une solution presque optimale à son modèle non linéaire en nombres entiers à trois objectifs. La première fonction objectif vise à minimiser les temps d'attente des produits, la seconde vise à maximiser la fiabilité minimale des machines sur les postes de travail, la troisième fonction objectif consiste à minimiser le temps d'inactivité moyen des machines. Il a développé et comparé deux procédures de solutions : NSGA-II (algorithme génétique de tri non dominé) et NRGA (algorithme génétique classé non dominé) pour résoudre le modèle, et a constaté que NSGA-II était le meilleur capable d'obtenir des fronts appropriés.

[BOZ, 2012] a proposé un algorithme génétique avec méthode de codage 'Edge-and-vertex' pour son multi source multi échelons multi-produits pour minimiser le coût logistique total et le comparer à la solution obtenue en utilisant GA standard avec une méthode de pénalité, et en utilisant une expérience numérique, il a constaté que la solution obtenue en utilisant le GA est plus acceptable.

[CHA, 2010] a proposé une approche basée sur les GA pour optimiser le réseau de la chaîne logistique en réduisant les coûts. Il a conçu un système à quatre échelons composé de fournisseurs, d'usines, de centres de distribution et de détaillants. Les paramètres de GA sont définis avec les valeurs suivantes : taille d'échantillon = 20, croisement = 0,2, mutation = 0.02 et nombre de générations = 50. Le logiciel utilisé : MATLAB 7.5. Les résultats expérimentaux ont montré l'efficacité de GA pour fournir une solution optimale en quelques minutes lors de l'exécution sur un PC standard.

[MAJ, 2013] a utilisé la technique GA pour optimiser un modèle de chaîne logistique pour plusieurs produits et plusieurs fournisseurs. La fonction objectif consiste à maximiser le profit total pour l'ensemble de la chaîne logistique, afin de déterminer les produits à commander, les quantités, les fournisseurs et les délais de commande. Les résultats sont ensuite comparés avec les résultats obtenus par LINGO. La méthode GA donne plus de solutions avec des informations de plus haut niveau.

[ALT, 2006] a suggéré une procédure de solution basée sur GA pour résoudre le problème de conception du réseau de la chaîne logistique. Les auteurs ont présenté un modèle de programmation mathématique général en tant que modèle non linéaire à nombres entiers multiples avec trois fonctions objectifs : minimiser le coût total, maximiser le niveau de service et maximiser la balance d'utilisation des capacités. L'algorithme proposé a été codé avec le langage de programmation C ++ compte tenu des paramètres suivants : taille de la population = 400 ; taux de croisement = 0,5, taux de mutation = 0,7, nombre de générations = 500 et nombre de générations = 10.

[REZ, 2007] a mis au point un algorithme génétique pour optimiser le coût total et le niveau de service d'une chaîne logistique.

[SYA, 2005] a considéré le coût total comme une fonction objective dans leur conception du réseau de la chaîne logistique, le problème a été résolu par un algorithme génétique hybride.

[SOU, 2009] a développé une approche de programmation stochastique à objectifs multiples. Il a envisagé une chaîne logistique à deux échelons. L'objectif est de minimiser les coûts du stock de sécurité et de localiser les centres de distribution sur le réseau. Ils ont proposé une méthode de résolution basée sur des algorithmes génétiques pour résoudre le modèle.

[CHA, 2004] a proposé une SCND pour minimiser les coûts et le délai de livraison total considérés comme des fonctions objectifs. Un algorithme génétique a été développé pour résoudre le problème multi-objectif.

D'autres études ont été développées sur l'optimisation de la SCND en utilisant GA. Elles sont résumées dans le tableau 1.11. Les notations suivantes sont utilisées pour représenter les paramètres de l'AG :

Pop_size : taille de la population ;
Pm : taux de mutation des chromosomes ;
Pc : taux de croisement pour les chromosomes ;
Max_gen : génération maximale.

Tableau 1.11. Utilisation du GA pour l'optimisation de la SCND

Références	Pc	Pm	Représentation	Pop_size	Max_gen
[SYA, 2002]	0.4	0.2	Vertex Encoding	25 to 300	750 à 10000
[SYA, 2005]	0.4	0.2	Vertex Encoding	10 to 75	1000 à 5000
[ALT, 2006]	0.5	0.7	Priority based-encoding	400	500
[FUL, 2009]	NS*	0.5	Edge based-encoding	50	200
[ABB, 2011]	1	0.25	Binary	160	20
[BOZ, 2012]	NS	NS	Edge-and-Vertex Encoding	NS	NS
[CAS, 2014]	0.01	0.95	binary	120	25
[SEY, 2014]	0.65	0.15	Matrix	40	NS
[MAJ, 2013]	NS	0.1	NS	100	NS
[PIS, 2010]	0.5	0.7	matrix	30	NS

*NS : Non spécifié

GA est connu pour son concept simple. L'efficacité de cet algorithme est testée pour différents problèmes de la vie réelle et se trouve très efficace. De nombreuses comparaisons ont été établies par les auteurs entre l'AG et d'autres méthodes montrent que nous pouvons faire confiance aux algorithmes génétiques en tant que méthodologie de résolution, en particulier pour les problèmes de grande taille, GA fonctionne très bien en termes de qualité des solutions obtenues et de temps de calcul.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé les principaux modèles du coût de la qualité existant dans la littérature, en mettant l'accent sur le modèle le plus célèbre de Juran à savoir : le modèle classique du P-A-F, qui sera la base du calcul du coût de la qualité dans notre travail, en raison de son acceptation universelle. Nous avons ensuite passé en revue les structures essentielles des chaînes logistiques, l'ensemble des critères, niveaux décisionnels et mesures de performances les caractérisant.

Nous nous sommes focalisés par la suite sur l'incorporation du coût de la qualité COQ comme mesure de performance clé dans la conception des réseaux SCND avec un résumé des dernières recherches concernant les modèles de SC prenant en compte les mesures de qualité. Il y a un manque étonnant de références analysant et développant le SCND incorporant la COQ malgré ses grandes contributions à aider les entreprises à améliorer simultanément leur rentabilité et leur qualité.

Nous avons également examiné dans ce chapitre les différentes techniques d'optimisation mises au point en vue de résoudre les problèmes d'optimisation des SCND ; il existe de nombreuses recherches sur l'utilisation d'algorithmes évolutifs tels que les algorithmes génétiques et le recuit simulé. Ce sont des algorithmes de recherche très puissants qui donnent de bons résultats dans divers domaines d'optimisation.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique générale afin de fixer les perspectives de nos travaux de recherche. L'analyse de cette étude a montré que, très peu de travaux portant sur l'optimisation des SCND pour les industries de fabrication prennent en considération le coût de la qualité. Tandis qu'il y a une absence de recherches, à ce jour, menées pour les industries alimentaires.

Dans ce contexte, le chapitre suivant entamera la première résolution du SCND qui vise à minimiser le coût de la qualité dans une industrie de fabrication, avec une contrainte de niveau de qualité requis. Dans cette partie de recherche, un algorithme génétique sera développé pour résoudre le modèle proposé.

Chapitre 2 : Modèle d'optimisation du coût de la qualité dans une chaîne logistique en série

Résumé

Nous étudions dans ce deuxième chapitre un modèle de calcul du coût de la qualité (COQ) dans une chaîne logistique en série à trois échelons : les fournisseurs, les usines de fabrication et les détaillants. Le modèle proposé traite l'impact de divers paramètres tels que le taux d'erreur d'inspection, le taux de défaillance chez les fournisseurs et le taux de retraitement sur la fonction COQ et sur le niveau de la qualité en général, ainsi que l'effet de ces variables internes sur les catégories COQ selon la classification du P-A-F. Par la suite, une méthode de résolution basée sur les algorithmes génétiques (GA) a été développée pour optimiser le modèle proposé afin de déterminer le COQ optimal réduisant les coûts pour l'ensemble de la chaîne logistique tout en maintenant un niveau de qualité global. Les résultats obtenus par l'approche proposée sont illustrés par des exemples numériques pour mettre en évidence l'utilisation de ces paramètres et fournir une aide à la décision pour sélectionner les fournisseurs et les détaillants fiables et maîtriser le coût de la qualité tout au long de la chaîne logistique.

Chapitre 2

Modèle d'optimisation du coût de la qualité dans une chaîne logistique en série

2.1 Introduction

Comme déjà signalé dans le chapitre précédent, la fourniture de produits ou de services de haute qualité devient un objectif de toutes les chaînes logistiques dans l'environnement commercial actuel, où la qualité s'est imposée comme un facteur concurrentiel crucial. En effet, mesurer le coût de la qualité (COQ) dans le contexte de la chaîne logistique (SC) est considéré comme une mesure de performance clé pour examiner la performance de la SC en termes financiers. L'approche COQ permet de réconcilier deux objectifs organisationnels contradictoires : maximiser la qualité et minimiser les coûts, puis avoir un objectif : la minimisation du coût de de la qualité.
En se basant sur la revue de littérature présentée précédemment, l'approche classique du P-A-F est le modèle le plus couramment appliqué dans la pratique, où les coûts de prévention sont les coûts associés à toute activité visant à éviter une mauvaise qualité des produits et des services. Les coûts d'évaluation sont les coûts engagés pour assurer la conformité des produits et des services aux spécifications prédéfinies. Les coûts de défaillance interne sont les coûts résultant de la non-conformité du produit et du service par rapport à la spécification prédéfinie avant la livraison ou l'expédition du produit ou du service au client. Les coûts de défaillance externes sont les coûts de la non-conformité par rapport à la spécification prédéfinie après que le produit ou le service soit livré au client final.

Le présent travail vise à développer un modèle mathématique afin de prévoir les coûts de la qualité dans la chaîne logistique de fabrication à trois échelons. Le modèle utilise le COQ comme mesure de performance de toutes les entités de la chaîne logistique et utilise les algorithmes génétiques comme procédure de résolution. L'optimisation du COQ dépend de divers paramètres internes, tel que le taux de défaillance, le taux d'erreur d'inspection et le taux de retraitement. Dans la première partie de ce chapitre, nous décrirons la méthodologie de recherche, la définition du problème et la procédure d'optimisation. La seconde partie vise à détailler la procédure de résolution basée sur les AGs et à étudier et comparer le comportement de la courbe de COQ en fonction de divers paramètres.

2.2 Définition du problème d'optimisation

2.2.1 Pertinence de cette étude

D'après la revue de littérature, il y a un nombre limité de chercheurs qui ont évalué la mesure de la performance d'un réseau de chaîne logistique SCND en utilisant le COQ comme concept clé. D'après notre revue de littérature, on peut noter les principales références suivantes :

[RAM, 2008] a proposé le premier modèle introduisant le coût de la qualité pour la conception des réseaux de la chaîne logistique. L'auteur a supposé une fonction quadratique qui donne de manière exogène le coût de la qualité selon le modèle de Juran. Mais aucun détail n'a été fourni pour expliquer comment cette fonction de COQ a été calculée. La formulation générale du COQ a été réduite à un problème très simplifié en supposant que les coûts de la qualité étaient modélisés juste pour les fournisseurs, et qu'il n'y a pas de contrainte sur le taux maximal des produits défectueux. En outre,

l'auteur a résolu une petite instance par le logiciel LINGO qui ne peut pas fournir de solution optimale pour les instances de grande taille.

[ASI, 2008] dans des travaux antérieurs, ont assumé une fonction de COQ indépendante pour chaque nœud ou entité de la chaîne logistique. Leur modèle inclut une fonction de COQ basée sur le taux de défaillance chez les fournisseurs et les usines de fabrication, sans considérer le taux de défaillance chez le détaillant.

[CAS, 2012] se sont focalisés sur les performances de la chaîne logistique uniquement pour les industries de fabrication. Le modèle proposé est uniquement approprié pour déterminer le taux de défaillance requis et le taux d'erreur lors de l'inspection pour atteindre le coût minimum ou le profit maximum avec une demande constante, pour la conception d'une nouvelle voie logistique comprenant des installations de fabrication qui ne sont pas encore opérationnelles.

[AYA, 2013] a développé un modèle mathématique afin de prévoir les coûts de qualité dans la chaîne logistique de fabrication à quatre échelons. Le modèle utilise le COQ en tant que mesure de performance de toutes les entités de la SC. Le retraitement des produits défectueux n'a pas été pris en compte sachant que, pour les industries de fabrication, les produits défectueux peuvent être soit retraités, soit vendus en tant que défectueux à un prix inférieur, ce qui minimise les rebus. La validation du modèle a été effectuée en utilisant une analyse de régression linéaire statistique.

Enfin, les modèles proposés dans la littérature présentent des lacunes dans le développement d'un modèle de conception de chaîne logistique complète et stratégique qui inclut la qualité en tant que mesure de performance, et évalue son impact sur le profit. Les modèles proposés ne sont que conceptuels et sont validés sur la base de données empiriques.

2.2.2 Description du problème

Le but du présent travail est l'élaboration d'un modèle mathématique afin de prévoir les coûts de la qualité dans la chaîne logistique de fabrication à trois échelons, et de fournir une estimation du COQ pour les SC similaires afin d'atteindre un certain niveau de qualité. Le modèle proposé utilisera le COQ en tant que mesure de la performance de toutes les entités de la chaîne logistique. Ce travail vise à déterminer le taux de défaillance requis en fabrication et le taux d'erreur lors de l'inspection afin d'atteindre les coûts de qualité totale minimaux et d'atteindre le niveau de qualité requis du client.

Nous considérons une chaîne logistique composée de trois niveaux, à savoir les fournisseurs, les fabricants et les détaillants. Le modèle proposé calculera les unités correctes et défectueuses à chaque étape de la SC, comme indiqué à la figure 2.3, afin de sélectionner un fournisseur parmi un ensemble de fournisseurs, ainsi que pour les usines et les détaillants. Ainsi, nous allons présenter un modèle pour calculer le coût engagé par les différents acteurs principaux de cette chaîne logistique. Ce modèle visera à estimer le coût de la qualité engendré par les différentes entités de la chaîne logistique d'un produit spécifique tout en calculant le coût de la prévention, de l'évaluation, de la défaillance interne et externe séparément comme mesure clé de performance. Le COQ total n'est autre que la somme de toutes ces catégories de coût.

Le modèle proposé est une chaîne logistique à trois échelons comme le montre la figure 2.1.

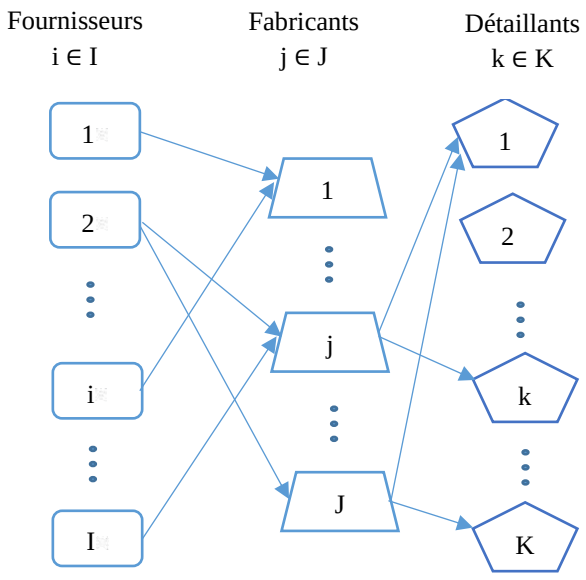


Figure 2.1. Illustration de la SCND étudiée

2.2.3 Hypothèses

Pour simplifier le modèle, nous assumons les hypothèses suivantes :

1. Nous supposons, pour cette chaîne logistique étudiée, que la demande de produits exprimée par le client final est constante tout au long de la SC ;
2. Le modèle proposé convient aux entreprises de fabrication. Un modèle pour les industries agro-alimentaires sera proposé et validé dans le chapitre suivant ;
3. Il y a un système d'inspection à 100% après le processus de fabrication. Ce système d'inspection appartient aux autorités de fabrication. Les autres contrôles tels que l'échantillonnage, les différents tests au cours du processus de fabrication du produit et de sa livraison aux détaillants ne sont pas considérés ;
4. Deux types d'erreurs peuvent survenir : Type d'erreur I qui représente la classification d'un bon composant en tant qu'élément défectueux. Type d'erreur II relatif à la classification d'un composant défectueux comme un bon composant. Le tableau 2.1 illustre cette classification.

Tableau 2.1. Types d'erreurs résultant du système d'inspection

Conformité / Déclaration	Conforme	Non-Conforme
Déclaré conforme	**Idéal**	**Type d'Erreur II**
Déclaré non conforme	**Type d'Erreur I**	**Idéal**

5. Nous supposons que la qualité est représentée par le paramètre : Ql = niveau de qualité global (proportion de bons produits parmi tous les produits livrés aux clients finaux). Nous supposons aussi que le modèle est approprié seulement pour déterminer la probabilité de défaillance à la fabrication et le taux d'erreurs à l'inspection pour atteindre les minimum coûts de qualité pour la conception de nouveaux itinéraires logistiques comprenant les usines qui n'ont pas encore fonctionné.

6. Les taux d'erreurs d'inspection sont concernés par les mauvais produits classifiés comme bons. Les bons produits classifiés comme défectueux ne sont pas considérés.
7. La classification des coûts qualité employée dans ce modèle est celle du modèle de P-A-F dû à son acceptation universelle.
8. Pour notre modèle proposé, on considère que les coûts de défaillance externes sont tolérables et non catastrophiques pour les clients. Pour les industries aéronautiques et pharmaceutiques, les défaillances externes ne sont pas acceptées, et les investissements dans l'évaluation et l'inspection sont plus importants.
9. Un fournisseur spécifique est sélectionné parmi plusieurs et a une probabilité de défaillance bien définie.
10. Un seul détaillant est sélectionné pour chaque usine manufacturière, et ce détaillant satisfait toutes les demandes du client.
11. Les produits défectueux pourraient être vendus à un prix inférieur.
12. Le coût du retour des produits défectueux au niveau des détaillants n'est pas pris en compte.

2.3 Développement d'un modèle de conception d'une chaîne logistique intégrant le Coût de la qualité

Le coût total de la qualité est estimé en calculant les coûts de prévention, d'évaluation, de défaillance interne et de défaillance externe dans la chaîne logistique, et en faisant la somme de toutes ces catégories de coûts. L'organigramme présenté dans la figure 2.3 montre les processus conceptuels du modèle proposé, ainsi que le flux des produits passant à travers la chaîne logistique depuis le fournisseur jusqu'aux détaillants.

Cet organigramme distingue les mauvais produits des bons, et montre le flux des produits passant à travers la chaîne logistique afin d'arriver au détaillant (utilisateur final dans notre cas). Cette étape est primordiale pour déterminer le COQ dans la chaîne logistique étudiée sur la base du calcul des quatre catégories du COQ selon la classification du P-A-F, constituant ainsi le fondement de notre modèle en série permettant la sélection des entités de la SC qui permet de satisfaire une demande donnée exprimée par le détaillant et classe les produits finaux selon leur qualité (bons, mauvais ou vendus comme défectueux).

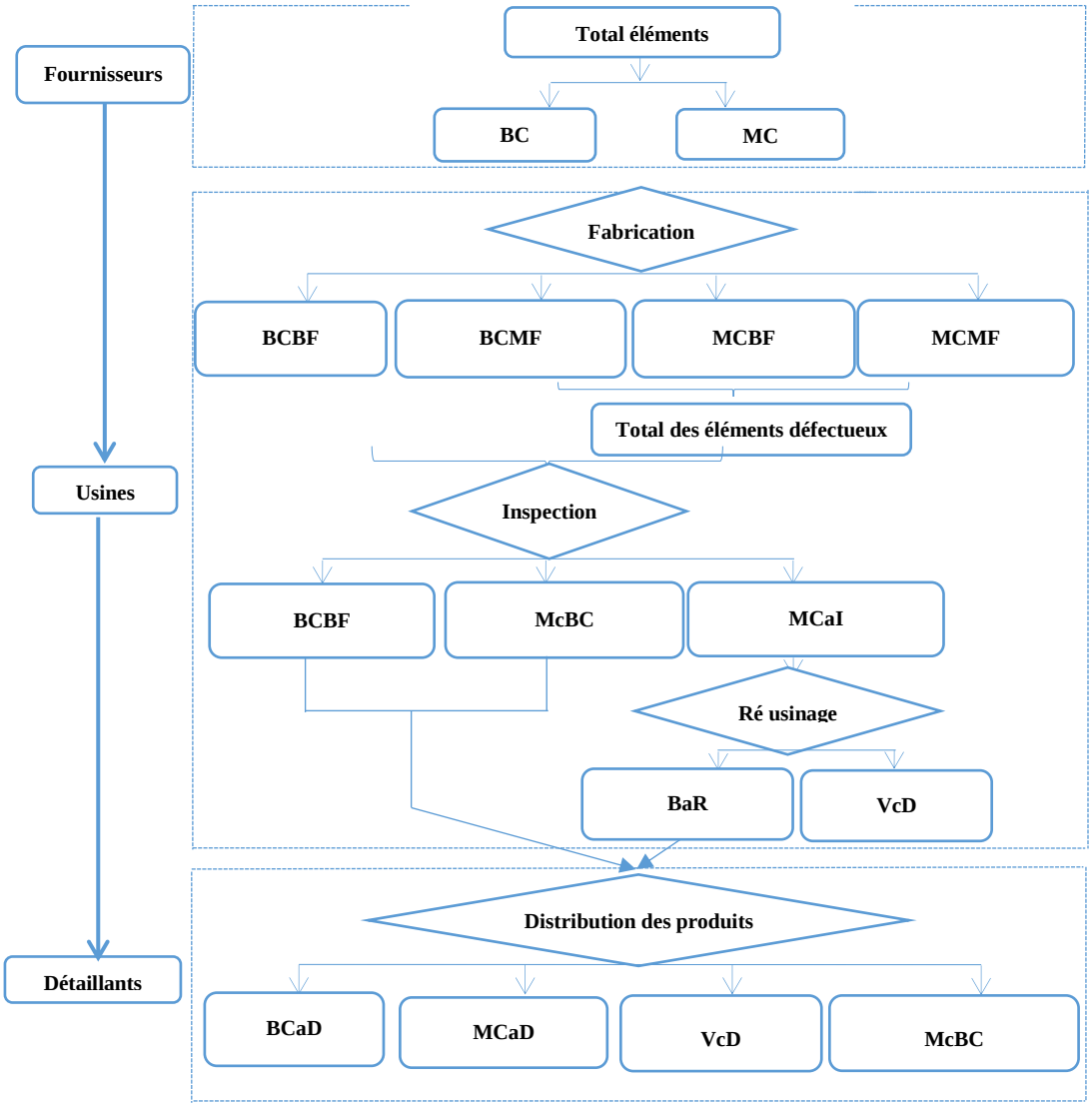


Figure 2.2. Organigramme du modèle étudié

Nous détaillons dans le tableau 2.2 les expressions selon le filtre présenté par l'organigramme.

Tableau 2.2. Détail des expressions selon le modèle étudié

Entité	Acronyme	Signification	Commentaires
Fournisseur	BC	Bon Composant	Les bons éléments venant des fournisseurs
	MC	Mauvais Composant	Les mauvais éléments venant des fournisseurs
Fabricant	BCBF	Bons Composants, Bonne Fabrication	Ce sont les produits obtenus suite à un processus de fabrication approprié et dont le fournisseur a fourni de bons éléments.
	BCMF	Bons Composants, Mauvaise Fabrication	Représente les bons composants avec un processus de fabrication inappropriée.
	MCBF	Mauvais Composants, Bonne Fabrication	Représente les mauvais composants avec un processus de fabrication réussi. Ces produits défectueux sont dus au fournisseur.
	MCMF	Mauvais Composants, Mauvaise Fabrication	Représente les mauvais composants avec un processus de fabrication inappropriée.

	MCaI	Mauvais Composants Après Inspection	Représente les mauvais composants identifiés après un système d'inspection réussi.
	BaR	Bons Composants Après Retraitement	La fonction qui retourne le nombre des bons produits suite à un retraitement réussi.
	VcD	Composants Vendus Comme Défectueux	La fonction qui retourne le nombre de produits défectueux qui vont être vendus à un prix réduit.
	McBC	Mauvais Composants Classifiés Par Erreur Comme Bons	Le nombre des mauvais produits classifiés comme fiables par erreur après le processus d'inspection.
Détaillant	BCaD	Bons Composants Après Détail	Le nombre de bons produits qui vont être délivrés au client final par le détaillant
	MCaD	Mauvais Composants Après Détail	Le nombre de mauvais produits qui vont être délivrés au client final par le détaillant

2.3.1 Variables du modèle

Dans cette partie nous présentons les différentes variables du modèle. D'abord, pour simplifier le problème, nous supposons ce qui suit : (1) ce modèle est approprié pour déterminer le taux de défaillance requis en fabrication et le taux d'erreur en inspection qui sont les variables de décision du modèle, afin d'atteindre les coûts de qualité totale minimums pour la conception de nouveaux itinéraires logistiques. (2) On sélectionne un fournisseur spécifique parmi plusieurs qui a un taux de défaillance défini ($\mathbf{Y_{si}}$). La stratégie de sélection des fournisseurs est généralement basée sur des critères de qualité, performance, coût et risque. Selon [AQE, 2012], l'évaluation de la qualité des fournisseurs est un problème de prise de décision multicritères qui implique plusieurs critères hétérogènes de poids différents. Sur la base d'une revue de la littérature et de l'observation pratique, l'auteur a conclu les différents critères qualitatifs et quantitatifs reflétant les attributs réels des fournisseurs. L'auteur a ensuite proposé un modèle pour évaluer la qualité des fournisseurs. Le modèle consiste à identifier d'abord les critères d'évaluation et attribuer ensuite une pondération à chaque critère par la technique du processus d'hiérarchie analytique (AHP). Ensuite, à l'aide de la méthode VIKOR (VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje) qui est une technique de prise de décision à critères multiples, la qualité des fournisseurs a été évaluée permettant ainsi la sélection du meilleur fournisseur. Dans notre cas, un produit ne correspondant pas aux limites de spécification de qualité ($\mathbf{Y_{si}}$), sera éliminé. Ceci est de même pour le détaillant qui est supposé capable de satisfaire toutes les demandes des clients. (3) Le fournisseur et le détaillant sélectionnés sont des entités externes à l'usine de fabrication.

Le modèle étudié calcule le nombre de bonnes et de mauvaises unités à chaque étape, comme indiqué dans la figure 2.3. La notation générale est présentée comme suit :

Ensembles :

I : Ensemble des fournisseurs indexés par i ∈ I ;
J : Ensemble des fabricants indexés par j ∈ J ;
K : Ensemble des détaillants indexés par k ∈ K.

Les paramètres du modèle :

Les paramètres du modèle sont les variables qui varient à des intervalles différents et peuvent affecter le résultat final, mais ils ne sont pas ceux que le modèle cible, c'est-à-dire que leur impact sur la fonction objectif n'est pas évalué. Les paramètres du modèle sont :

W : Quantité de produits passant par le processus de fabrication et livrés aux clients ;
Y_{si} : Taux de défaillance chez le fournisseur i ;

Y_{rk} : Taux de défaillance chez le détaillant k ;
Dem : Demande du client ;
A_f : Coûts fixes des activités de prévention ;
A_v : Coûts variables des activités de prévention ;
B_f : Coûts fixes d'inspection ;
B_v : Coûts variables d'inspection ;
C_f : Coûts fixes de défaillance interne ;
C_s : Perte due à une défaillance des composants achetés ;
C_m : Coût de fabrication direct par élément retraité ;
C_r : Coût de retraitement par article ;
φ : Taux de retraitement ;
$\overline{C_{EF}}$: Coût par article défectueux réparé ou remplacé ;
K : Coefficient de perte de la fonction Taguchi ;
P_1 : Prix par article vendu ;
P_2 : Prix par article «vendu défectueux».

Les variables de décision :

Les variables de décision sont les variables qui peuvent varier pendant l'intervalle de temps et peuvent avoir un impact critique sur la fonction objectif. Ces variables changent si les caractéristiques du processus changent. La question qui se pose est : quelles variables de décision peut-on choisir, et qui ont un impact sur le coût de la qualité ? Ces variables doivent reposer sur des choix internes et trouver ainsi les paramètres appropriés de ces variables, pour atteindre le niveau de qualité global souhaité au moindre coût de qualité. Ainsi, ces objectifs stratégiques aideront les décideurs à disposer de deux cibles au niveau opérationnel qui consistent à mettre en place des activités de prévention et d'évaluation, et à planifier les efforts du service assurance qualité et production.

Les variables de décision de notre modèle sont alors : le taux de défaillance du fabricant et le taux d'erreur d'inspection au niveau des fabricants. Le modèle proposé est fonction des variables suivantes :

$\boldsymbol{yp_j}$: Taux de défaillance chez l'usine de fabrication j ∈ J, (variable continue entre 0 et 1) ;
$\boldsymbol{yI_j}$: Taux d'erreur d'inspection chez l'usine de fabrication j ∈ J, (variable continue entre 0 et 1).

2.3.2 Expressions mathématiques

Dans cette partie, nous déterminons les fonctions qui expriment le nombre des produits fiables et défectueux à chaque étape de la chaîne logistique comme montré dans la figure 2.2. Ensuite, on procédera au calcul des catégories des coûts de la qualité suivant la classification P-A-F. Il est intéressant de noter que la collaboration des efforts entre les services financiers et les services de la qualité est nécessaire afin de déterminer les coûts estimés de qualité pour les inclure dans notre modèle comme des coûts fixes ou variables.

Entité 1 : Pour le fournisseur

Quantité des bons composants (BC) :

$$BC = (\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\ \mathbf{W} \quad (2.1)$$

Quantité des mauvais composants (MC) :

$$MC = \mathbf{Y_{si}}\ \mathbf{W} \quad (2.2)$$

Entité 2 : Pour le fabricant

Quantité des bons composants avec une bonne fabrication (BCBF) :

$$\text{BCBF} = (\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\ \mathbf{W}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yp_j}\right) \tag{2.3}$$

Quantité des bons composants avec une mauvaise fabrication (BCMF) :

$$\text{BCMF} = (\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\ \mathbf{W}\ \mathbf{yp_j} \tag{2.4}$$

Quantité des mauvais composants avec une bonne fabrication (MCBF) :

$$\text{MCBF} = \mathbf{Y_{si}}\ \mathbf{W}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yp_j}\right) \tag{2.5}$$

Quantité des mauvais composants avec une mauvaise fabrication (MCMF)

$$\text{MCMF} = \mathbf{Y_{si}}\ \mathbf{W}\ \mathbf{yp_j} \tag{2.6}$$

Quantité des mauvais composants après inspection (MCaI) :

$$\text{MCaI} = (\mathbf{1} - \mathbf{yI_j})\mathbf{W}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right] \tag{2.7}$$

Quantité des mauvais composants classifiés par erreur comme bons (McBC) :

$$\text{McBC} = \mathbf{yI_j}\ \mathbf{W}\ \left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right] \tag{2.8}$$

Quantité des bons composants après retraitement (BaR) :

$$\text{BaR} = \boldsymbol{\varphi}\ \left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\mathbf{W}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right] \tag{2.9}$$

Quantité des composants vendus comme défectueux (VcD)

$$\text{VcD} = (\mathbf{1} - \boldsymbol{\varphi})\left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\mathbf{W}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right] \tag{2.10}$$

Entité 3 : Pour le détaillant

Quantité des bons composants après détail (BCaD) :

$$\text{BCaD} = (\mathbf{1} - \mathbf{Y_{rk}})\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{W}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yp_j}\right) + \boldsymbol{\varphi}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\mathbf{W}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right]\right] \tag{2.11}$$

Quantité des mauvais composants après détail (MCaD) :

$$\text{MCaD} = \mathbf{Y_{rk}}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{W}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yp_j}\right) + \boldsymbol{\varphi}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\mathbf{W}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j} + \mathbf{Y_{si}}\right]\right] \tag{2.12}$$

2.3.3 Calcul des coûts de la qualité pour le modèle proposé

La fonction COQ est exprimée par le biais d'un modèle quantitatif, en interne de la chaîne logistique, en tenant compte des interdépendances entre toutes les entités. Dans ce modèle, les coûts de la qualité pour l'ensemble constituent la partie centrale du modèle. C'est la mesure sur laquelle repose tout

jugement sur les performances de la chaîne logistique du point de vue qualité et coût. Ce modèle détermine aussi le niveau global de la qualité accompli par la SC, permettant ainsi de prévoir le résultat sur l'investissement de qualité.

Le modèle P-A-F de Feigenbaum a été pris en compte pour classer les composantes du coût de la qualité dans notre modèle. Ces composantes seront calculées en tenant compte de la dépendance entre les entités de la chaîne logistique, à savoir, les fournisseurs, les usines de fabrication et les détaillants.

2.3.3.1 Coût de prévention C_p

Les coûts de prévention sont liés à toutes les activités dédiées à prévenir la mauvaise qualité. Ils incluent les coûts de fonctionnement du système qualité, la formation du personnel, l'investissement dans les procédés industriels, etc. Dans notre modèle, le coût de prévention est la fonction qui retourne le nombre de bons produits après le processus de fabrication, c'est-à-dire BCBF, suivant l'équation 2.13.

$$\mathbf{C_p} = \mathbf{A_f} + \mathbf{A_v}\left[(\mathbf{1} - \mathbf{Y_{si}})\mathbf{W}\left(\mathbf{1} - \mathbf{yp_j}\right)\right] \tag{2.13}$$

Ou $\mathbf{A_f}$ est un coût fixe,
et $\mathbf{A_v}$ est un coût variable de prévention.

L'implication de $\mathbf{Y_{si}}$ dans le calcul de $\mathbf{C_p}$ montre que la sélection du fournisseur fait partie des activités de prévention. Dans ce modèle, $\mathbf{Y_{si}}$ est une constante puisque la compagnie a déjà opté pour un fournisseur spécifique qui répond à ses exigences qualité.
Le lien entre le coût de la prévention et les bons produits après le processus de fabrication est expliqué par le fait que l'augmentation des bons composants avec un processus de fabrication réussi, implique une amélioration du niveau de qualité globale. De plus, les composants (BCBF) n'entraîneront aucun coût de retraitement.

2.3.3.2 Coût d'évaluation C_A

Plusieurs auteurs relèvent la relation entre les coûts d'évaluation et les taux d'erreurs d'inspection [AYA, 2013]. Dans notre modèle, une inspection à 100% est établie à la fin du processus de fabrication pour vérifier la conformité des produits. Les coûts d'évaluation sont donnés par l'équation 2.14.

$$\mathbf{C_A} = \mathbf{B_f} + \mathbf{B_v}\left[\left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\mathbf{W}\right] \tag{2.14}$$

Ou $\mathbf{B_f}$ est un coût fixe d'évaluation qui inclue les coûts de détection, métrologie, appareils et vérification, activités de contrôle des organismes extérieurs, etc. $\mathbf{B_v}$ est un coût variable, lorsque les coûts d'évaluation augmentent les erreurs d'inspection sont supposées faibles. W est le nombre de composantes inspectées (tous les éléments passant à travers le système sont inspectés).

2.3.3.3 Coût de défaillance interne C_{IF}

Les coûts de défaillance interne comprennent les frais des rebus, les déchets matière, les frais d'élimination, réparations, retouches, désorganisation de la production, surstockage de la marchandise, changement du procédé de fabrication, etc.

Ces coûts font partie des coûts engagés dans la chaîne logistique à la suite de la fabrication de produits défectueux. Toutefois, les produits défectueux sont identifiés aux postes d'inspection et d'essai de la chaîne logistique et ne seront pas livrés aux utilisateurs finaux. Dans notre modèle, ces coûts sont calculés sur la base des produits défaillants ayant été découverts avant la livraison par le détaillant au

client final. C'est la somme des coûts de défaillance internes à chaque niveau de la chaîne logistique. Ils sont donc calculés en fonction de la quantité probable de produits défectueux à chaque niveau de la chaîne et de leurs coûts de retraitement relatifs.

Après l'inspection, les produits sont soit conformes (BCBF), mauvais identifiés défaillants (MCMF), ou mauvais qui n'ont pas été identifiés en tant que défaillant à cause de l'erreur d'inspection (McBC). Les mauvais produits passent par le processus de retraitement, mais la source de la non-conformité pourra être les fournisseurs, l'usine de production ou les deux.

Les coûts de défaillance interne sont donnés par l'équation 2.15.

$$\begin{aligned} \mathbf{C_{IF}} = \mathbf{C_f} &+ \left[(\mathbf{C_m} + \mathbf{C_r})\ \boldsymbol{\varphi}\ \left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\ \mathbf{BCMF}\right] \\ &+ \left[(\mathbf{C_s} + \mathbf{C_m} + \mathbf{C_r})\ \boldsymbol{\varphi}\ \left(\mathbf{1} - \mathbf{yI_j}\right)\ (\mathbf{MCBF} + \mathbf{MCMF})\right] \\ &+ \left[(\mathbf{P_1} - \mathbf{P_2})\ \mathbf{VcD}\right] \end{aligned} \tag{2.15}$$

Comme indiqué dans l'équation (2.15), le coût des défaillances internes comporte quatre termes linéaires :

- le premier terme ($\mathbf{C_f}$) est un coût fixe pour les activités correctives. Ces activités peuvent être incluses dans la main-d'œuvre pour la correction de la non-conformité, l'ingénierie corrective, les temps d'arrêt, etc.
- Le deuxième terme représente les coûts de défaillances internes opérationnelles calculées par la somme du coût direct de production par élément ($\mathbf{C_m}$), et le coût de retraitement par élément ($\mathbf{C_r}$) fois le nombre de produits identifiés bons avec un processus de fabrication inapproprié ($\mathbf{BCMF}$).
- Le troisième terme est le coût de défaillance dû à l'approvisionnement calculé par la somme de : la Perte encourue par les éléments achetés des fournisseurs ne répondant pas aux exigences qualité ($\mathbf{C_s}$) coût direct de production par élément ($\mathbf{C_m}$), et coût de retraitement par élément ($\mathbf{C_r}$), fois le nombre de produits identifiés en tant que défectueux à cause du fournisseur ou du processus de fabrication.
- Le quatrième terme représente la perte due à la différence entre P1 (le profit pour les bons produits qui aurait été le revenu provenant de la vente de produits standard fabriqués en usine), et P2 (le prix de vente des produits défectueux et qui est le revenu réel provenant de la vente d'unités défectueuses générées à l'usine fois les éléments vendus comme défectueux VcD). Généralement, ces éléments ne peuvent pas être retraités ou réusinés. Les managers ont donc deux alternatives : les classer en tant que rebus ou bien tenter de les vendre tels quels à des marchés destinés pour ces articles.

2.3.3.4 Coût de défaillance externe $\mathbf{C_{EF}}$

Les coûts de défaillance externes ont été définis par 'British Standard Institution' (1991) comme l'ensemble des pertes encourues quand le niveau de qualité souhaité n'est pas atteint. Selon la revue de littérature élaborée par [SCH, 2006], plusieurs auteurs ont inclus les coûts d'opportunité dans la catégorie des défaillances externes dans leur classification du COQ. Les modèles développés par [MOD, 1987], [CAR, 1992] ; [HEA, 1991] et [SAN, 1998] ont présenté une approche basée sur la classification P-A-F et qui intègre les coûts d'opportunité ou les coûts intangibles ou encore les coûts cachés.

Ainsi, dans notre modèle, les coûts d'opportunité seront pris en compte dans le calcul des coûts de défaillance externe. L'expression des coûts de défaillance externe ($\mathbf{C_{EF}}$) est donnée par deux termes comme il est indiqué dans l'équation 2.16.

$$\mathbf{C_{EF}} = \overline{\mathbf{C_{EF}}} \times (\mathbf{MCaD} + \mathbf{McBC}) + \mathbf{K}\,(\mathbf{Y_{ref}})^{\mathbf{2}} \tag{2.16}$$

Le premier terme modélise le coût relatif aux retours des produits défectueux par les clients et qui engendrent des coûts de réparation ou de remplacement. Le second terme représente les coûts intangibles calculés par la fonction de perte de Taguchi. Taguchi définit la qualité en tant que la perte minimale due aux reprises, au gaspillage de ressources lors de la fabrication, aux coûts de la garantie, aux plaintes et insatisfactions des clients, au temps et l'argent dépensés par les clients pour des produits défaillants et à la perte éventuelle de parts du marché [HWA, 2010].

La fonction de perte de Taguchi est appliquée dans des processus de fabrication où l'objectif est de modéliser les pertes en termes d'écart entre la valeur réelle d'une caractéristique de qualité et une valeur cible. Dans la vue classique, les pertes de qualité surviennent en dehors des limites de spécifications. Par conséquent, les produits ou services dont les caractéristiques sont conformes aux spécifications ne devraient pas engendrer des coûts de défaillance externes. Mais dans la réalité, ces produits peuvent entraîner des coûts d'opportunité à cause de la perte de ventes ou au mécontentement des clients après la livraison. Taguchi a formulé ces pertes de qualité externes en une fonction de perte basée sur sa propre expérience industrielle [EDW, 1991]. Cette fonction est parabolique et la perte augmente continuellement à mesure que la caractéristique s'éloigne du point nominal ; il n'y a pas de discontinuité aux limites de spécification ([HWA, 2010]).

Il est aussi à noter que quand une caractéristique de qualité s'écarte de la valeur cible, ceci engendre une perte. Selon [EDW, 1991], la qualité est simplement l'absence de variabilité par rapport à la valeur cible. Autrement, la réduction de la variabilité entraine une amélioration de la qualité et une baisse des coûts.

Le coefficient de perte constant, k, dépend du coût aux limites de la spécification et de la largeur de la spécification. La figure 2.4 illustre la fonction de perte de Taguchi et son lien avec les limites de spécification.

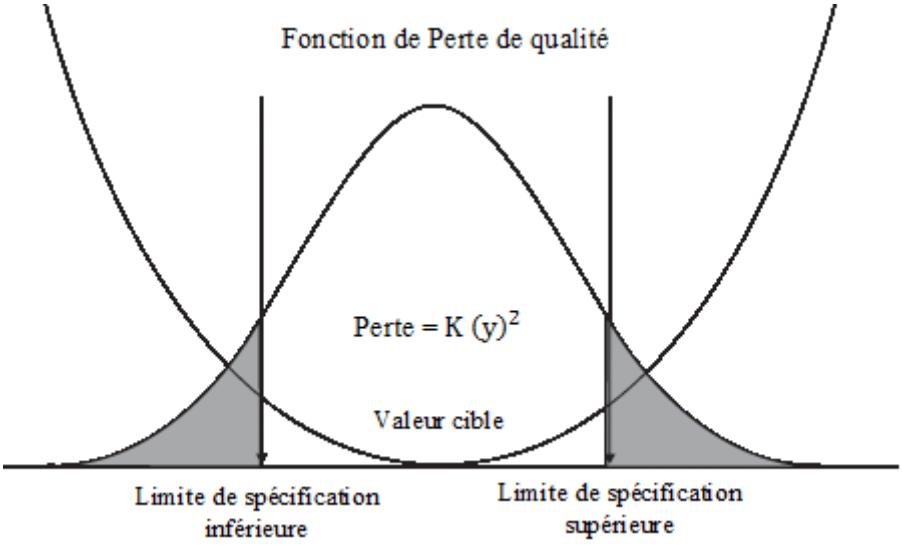


Figure 2.3. La fonction de perte quadratique de Taguchi

La courbe de la fonction de perte de Taguchi est :

$$\mathbf{L(y)} = \mathbf{K}\,(\mathbf{y})^{\mathbf{2}} \tag{2.17}$$

Où L est la perte (en unité monétaire), k est un coefficient constant de perte, y est une caractéristique de qualité qui n'est autre que la probabilité de défaillance globale pour la chaîne logistique relative à une demande constante donnée, comme indiqué dans l'équation (2.18) suivante :

$$\mathbf{y} = \left[\frac{\mathbf{MCaD + McBC + VcD}}{\mathbf{Dem}}\right] \times \mathbf{100}\% \tag{2.18}$$

Pour fixer les limites de spécification supérieure et inférieure, il faut noter que le détaillant a aussi un taux de défaillance ($\mathbf{Y_{rk}}$), qui signifie qu'il peut transformer de bons produits en produits défectueux.

On souligne que y = 100 est le cas le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque le processus contient 100% de produits défectueux. Donc la limite de spécification supérieure : Ub est 100.

Pour obtenir la limite inférieure (valeur cible) de la fonction Taguchi, nous supposons un processus de fabrication et d'inspection parfait. Donc la limite de spécification inférieure est :

$$\text{Lb} = [\mathbf{Y_{rk} + Y_{si}(1-\varphi)(1-Y_{rk})}\,] \times \mathbf{100}\% \tag{2.19}$$

Considérons que y_{rel} est la valeur relative de la caractéristique de qualité, telle que : y_{rel}= y- Lb, ça veut dire que la valeur relative de la caractéristique de qualité (y_{rel}) est obtenue en soustrayant la valeur cible ou la limite inférieure du taux de défaillance global actuel.

Finalement, le coût total de la qualité est calculé à travers la somme de toutes les catégories des coûts suivant la classification P-A-F suivant l'équation 2.20.

$$\mathbf{COQ} = \mathbf{C_P + C_A + C_{IF} + C_{EF}} \tag{2.20}$$

2.3.4 Dérivation de la fonction qualité

Selon [AYA, 2013], il n'y a pas de définition conventionnelle du niveau de qualité dans le calcul des coûts de la qualité. Mais, la plupart des auteurs ont considéré que le nombre de produits défectueux reflète le niveau de qualité de la chaîne logistique. Par exemple, [RAM, 2008] et [CAS, 2012] ont supposé qu'un niveau à 100% de qualité se réfère à l'état ou le système ne contient aucun produit défectueux.

Dans cette étude, nous supposons que le paramètre niveau global de qualité qui est la proportion des bons produits parmi tous les produits livrés aux clients finaux, est suffisant pour représenter la qualité.

Le niveau global de la qualité (QL) de la chaîne logistique est la proportion des bons produits par rapport à la demande du client :

$$\mathbf{Q_L} = \frac{\mathbf{BCaD}}{\mathbf{Dem}} \tag{2.21}$$

Il est à noter que la demande totale des clients est la somme de VcD, McBC, BCaD et MCaD. D'où :

$$\mathbf{Q_L} = \frac{\mathbf{BCaD}}{\mathbf{VcD + McBC + BCaD + MCaD}} \tag{2.22}$$

2.3.5 Formulation mathématique du modèle d'optimisation du coût de la qualité SC-COQ

Le modèle proposé nommé modèle **SC-COQ**, est composé d'une fonction objectif qui permet de minimiser le coût de la qualité de la chaîne logistique étudiée, exprimé par l'équation (2.20), sujette à

une contrainte de niveau de qualité donné qui est défini par l'équation (2.22). La formulation mathématique de notre modèle d'optimisation est donc :

Minimiser COQ (yp_j,yI_j)

Sous la contrainte : $\mathbf{Q_L = \frac{BCaD}{VcD+McBC+ BCaD+ MCaD}}$

Le modèle proposé permet de fixer les paramètres de décision yp_j et yI_j qui minimisent le coût total de la qualité, sous une contrainte de qualité Q_L. Cette contrainte exige que la qualité du produit final livré chez chaque détaillant doive répondre au niveau de qualité minimum requis. Il est à noter que cette contrainte est non linéaire.

2.4 Résolution approchée du modèle SC-COQ: implémentation des algorithmes génétiques

Comme il a été expliqué dans notre étude bibliographique, les algorithmes génétiques (GA) sont des algorithmes qui ont reçu une grande attention par les chercheurs, et qui ont été appliqués avec succès aux problèmes d'optimisation combinatoire. Dans notre modèle, les combinaisons des entités commerciales pour une chaîne logistique est une représentation appropriée pour un chromosome.

Nous allons donc implémenter un algorithme GA en raison de sa capacité à gérer différents types de variables (binaires, réels, vecteur), et aussi pour sa capacité à résoudre n'importe quel problème, c'est-à-dire que l'algorithme est indépendant du problème

La technique d'optimisation AG est une méthode de recherche adaptative basée sur le processus évolutif de la sélection naturelle et de la génétique. Elle a été développée par [HOL, 1975] et ses collaborateurs dans les années 1970. Cette méthode repose sur le processus de sélection naturelle en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par Darwin en 1859. Ce concept est expliqué par le fait que, quand une population est soumise à différentes contraintes, seuls les individus qui arrivent à s'adapter à ces contraintes générées par le milieu naturel peuvent survivre et donc générer une descendance pour assurer la pérennité de l'espèce. Par contre, les individus inadaptés sont automatiquement écartés. La sélection permet d'avoir des individus de plus en plus adaptés au cours des générations. D'une façon similaire, dans les problèmes d'optimisation, les algorithmes génétiques reposent sur le principe de sélection des individus ou des solutions candidates les plus adaptées, et qui sont représentées par un chromosome.

2.4.1 Mécanisme de reproduction

Les algorithmes génétiques cherchent les meilleurs individus à partir d'une population initiale. Une population de ces individus ou de solutions candidates dans ce cas est composée de deux variables yp_j et yI_j , qui sont les variables de décision de notre problème d'optimisation. Les algorithmes génétiques opèrent sur les variables codés, et une séquence de codes représente un individu.

Les variables de décision sont prises en compte à l'aide de caractères représentant une séquence de codes présentés dans un bloc de bits de chaîne, et un score de condition physique est attribué à chaque solution qui donne des informations sur le mérite relatif de chaque individu gs (yp_j ,yI_j), avec g(s) est la fonction objectif évaluée à partir d'une solution donnée. Une solution potentielle ou chromosome est ensuite donnée par une fonction dite la fonction d'adaptation (fitness), qui permet de reproduire de nouvelles solutions par l'évaluation des chances qu'un individu soit sélectionné ou non. Les contraintes sont ensuite prises en compte dans la fonction d'adaptation (fitness), et les individus qui ne respectent pas les contraintes du problème sont pénalisés [ONW, 2001].

Une solution candidate est appelée chaîne, et l'ensemble des chaînes à la fois est appelé un espace de solutions S(t). Ce dernier est manipulé de manière à trouver la solution la mieux adaptée à un domaine de problème donné. Le potentiel d'une chaîne individuelle est déterminé par une fonction de score (objectif) qui fournit des informations spécifiques à un domaine sur le mérite relatif de chaque chaîne. Il mappe les chaînes en nombres réels utilisés pour déterminer les chaînes qui seront utilisées pour produire un état intermédiaire pour la chaîne suivante. Pour chaque espace de solution, la meilleure solution est trouvée en appliquant des opérateurs de GA tels que : la sélection, le croisement et la mutation à ces individus pour explorer un nouvel espace de solution. De cette façon, les solutions tendent à s'améliorer au fil des générations, ce qui aboutit à une solution optimale ou quasi optimale. L'avantage de cette méthode est que, dans certains cas, elle peut générer un jeu de solutions optimales.

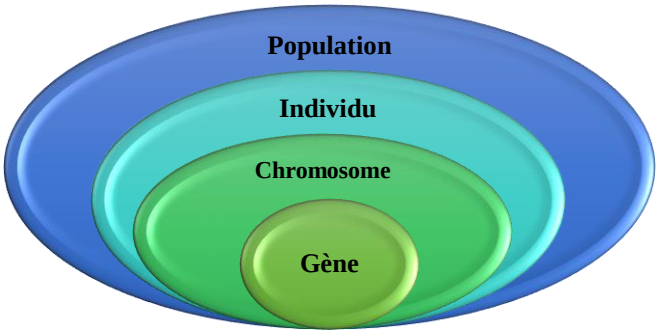


Figure 2.4. Paradigme des termes de l'AG

Les termes présentés dans la figure 2.5, sont définis comme suit :

- **Population :** c'est l'ensemble des solutions candidates.
- **Individu :** représente une solution.
- **Chromosome** : Une solution potentielle.
- **Gène** : un chromosome est composé de gènes. Dans le codage binaire, un gène vaut 0 ou 1.

Le pseudocode d'un algorithme génétique est donné dans l'algorithme 2.1.

Algorithme 2.1. Un algorithme génétique
Initialisation de la population Evaluation par fonctions objectifs Calcul de la fitness For i=1 to MaxIter Sélection proportionnelle à l'efficacité Croisement Mutation Evaluation par fonctions objectifs Calcul de la fitness End For

2.4.2 Représentation des individus

Le bloc de bits de chaîne codant les informations sur les paramètres de la chaîne logistique est structuré comme suit :

Les paramètres : $A_f, A_v, B_f, B_v, C_f, C_s, C_m, C_r, \overline{C_{EF}}$ sont des données d'entrée du programme. Quant aux variables yp_j et yI_j, ce sont des nombres réels qui sont codés en bloc de bits de chaîne. Cette phase cruciale de codage servira à appliquer des opérations de croisement et de mutation aux individus. Chacune de ces variables est convertie en une chaîne binaire et allouée à un bloc de 22 bits et la chaîne binaire est finalement reconvertie en base décimale après application des opérateurs génétiques. L'équation 2.23 nous permet de trouver le nombre correspondant de x. (x peut être yp_j ou yI_j) :

$$\boldsymbol{x'}=(\boldsymbol{x}+\mathbf{2})\,\frac{(\mathbf{2^{22}-1})}{\mathbf{4}} \qquad (2.23)$$

x' est ensuite converti en une forme binaire. Par exemple, pour un taux de défaillance de 0,729, une solution est obtenue en insérant cette valeur dans l'équation 2.23 ci-dessus sous la forme x et en résolvant pour x'. Le x' est ensuite transformé en une chaîne binaire comme suit :

$$0.729 = -2 + X' * \frac{4}{(2^{22}-1)}$$

$$X' = (0.729+2)*(2^{22}-1)/4 = 2861560.5 = (2861561)_{10}$$

La forme binaire de 2861561 est : $(10101110100100111111001)_2$

Sur le plan opérationnel, les paramètres de la fonction COQ sont convertis en nombres binaires pour être exploités par les opérateurs génétiques de croisement et de mutation. Ils sont par la suite stockés dans un espace de solution temporaire et reconverties en nombre réel à nouveau, à l'aide de la technique décrite ci-haut.

2.4.3 Initialisation

La première étape de l'algorithme génétique est la génération des individus qui constituent la population initiale. Cette étape vise à générer un espace de solutions réalisables de la taille souhaitée (popsize). Ainsi, les chaînes générés aléatoirement de taux de défaillance yp_j et le taux d'erreur d'inspection chez le fabricant yI_j forment l'espace de la solution (popsize). Chaque chaîne de solution est associée à une valeur de la fonction de coût obtenue en fonction de la configuration codée des paramètres yp_j et yI_j .

2.4.4 Evaluation

Cette opération permet de copier des individus S(t) en vue d'une éventuelle inclusion dans la prochaine génération S(t+1). Une fonction de score (fitness) est calculée. Elle représente le score de chaque chaîne de l'espace de solution. Pour notre problème d'optimisation, l'objectif consiste à affecter un score à chaque solution individuelle (yp_j et yI_j) afin de minimiser la fonction de coût de la qualité.

2.4.5 Opérateurs de sélection

Sur la base de la fonction d'adaptation (fitness), la sélection permet de choisir les individus aptes à se reproduire, au détriment de ceux qui se montrent inadaptés. La probabilité de sélectionner un individu donné est égale au rapport entre la valeur de sa fonction d'adaptation et la somme de toutes les fonctions d'adaptation de la population. [GOL, 1988] ont regroupé les méthodes de sélection dans quatre catégories : Proportionné, Classement, Tournoi, Roulette. D'autres méthodes ont été regroupées dans ces catégories [GOL, 1988].

Pour notre modèle, nous avons utilisé la stratégie de l'échantillonnage stochastique sans remplacement qui est une méthode améliorée de sélection de la roue (roulette). Une étude comparative détaillée des techniques de sélection sera traitée dans le chapitre 4.

2.4.6 Opérateurs AG

2.4.6.1 Croisement

Cette opération consiste à tirer aléatoirement deux chromosomes (appelés parents) et à en produire des enfants. C'est un mécanisme de diversification qui encourage l'AG à examiner les régions non visitées. Lorsque deux individus sont sélectionnés, le programme génère deux points de coupure aléatoires de la chaîne de blocs et extrait le segment de ces deux individus. Pour réaliser cette opération, des segments sont échangés et finalement deux nouveaux individus sont produits. L'opération se fait avec une probabilité de croisement (Pc). Exemple qui montre que l'opérateur de croisement génère deux nouvelles chaînes comme suit (où (^) représente les positions de coupure) :

String 1: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ^ 0 0 1 ^ 1 1 0
String 2: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ^ 1 0 1 ^ 1 0 0

Après l'opération de croisement, les nouvelles chaînes créées sont :

Nouvelle String 1: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0
Nouvelle String 2: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0

La figure suivante présente l'opération de croisement pour des individus :

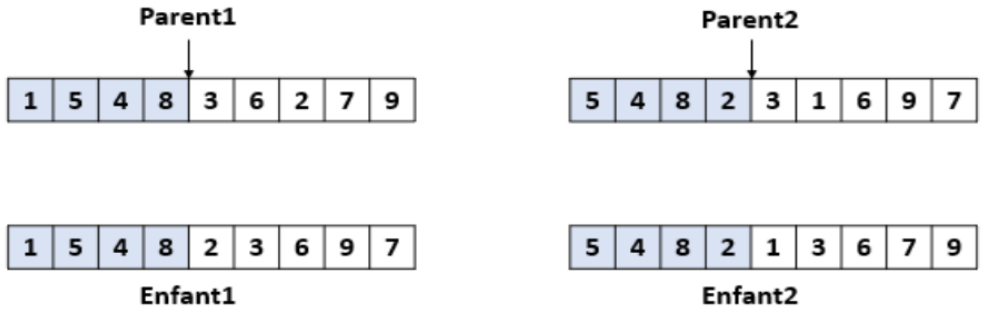


Figure 2.5. Croisement en un point

2.4.6.2 Mutation

Cette opération permet à l'algorithme d'éviter les minima locaux en empêchant la population de devenir trop semblable les unes aux autres. La mutation est réalisée avec une probabilité Pm. Si un individu est sélectionné, un point aléatoire est généré et le bit concerné est transformé. C'est une modification aléatoire d'une chaîne de bits sélectionnée aléatoirement. Le concept de la mutation est expliqué par [ONW, 2001] comme suit : deux valeurs aléatoires r_1 et r_2 sont sélectionnés de String 1 et 2 respectivement, tels que $1 \leq r_1$, et $r_2 \geq n$ avec n : la taille du bloc et $r_1 \neq r_2$. La procédure de l'algorithme AG inverse les bits désignés par les positions r_1 et r_2 de 0 à 1, ou de 1 à 0. Par exemple, si r_1=17 et r_2=18, les strings 1 et 2 précédents deviennent :

Nouvelle String 1 :

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0

Nouvelle String 2 : Position de mutation

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0

L'opération de mutation est essentiellement un mécanisme d'intensification. Pendant l'intensification, la recherche se concentre sur l'examen des voisins des solutions possibles. Dans cet exemple, les nouvelles chaînes 1 et 2 sont des voisinages respectifs de la chaîne 1 et 2. Les taux de croisement adoptés sont de 0,7 pour chaque opération. Les taux de mutation adoptés sont de 0,2 pour chaque opération.

2.4.7 Critères d'arrêt

Selon [ONW, 2001] et [GHI, 2018], Les critères d'arrêt d'un algorithme génétique sont généralement :

- Quand **Max_{ite}** (ou maximum d'itérations) est atteint.
- Quand le temps d'exécution est maximal (**Time limit)**.
- Quand la valeur de la fonction fitness pour le meilleur individu dans la population actuel est inférieure ou égale à **Fitness limit**.
- Quand aucune amélioration n'est remarquée sur la fonction objectif dans un intervalle de temps égal à **Small time limit.**

Pour notre algorithme utilisé, on fixe un critère d'arrêt après 200 itérations, car comme la plupart des méthodes d'optimisation, il est difficile de montrer la convergence de la solution optimale.

2.4.8 Pseudo code du modèle SC-COQ

Nous présentons dans ce qui suit l'algorithme 2.2 qui contient les étapes principales de l'algorithme génétique pour notre modèle d'optimisation SC-COQ sous la contrainte de la qualité.

Comme déjà décrit en détail dans les étapes d'un algorithme génétique, on commence par initialiser une population d'individu nommée Pop_Size (taille de la population). On note Pc : le taux de croisement, Pm : le taux de mutation, max_ite : le nombre maximal d'itération. L'algorithme génétique s'arrête quand le nombre maximum d'itération est atteint.

Le pseudo code de l'algorithme génétique pour notre modèle SC-COQ est donné par l'algorithme 2.2.

Algorithme 2 2. Algorithme génétique pour le modèle SC-COQ

Etape 1. Initialisation de Pop_Size, Pc, Pm, max_ite ;
Etape 2. Entrer les Paramètres utilisés pour générer des instances GA ;
Etape 3. Calculer la fonction fitness 'COQ ' pour chaque séquence de la population courante ;
Etape 4. Sélectionner la meilleure fitness des variables Ypj, YIj de la population courante par la méthode de sélection stochastique de reste sans remplacement ;
Etape 5. **Tant que** max_ite n'est pas atteint, démarrer la reproduction ;
Etape 6. Pour j < popsize
Sélectionner aléatoirement une séquence de P(N) ;
Si val1_aléatoire < P_{cross} :

Appliquer le croisement standard et produire deux enfants ;
Si val2_aléatoire < $\mathbf{P_{mutat}}$:
Appliquer la mutation ;
Nouvelle population Temppop_Ypj et Temppop_YIj ;
Evaluation des fonctions objectifs de tous les chromosomes de la nouvelle population ;
Incrémenter j jusqu'à max_ite ;
Fin tant que

2.5 Résultats numériques et discussion

2.5.1 Optimisation du coût de la qualité

Le modèle étudié dans ce travail SC-COQ est composé d'une fonction objectif qui est le coût total de la qualité d'une chaîne logistique (équation 2.20) sujette à une contrainte de niveau de qualité. En effet, on cherche à minimiser le coût de la qualité pour un niveau de qualité donné. Le niveau de qualité est défini par une équation non linéaire QL=*l*, (équation 2.24) :

$$\mathbf{Q_L} = \mathbf{Y_{rk}}\left[(\mathbf{1}-\mathbf{Y_{si}})(\mathbf{1}-\mathbf{yp_j})+\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{1}-\mathbf{yI_j})\left[(\mathbf{1}-\mathbf{Y_{si}})\mathbf{yp_j}+\mathbf{Y_{si}}\right]\right] = \boldsymbol{l} \qquad (2.24)$$

Nous allons étudier l'effet du taux de défaillance du fournisseur Y_{si}, du taux de défaillance chez le détaillant Y_{rk}, ainsi que du taux de retraitement φ sur le coût de la qualité (COQ). Comme initié dans les travaux [ITT, 1996] et [CAS, 2014], cette étude va nous permettre de déterminer lequel de ces paramètres qui a un impact considérable sur la fonction COQ. Pour ce faire, nous proposons un outil d'optimisation basé sur GA développé sur Python 3.0 et inspiré des travaux développés par [JAB, 2013].

Les paramètres de l'algorithme génétique proposé pour cette étude sont regroupés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Paramètres fixes d'entrée pour l'AG

Paramètre	Valeur
Taille de la population ($P_{popsize}$)	20
Nombre d'itérations	200
Taux de Croisement (P_{pcross})	0,7
Taux de Mutation ($P_{pmutate}$)	0,2

Dans cette application, on va traiter l'impact de la probabilité de défaillance du fournisseur $\mathbf{Y_{si}}$ sur la courbe COQ. Nous supposons que le décideur a l'option de choisir un seul fournisseur parmi plusieurs. La probabilité de défaillance $\mathbf{Y_{si}}$ du fournisseur varie entre 0,05 et 0,5.
Les variables de décisions du modèle yp_j et yIj sont optimisés dans le but de minimiser le coût total de la qualité qui doit satisfaire un niveau de qualité donné (*l*), dans cette étude, nous fixons «*l*» à différentes valeurs de 0,1 à 0,95. Les paramètres de la chaîne logistiques sont pris des travaux de [Ittner, 1996] et [Castello, 2014]. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau 2.4.

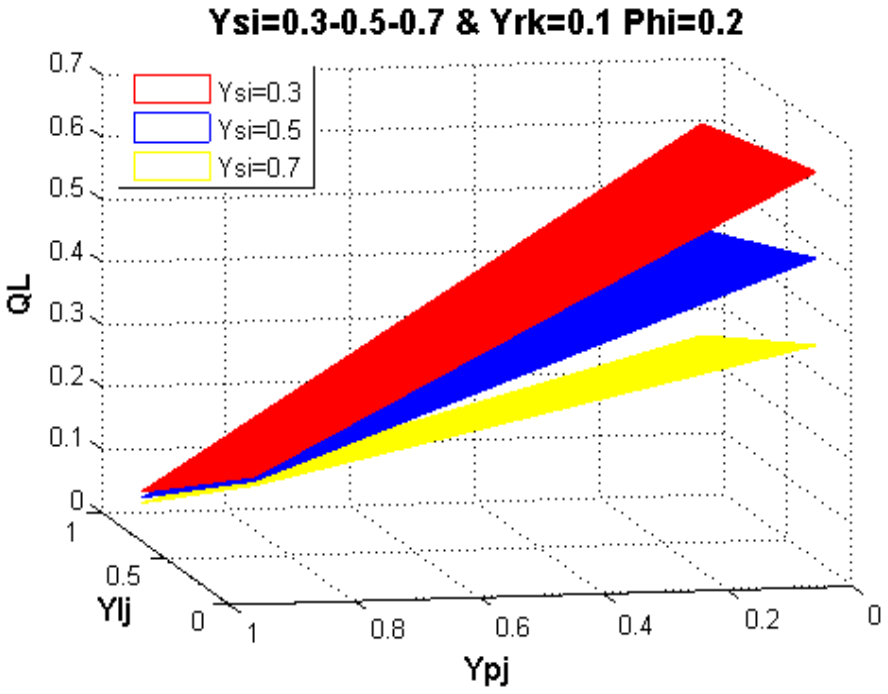
Tableau 2.4. Paramètres utilisés pour générer des instances GA

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
W	2000	B_v	5 $
C_m	5 $	A_v	5 $
C_r	70 $	φ	0,7
C_s	22,5 $	Y_{si}	0,05
P_1	228,8 $	Y_{rk}	0,05
P_2	1/4*P1	A_f	5000 $
K	1/10	B_f	15000 $
$\overline{C_{EF}}$	57,2 $	C_f	10000 $

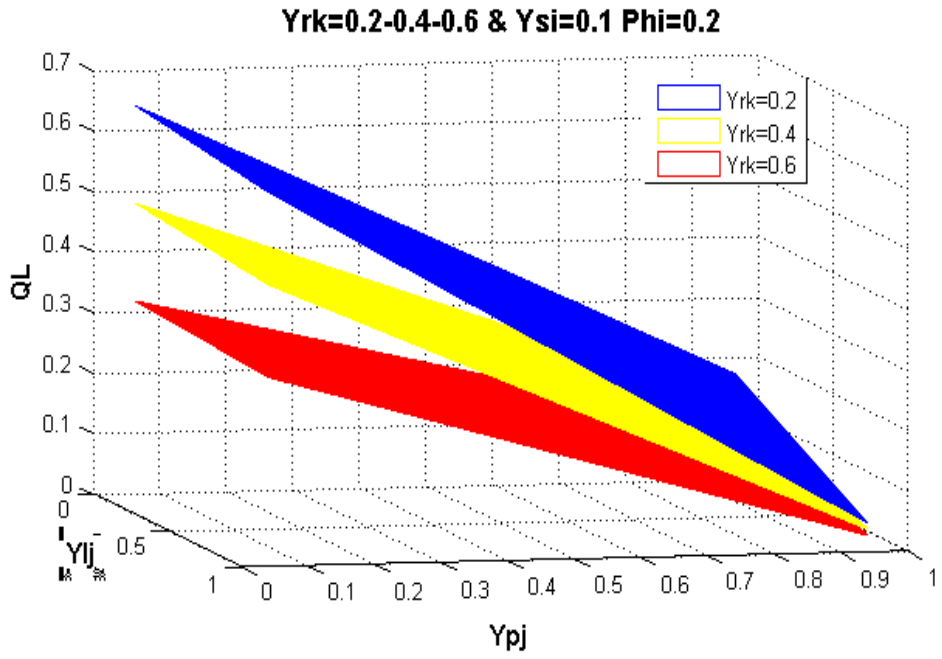
2.5.1.1 Etude de l'impact des variables de décision sur la contrainte QL

Ce paragraphe a pour but d'étudier le comportement du COQ en fonction de yI_j et yp_j. L'optimisation du modèle SC-COQ se fait en termes de plage du niveau de qualité, délimité par la limite inférieure et la limite supérieure de QL. Les paramètres Y_{si}, Y_{rk} et φ sont modifiés pour spécifier les limites Q_L conformément à yI_j et yp_j. La limite supérieure est atteinte lorsque yI_j et yp_j sont égaux à zéro dans l'équation 2.19, autrement dit, lorsqu'il n'y a aucun défaut lors de la fabrication et aucune erreur lors de l'inspection. La limite inférieure est atteinte lorsque yI_j et yp_j sont égaux dans l'équation 2.19.

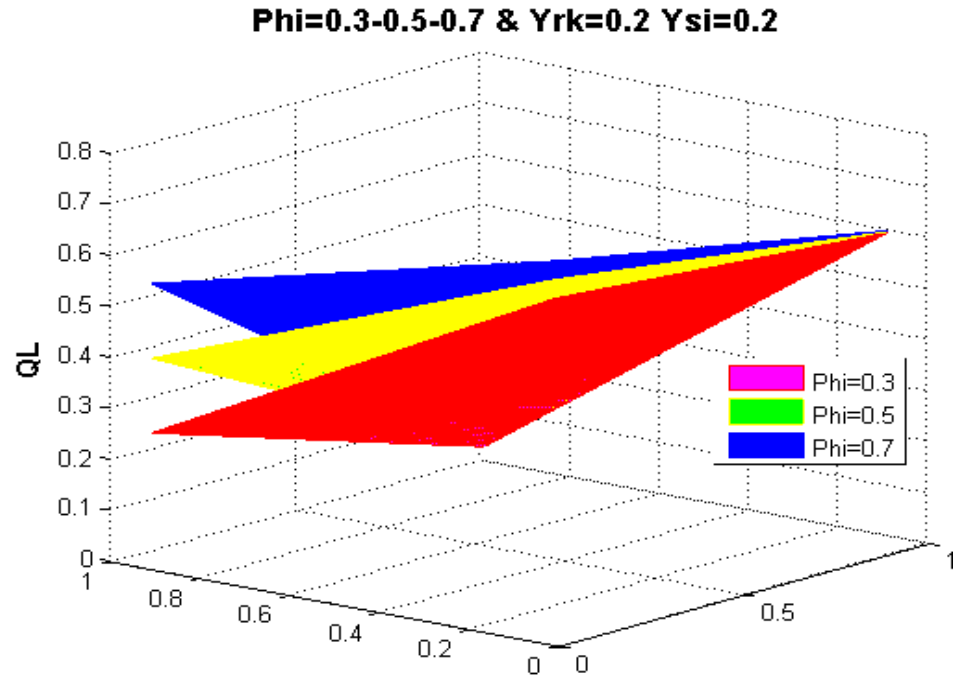
Nous montrons sur la figure 2.7 (a) les tracés du niveau de la qualité pour les trois cas de Y_{si}. On peut observer que lorsque la valeur de Y_{si} augmente, le niveau de la qualité diminue. Lorsque le taux de défaillance du fournisseur est petit, il est nécessaire d'améliorer le processus de fabrication en améliorant les activités de prévention.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.6. Tracés de niveau Q_L en fonction des paramètres Y_{si} Y_{rk} et φ

La figure 2.7 (b) montre que lorsque le taux de défaillance chez le détaillant augmente, le niveau de qualité global atteint par la voie logistique diminue. Pour $\mathbf{Y_{rk}}$ = 0,2, la limite inférieure de Q_L est égale

à 0.6 et Q_L est inférieur à ($1-Y_{rk}$). Cela s'explique par la relation entre $\mathbf{Y_{rk}}$ et les bons produits livrés aux clients.

La figure 2.7 (c) montre également que l'augmentation du taux de retraitement n'entraînera pas d'avantages importants pour la voie logistique.

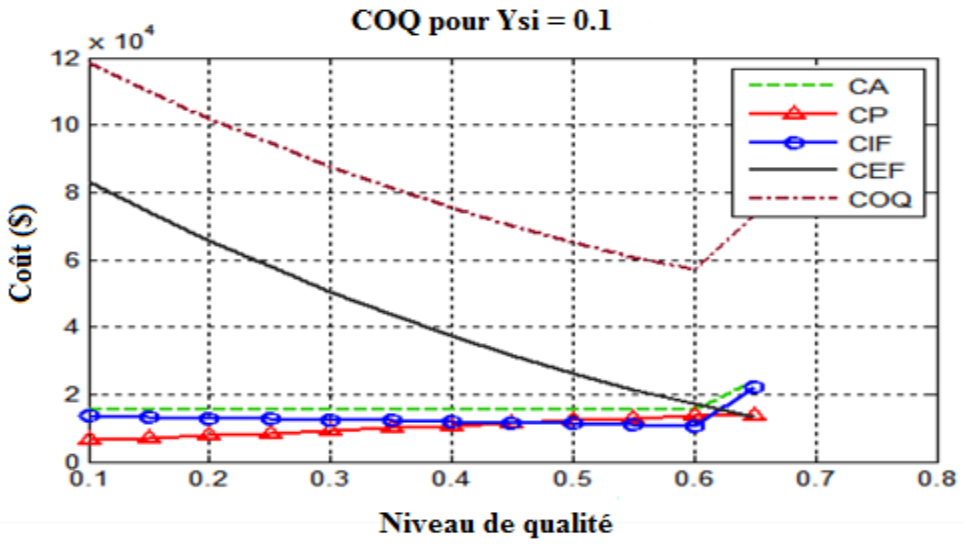
2.5.1.2 Etude de l'impact du taux de défaillance du fournisseur Y_{si} sur le COQ

Dans un premier temps, nous étudions l'impact du taux de défaillance des fournisseurs sur le COQ. Pour simplifier le modèle SC-COQ, on suppose qu'un fournisseur soit sélectionné parmi plusieurs et on fait varier le taux de défaillance du fournisseur entre 0,1 (figure 2.8 (a)) et 0,5 (figure 2.8 (b)). Cela contribuera à atteindre un niveau de qualité global élevé à un coût minimal en évitant le recours à l'inspection et au retraitement.

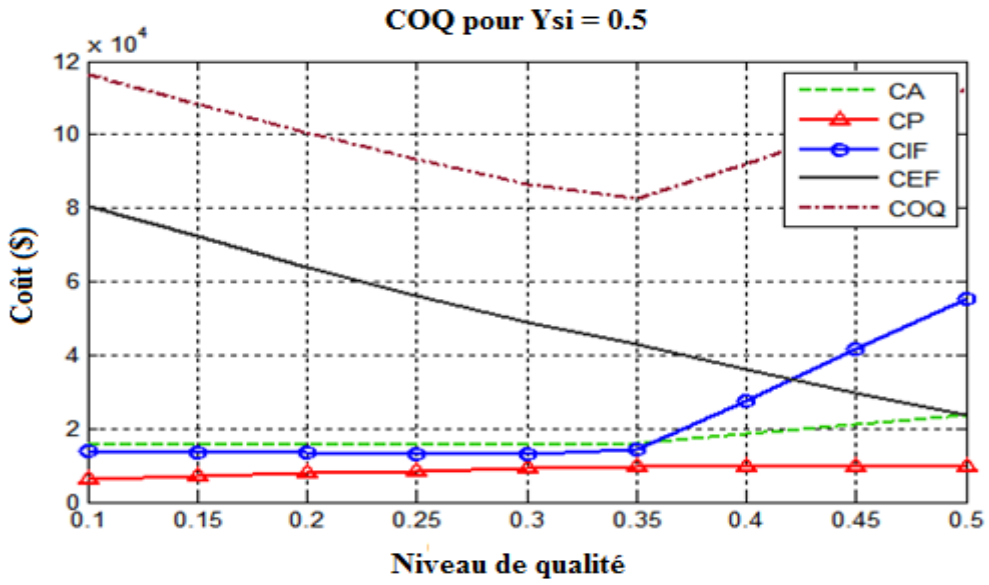
Afin de respecter un niveau de qualité donné (*l*) et de minimiser le coût total de la qualité, nous optimisons les paramètres yI_j et yp_j, qui sont les variables de décision internes de notre modèle SC-COQ. La figure 2.8 présente les courbes associées à chaque catégorie de coût : la courbe COQ représente le coût total, CA les coûts d'évaluation, CP les coûts de prévention, CIF les coûts de défaillance interne et CEF est la courbe de coûts de défaillance externe.

La figure 2.8 montre que plus le taux de défaillance du fournisseur est élevé, plus le niveau de qualité optimal qui minimise le COQ est faible. En d'autres termes, si nous voulons respecter le QL fixé, nous devons investir davantage dans les activités d'évaluation et de défaillance interne. Cela est dû à la quantité de composants défectueux reçus du fournisseur. Le point de COQ minimal est obtenu pour QL = 0,6 et 0,35 lorsque $\mathbf{Y_{si}}$ = 0,1 et 0,5 respectivement. Le CoQ devient important quand $\mathbf{Y_{si}}$ augmente car les coûts de défaillance interne augmentent considérablement dans ce cas.

Lorsque le taux de défaillance du fournisseur est faible, le modèle met l'accent sur l'amélioration du processus de fabrication par le biais d'activités de prévention et ne fait pas appel à l'inspection. De plus, pour un taux de défaillance élevé, c.-à-d. $\mathbf{Y_{si}}$=0,5, on remarque que les coûts de défaillance interne ont considérablement augmenté pour des niveaux de qualité supérieurs à 0,35. Ce qui fait que, la prise en compte du taux de défaillance des fournisseurs est très importante dans la stratégie du choix des fournisseurs.



(a) Courbe de COQ pour Y_{si}= 0.1



(b) Courbe de COQ pour Y_{si} = 0.5

Figure 2.7. Evolution du COQ pour différents taux de défaillance des fournisseurs

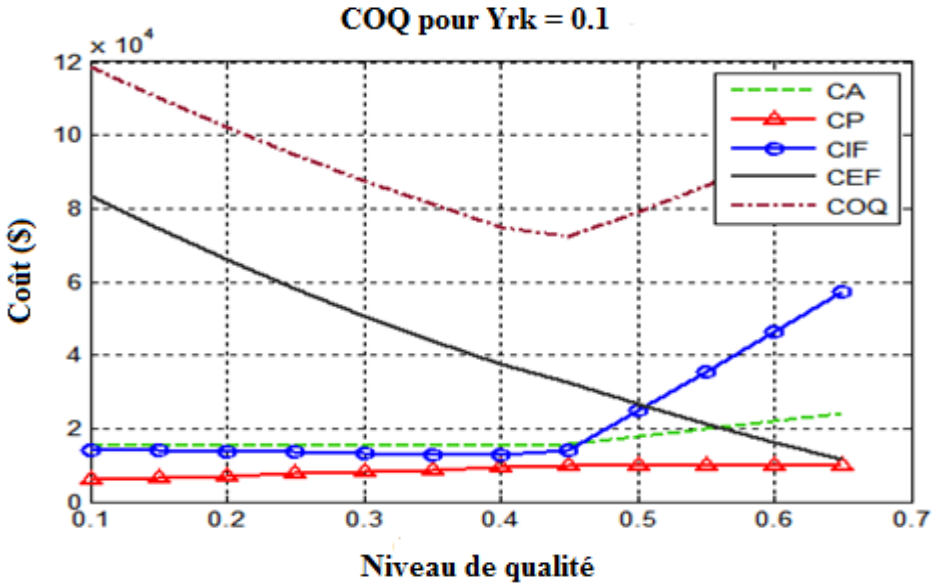
Les résultats obtenus sur la figure 2.8 (a) et (b) montrent que, lors de la sélection des fournisseurs, il est important de prendre en compte le taux de défaillance afin d'éviter les processus d'inspection et de retraitement et de satisfaire les exigences de qualité au moindre coût. Nous concluons que le taux de défaillance du fournisseur a un impact économique sur la chaîne logistique, en évitant les décisions basées uniquement sur le prix et en réduisant les coûts de la qualité totale qui permettent d'atteindre un niveau de qualité élevé dans la chaîne logistique.

2.5.1.3 Etude de l'impact du taux de défaillance du détaillant Y_{rk} sur le COQ

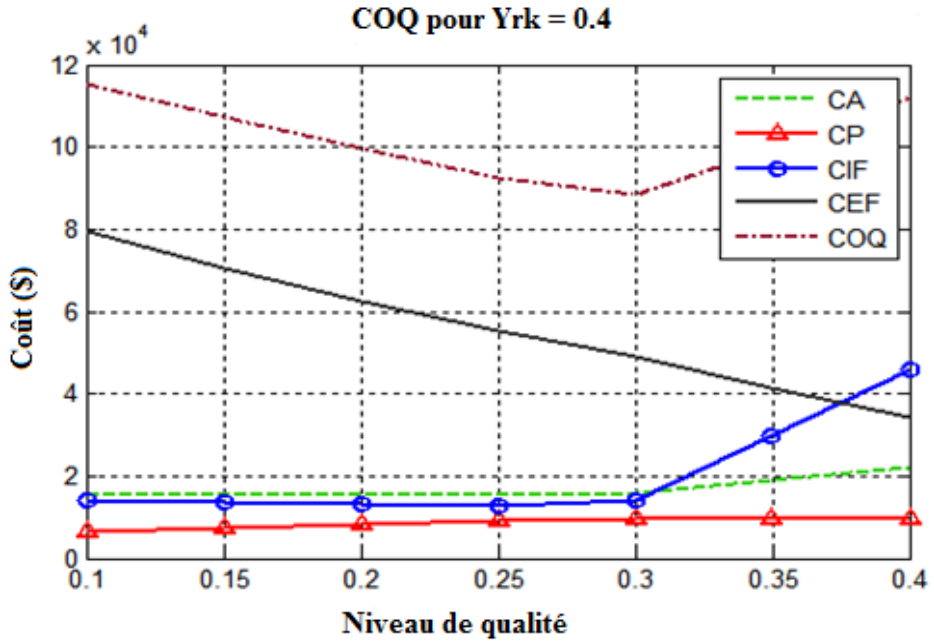
Le deuxième paramètre étudié dans ce travail est le taux de défaillance chez le détaillant Y_{rk} et son impact sur le niveau total du COQ atteint. La figure (2.9) présente les résultats obtenus en faisant varier Y_{rk} pour deux valeurs : 0,1 et 0,4.

Les résultats obtenus montrent que Y_{rk} a un effet négatif sur la courbe de CoQ. En effet, lorsque le taux de défaillance du détaillant Y_{rk} augmente, le niveau de qualité global maximum atteint par la voie logistique diminue. Pour Y_{rk}=0.1, le point optimal de COQ se situe au niveau de qualité 0.45, tandis que pour Y_{rk}=0.4, le point optimal de COQ se situe au niveau de qualité : 0.3. Cela est dû au nombre de bons produits livrés aux clients finaux et à sa dépendance directe au taux de défaillance chez le détaillant. Par exemple, lorsque Y_{rk} augmente de 0,1 à 0,4, le CoQ augmente également de 7×10^4 ($) pour atteindre 9×10^4 ($) pour Y_{rk} = 0,4. Il ressort donc de la figure 2.9 que lorsque Y_{rk} augmente, le COQ augmente. De plus, le niveau de qualité maximal atteint décroît, car les bons produits livrés aux clients finaux dépendent directement du pourcentage de produits défectueux chez le détaillant.

En conclusion, afin de minimiser le coût total de la qualité, les gestionnaires doivent prendre en compte lors de la sélection d'un détaillant, son taux de défaillance pour atteindre un niveau de qualité élevé dans la chaîne logistique.



(a) Courbe de COQ pour Y_{rk} = 0.1



(b) Courbe de COQ pour Y_{rk} = 0.4

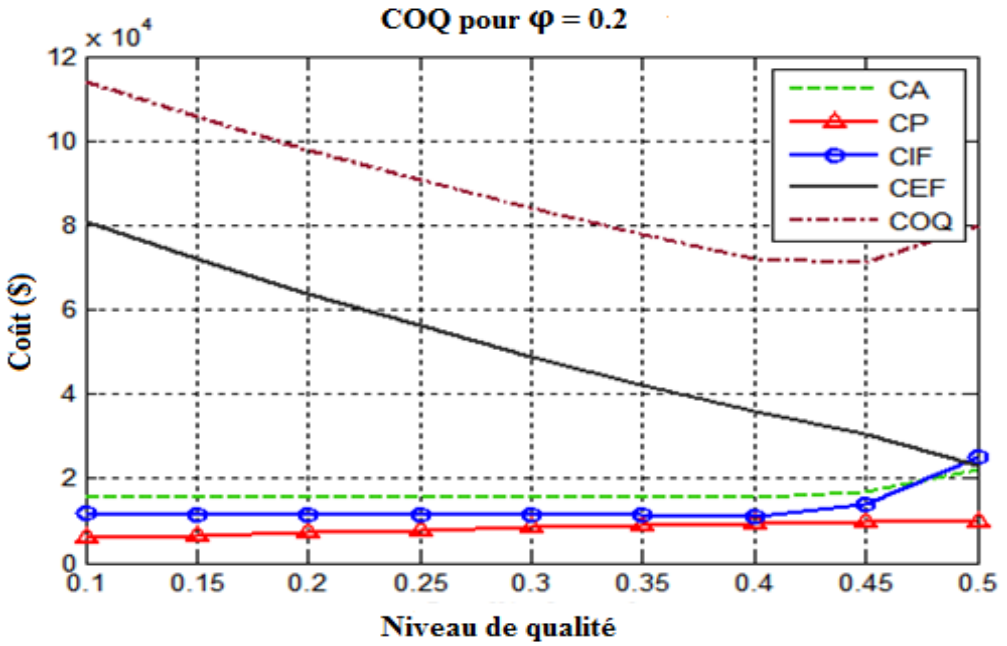
Figure 2.8. Evolution du COQ pour différents taux de défaillance des détaillants

2.5.1.4 Etude de l'impact du taux de retraitement φ sur le COQ

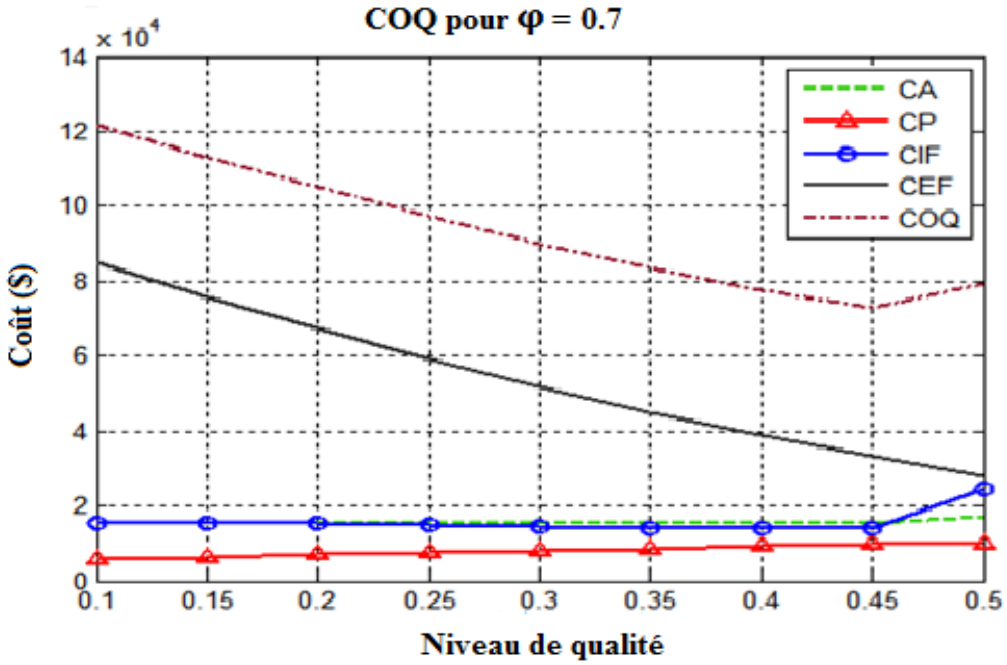
Le troisième paramètre étudié dans ce travail est le taux de retraitement φ. Dans cet exemple, φ varie de 0,2 à 0,7. La figure 2.10 donne le COQ pour ces deux cas. Le COQ est très similaire pour les deux cas du taux de retraitement comme le montre la figure 2.10. Les produits résultant du processus de retraitement sont les bons produits après retraitement réussi (BaR) donnés par l'équation 2.9 et les produits vendus comme défectueux (VcD) donnés par l'équation 2.10. Cela signifie que même si les

gestionnaires investissent davantage dans les activités d'évaluation, cela n'influencera pas beaucoup le coût de la qualité, en particulier pour les valeurs à faible taux de retraitement, car peu de produits seront retravaillés et la plupart des produits seront vendus à un prix bas P2, ce qui représente un coût de défaillance interne. Seuls les investissements dans les activités de prévention garantiront que les bons produits parviennent au détaillant.

En conclusion, le taux de reprise de fabrication a une faible influence sur le coût de la qualité.



(a) Courbe de COQ pour φ = 0.2



(b) Courbe de COQ pour φ =0.7

Figure 2.9. Evolution du COQ pour différents taux de retraitement

2.6 Synthèse sur le modèle SC-COQ

Dans cette section, nous présentons une synthèse sur le coût de la qualité, ainsi que l'effet des variables de décision et des paramètres internes sur le COQ et ses catégories (CA, CP, CIF et CEF).

Ces paramètres sont modifiés jusqu'à l'obtention de la valeur maximale de QL. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Résultats pour les différents paramètres Y_{si}, Y_{rk} et φ

	QL	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
Y_{si}=0,1	yI_j	94,9	94,7	95	94,8	94,7	94,8	94,8	94,7	94,9	94,9	95	**83**
	yp_j	85,8	77,7	69,5	61,5	53,3	45,1	37	28,9	20,5	12,7	5,2	**5**
Y_{si}=0,5	yI_j	94,9	95	94,8	94,9	94,9	**91,9**	**65,5**	**35,1**	**11,5**	—	—	—
	yp_j	74,4	60,3	45,3	30,7	16,3	**5**	**5,2**	**5,2**	**5**	—	—	—
Y_{rk}= 0,1	yI_j	95	94,9	94,9	94,8	95	94,9	95	**91,9**	**71**	**49,9**	**28,8**	**7,8**
	yp_j	81,2	70	58,6	47,2	35,7	24,4	12,9	**5,1**	**5,1**	**5**	**5,2**	**5**
Y_{rk} = 0,4	yI_j	94,8	94,9	94,9	95	92,2	**61,7**	**29,9**	__	__	__	__	__
	yp_j	69,6	52,3	35,3	18,8	5,3	**5,1**	**5,2**	__	__	__	__	__
φ = 0,2	yI_j	95	94,9	94,9	94,9	94,9	94,8	94,6	**80,7**	**28**	__	__	__
	yp_j	78,5	67,3	56,1	45	33,7	22,5	11,5	**5**	**5**	__	__	__
φ = 0,7	yI_j	95	94,9	94,8	94,9	94,9	95	94,8	**94,8**	**79,1**	__	__	__
	yp_j	33,3	71,6	60,3	48,6	37,2	25,6	14,5	**5**	**5**	__	__	__

Le coût de défaillance externe diminue quand le QL augmente, en raison de la diminution des valeurs du taux de défaillance, ce qui signifie que de plus en plus de meilleurs articles parviennent aux clients avec la meilleure qualité. CIF augmente quand le taux d'erreur d'inspection diminue. Cela est dû aux coûts considérablement plus élevés de la quantité de produits défectueux ainsi qu'aux coûts de défaillance d'exploitation et d'achat, ce qui signifie qu'une inspection plus poussée au niveau de la fabrication est nécessaire dans cette situation pour garantir que les produits de qualité parviennent au détaillant.

Lorsque Y_{si} et Y_{rk} augmentent, le niveau de qualité optimal qui minimise la quantité totale de COQ diminue. Il atteint 0,35 pour yIj = 91,9 et ypj = 5, et il est égal à 0,65 pour yIj = 83 et ypj = 5. À ces niveaux de QL, le CA commence à augmenter considérablement, ce qui est dû au besoin d'un investissement plus important dans les activités d'évaluation, étant donné que le fournisseur reçoit plus de composants défectueux.

Les coûts de prévention augmentent quand que le niveau de qualité minimum augmente. Comme décrit analytiquement dans l'équation 2.13, les coûts de prévention sont liés au nombre de bons produits expédiés par les fournisseurs (Y_{si}) et aux activités de prévention des fabricants (YPj). À mesure que ces deux éléments augmentent, au niveau de qualité minimum, CA commence à augmenter, ce qui justifie la nécessité d'investir davantage dans les activités d'évaluation.

On a pu générer des courbes similaires au modèle de Juran à l'aide de notre modèle de calcul des coûts de la qualité. On remarque que quand le taux de défaillance des fournisseurs est élevé, c'est-à-dire le

coût des activités de prévention dépasse les coûts d'évaluation, notre modèle tend vers la forme originale de la courbe de Juran.

[GUP, 2007] montre que lorsque la fabrication fonctionne à un taux de défaillance très faible, les managers ne doivent utiliser les activités d'évaluation telles que l'inspection, les tests et la vérification que pour aider à atteindre des niveaux de qualité plus élevés, car dans ce cas, ces activités d'évaluation n'ont pas de valeur ajoutée et donc l'inspection est utilisée uniquement lorsque les activités de prévention sont extrêmement coûteuses.

Dans notre modèle proposé, les coûts de prévention et d'évaluation constituent les coûts de conformité, et les coûts de défaillance interne et externe constituent les coûts de non-conformité. Il est clair qu'en augmentant les coûts de conformité, les coûts de la non-conformité sont automatiquement réduits. Le COQ total est lié au niveau de qualité, une qualité élevée est associée à un faible coût d'évaluation donc un faible coût de conformité.

Obtenir un niveau de qualité plus élevé implique plus d'évaluation et, par conséquent, plus de coûts de défaillance interne. Par conséquent, on constate que l'évaluation augmente quand le niveau de qualité global augmente. Ainsi, une relation potentiellement positive entre évaluation et les coûts de défaillance interne se pose étant donné que les articles défectueux sont détectés dans l'usine lors de l'inspection.

En ce qui concerne les coûts de défaillance externe et qui représentent la majeure partie des coûts de non-conformité, on constate que plus les défauts sont détectés à la fin du processus de fabrication et avant la livraison, moins il y aura de défaillance externe et de coûts d'opportunité.

2.7 Conclusion

Ce chapitre étudie l'impact de trois variables de qualité sur les coûts et le niveau de qualité d'une chaîne logistique à trois échelons. Une procédure basée sur les algorithmes génétiques a été développée pour optimiser le modèle SC-COQ proposé. Les solutions ont été examinées et validées par rapport aux données de fabrication de la chaîne logistique.

Sur la base des résultats obtenus, il existe une relation entre le taux de défaillance du fournisseur et le niveau de qualité optimal, ainsi qu'entre le taux de défaillance des détaillants et le niveau de qualité atteint. En outre, selon les résultats de l'analyse des données, les variables de décision du système ont un impact sur les catégories des coûts P-A-F lors du calcul des coûts de qualité et de la détermination du point COQ optimal. Par conséquent, l'inclusion des coûts de qualité dans la modélisation de la chaîne logistique peut aider les gestionnaires à prendre des décisions opérationnelles internes en tenant compte des taux de défaillance à chaque étape de la chaîne logistique.

A ce stade de notre travail, nous disposons d'un modèle d'optimisation des SCND intégrant le coût de la qualité, ainsi qu'une méthodologie de calcul des différentes composantes du CoQ. Le chapitre suivant portera sur une validation expérimentale de ce modèle, pour considérer l'aspect agroalimentaire, et inclure l'ensemble des coûts de la chaîne logistique. Il s'agit du développement d'un modèle mathématique permettant de minimiser le coût total dans une chaîne logistique alimentaire, prenant en considération l'aspect périssable des produits alimentaires ainsi que les autres contraintes de demande, capacité et bien évidemment la contrainte de qualité.

Chapitre 3 : Validation expérimentale : application à une chaîne logistique alimentaire

Résumé

Ce chapitre traite l'intégration du coût de qualité alimentaire COFQ dans la prise de décision sur les conditions de stockage et de transport à travers une chaîne logistique alimentaire. A l'issue du modèle quantitatif développé dans le chapitre précédent, nous proposons une méthodologie pour résoudre un modèle pour une SC alimentaire (FSC). Le modèle proposé est un problème de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes (MINLP), dont l'objectif est de minimiser le coût total sous les contraintes de niveau de qualité global, en raison du caractère périssable des produits, et des autres contraintes de la demande, de la capacité, de l'équilibre des flux et des coûts. La résolution du modèle proposée est faite à l'aide de deux approches : par la méthode exacte basée sur la technique Branch & Bound et une méthode approchée basée sur les algorithmes génétiques. Les résultats expérimentaux sont rapportés et discutés. Enfin, des implications et des idées pour les gestionnaires sont fournies en étudiant des exemples de taille pratique et réelle.

Chapitre 3

Validation expérimentale : application à une chaîne logistique alimentaire

3.1 Introduction

Les questions de qualité et sécurité alimentaire ont été au premier plan des préoccupations des entreprises agroalimentaires ces dernières années. Ceci est généré par une série de scandales et d'incidents survenus, et qui sont préjudiciables à la satisfaction et la sécurité des consommateurs. Par conséquent, les gouvernements commencent à imposer la qualité des produits alimentaires à toutes les étapes de la production, la transformation, et de la distribution [MAN, 2013]. Ainsi, comme toute autre chaîne logistique, la chaîne logistique alimentaire (FSC) qui est constituée généralement d'un réseau d'entités telles que production, transformation, distribution, etc., est dédiée à offrir une valeur ajoutée en maximisant les niveaux de service à la clientèle et de qualité globale et en minimisant les coûts. Cependant, il existe des caractéristiques pertinentes qui rendent la FSC plus complexe à gérer, notamment le large éventail des décisions à prendre, liées généralement à la qualité et à la sécurité, compte tenu de la nature périssable des produits alimentaires. La dégradation de la qualité du produit est souvent intégrée à la modélisation de l'offre [KEI, 2017].

La gestion de la chaîne logistique alimentaire a suscité peu d'intérêt dans la littérature en raison de la complexité des caractéristiques des produits alimentaires. [CHR, 1998] a suggéré que de nombreux indicateurs de performance pouvant être déployés dans une organisation contribuent de manière proportionnelle au succès ou à l'échec du marché. Cela nécessite des informations précises sur les attributs de maturité et de qualité et l'état de sécurité du produit, qui doivent être mesurées et analysées à l'aide d'instruments et de procédures appropriés. Les spécifications du produit, telles que la taille (masse, dimensions), les solides solubles, l'acidité, les arômes, etc., font partie des propriétés physiques, mécaniques et chimiques pouvant nécessiter une mesure [CRI, 2009]. Selon [VAN, 2000] et [VAN, 2005] les indicateurs de performance sont classés en trois niveaux principaux : le niveau de la chaîne logistique (qualité, réactivité, coûts totaux de la chaîne logistique), le niveau d'organisation (par exemple, niveau d'inventaire, délai de traitement, fiabilité de la livraison, coût total de l'organisation) et le niveau de processus (par exemple, réactivité, temps de traitement, coûts de processus) [LID, 1999]. Le souci de détérioration de la qualité du produit est la mesure de la performance la plus importante à travers la FSC. Le maintien des normes de qualité alimentaire élevées est très important pour la performance de la chaîne logistique, la valeur marchande du produit, la sécurité alimentaire, l'intégrité et la durée de conservation qui se dégrade en fonction des conditions de stockage et de transport. Les produits alimentaires dans les magasins de vente au détail devraient être de bonne qualité, avoir une durée de conservation convenable et être adaptés à leur usage [ARA, 2007]. Par conséquent, les investissements dans la conception des chaînes ne doivent pas uniquement viser à améliorer les performances logistiques, mais également à préserver la qualité des aliments afin que les bons produits soient livrés avec la bonne qualité au bon endroit et au bon moment [VAN, 2005].

Cependant, la grande variabilité de la qualité de la production, de la manipulation et de la transformation des matières premières alimentaires crée une incertitude quant à la capacité de l'industrie à garantir au consommateur un approvisionnement constant et sûr en produits de qualité [MOS, 1995].

L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle permettant de minimiser le coût total dans une chaîne logistique alimentaire en combinant des modèles de dégradation de la qualité des aliments avec un modèle logistique.

3.2 Etat de l'art sur les chaînes logistiques alimentaires

Nous trouvons dans la littérature plusieurs études traitant l'optimisation des spécificités ayant une valeur pratique dans la prévention de la dégradation de la qualité des aliments, telles que le coût, la durée et les conditions de stockage des aliments frais pendant le transport. Par exemple :

[LID, 1999] ont proposé un modèle pour améliorer l'efficacité et l'efficience d'une chaîne logistique, fondé sur les bénéfices, les délais d'exécution et l'élimination des déchets.

[VAN, 2000] ont présenté un cadre complet pouvant être utilisé pour développer des séries chronologiques non linéaires pour des produits alimentaires à durée de conservation courte et l'ont appliqué avec succès aux données de vente de lait frais. La méthode est une combinaison de deux technologies d'intelligence artificielle : la fonction de base radiale (RBF) et l'algorithme génétique.

[WAN, 2001] a développé un problème d'acheminement de véhicules à objectifs multiples pour les itinéraires de distribution de denrées périssables, visant à minimiser le coût total et à maximiser l'état de fraîcheur des produits livrés. L'auteur a utilisé la méthode floue pour déterminer un indicateur quantifié de risque de sécurité des aliments afin d'étayer les décisions opérationnelles et d'être utile en tant que composant d'un système HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*).

[ENT, 2005] a développé une approche de programmation linéaire en nombres entiers mixtes, prenant en compte la durée de conservation dans la planification de la production, appliquée à la production de yaourt. Pour résoudre le modèle, l'auteur a utilisé les procédures Branch and Bound mises en œuvre avec OPL Studio 3.6.1 d'ILOG comme environnement de modélisation et son logiciel d'optimisation standard intégré CPLEX 8.1.

[EKS, 2006] a développé un problème de planification de la production et de la distribution dans une chaîne logistique dynamique en deux étapes en tenant compte de l'aspect périssable et de la durée de conservation limitée des produits. Mais ce modèle ne prend pas en compte les coûts de transport.

[ARA, 2007] a présenté un modèle conceptuel pour la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire comprenant quatre mesures de performance : efficacité, flexibilité, réactivité et qualité des aliments, et l'a appliqué à la chaîne logistique de la tomate.

[ZHA, 2011] a proposé un réseau de chaîne logistique agroalimentaire multi-échelons et multi-produits afin de minimiser les coûts de production et de transport. Le modèle proposé est un problème de programmation en nombres entiers mixtes (MIP) qui a été résolu par une approche d'optimisation d'essaims particulaires (PSO).

[RON, 2011] a développé une approche d'optimisation pour gérer la qualité des produits frais tout au long d'une chaîne logistique. Selon l'auteur, le modèle proposé peut être utilisé pour concevoir et exploiter des systèmes de distribution des denrées alimentaires en utilisant les critères de qualité et de coût des aliments. Le modèle proposé est un modèle linéaire qui a été implémenté dans OPL Studio de ILOG en combinaison avec le logiciel d'optimisation CPLEX 10.

[TSA, 2013] a proposé un réseau de chaîne logistique en aliments frais. Il a développé un modèle pour déterminer le service optimal pour les sociétés de commercialisation de produits agricoles. L'auteur a proposé un algorithme pour résoudre le problème non linéaire, a fourni une analyse numérique pour illustrer la procédure de solution proposée et a examiné les effets de divers paramètres du système sur

les décisions et les bénéfices totaux. Le cas réel d'une chaîne logistique en produits agricoles à Taiwan est utilisé pour vérifier le modèle.

[ZHA, 2014] a proposé une procédure d'algorithme génétique pour résoudre un modèle de problème de routage de véhicule dans la logistique de la chaîne du froid pour un produit multi-alimentaire. L'objectif était de minimiser les coûts de livraison, y compris les coûts de transport, de refroidissement et de pénalité, compte tenu des contraintes de temps, de poids de chargement et de volume. Une méthode basée sur les algorithmes génétiques a été proposée pour résoudre le modèle et les expériences ont montré que cette méthode peut fournir des solutions valables présentant de bonnes caractéristiques de robustesse et de convergence dans un laps de temps raisonnable.

[BAG, 2015] ont utilisé la méthodologie ISM ('Interpretive structural modelling') pour concevoir un réseau durable de réseau de traitement des produits alimentaires en Inde. Cette méthodologie vise à inclure les aspects environnementaux et sociaux dans la chaîne d'approvisionnement du secteur alimentaire.

[BOU, 2015]. a développé un modèle mathématique pour résoudre le problème de localisation-affectation d'un centre de distribution de viande de poulet, tout en minimisant les coûts logistiques totaux et en respectant la capacité des véhicules et des abattoirs. La solution d'optimisation sous LINGO version 12.0 a été utilisée pour résoudre le problème.

[NAK, 2016] a développé une méthodologie pour évaluer la chaîne d'approvisionnement en produits frais afin d'optimiser le coût total tout en maintenant le niveau de qualité requis. L'application du modèle de coût total proposé a été démontrée à l'aide de trois approches : algorithme génétique (AG), algorithme génétique floue (FGA) et recuit simulé (SA). L'auteur a suggéré que les trois approches sont adoptables, mais la FGA a fourni une meilleure performance que les deux autres approches de l'AG et de SA basée sur l'évaluation de la performance.

[KEI, 2017] a présenté un modèle MILP pour concevoir un réseau logistique de distribution de produits périssables, en tenant compte de la dégradation de la qualité des produits et de son hétérogénéité. La dégradation de la qualité était basée sur un modèle temps-température, ainsi que sur d'autres conditions environnementales telles que l'humidité. Le modèle a été testé pour diverses petites et grandes instances d'un réseau logistique de fleurs coupées.

La plupart des travaux d'optimisation des chaînes logistiques alimentaires (FSC) traitent séparément la qualité des aliments et le coût total engendré par les entités de la (FSC). La minimisation du coût de la qualité est un domaine d'actualité mais qui n'a toujours pas été traité dans ce type de problèmes. A l'issue de ces travaux, et en se basant sur le modèle développé dans le chapitre précédent, nous allons proposer dans ce chapitre un modèle qui minimise le coût total à travers une chaîne logistique alimentaire en combinant des modèles de dégradation de la qualité des aliments avec un modèle logistique selon la célèbre classification du modèle de P-A-F pour le calcul du coût de la qualité. Dans la section suivante, nous présenterons brièvement un rappel sur la dégradation de la qualité des produits alimentaires.

3.3 Expressions de la dégradation de la qualité dans les chaînes logistiques alimentaires (FSC)

Dans cette section, nous définissons brièvement la dynamique de la dégradation de la qualité, qui va nous aider dans la modélisation des coûts de la qualité dans une chaîne logistique alimentaire.

En général, la dégradation de la qualité des produits alimentaires en stock, ou en transport dépend des conditions de stockage, température du stockage et d'autres variables par exemple, énergie d'activation,

constante des gaz, etc. Selon [RON, 2011], l'évolution de la qualité des aliments au fil du temps peut être décrite comme suit :

$$\Delta q = \frac{dq}{dt} = k \times q^n \tag{3.1}$$

Avec :
q est la qualité du produit ;
k est le taux de dégradation de la qualité qui dépend des conditions environnementales telles que la température ;
n est l'ordre de la réaction.

Le facteur de puissance n est égal à 0 dans le cas de réactions d'ordre zéro, ce qui entraîne une dégradation de la qualité linéaire, par exemple pour les fruits et les légumes frais. Et il est égal à 1 dans le cas d'une réaction de premier ordre qui conduit à une dégradation de qualité exponentielle, par exemple pour la viande et le poisson frais. La figure 3.1 illustre la dégradation de la qualité des produits alimentaires.

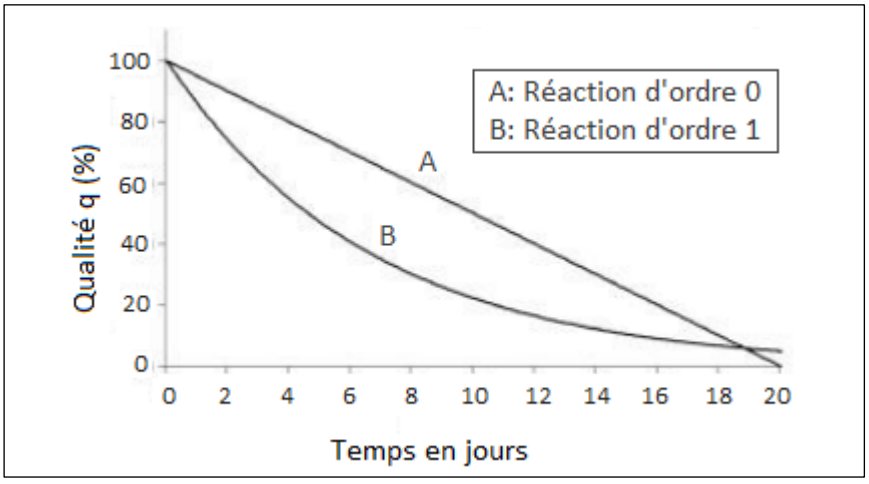


Figure 3.1. Dégradation de la qualité des aliments [RON, 2011]

En cinétique chimique, la température est un facteur important conduisant à une dégradation de la qualité des aliments. Le taux de dégradation de la qualité k peut être calculé à l'aide de l'équation « d'Arrhenius » qui donne la variation de la vitesse d'une réaction chimique ou la dégradation de la qualité en fonction de la température. Cette loi a été énoncée en 1889 par Svante August Arrhenius [ARR, 1967], mais n'a été acceptée par les chimistes de son temps que vers 1910. Elle est basée sur des résultats expérimentaux obtenus par l'étude d'un grand nombre de réactions chimiques, et qui est devenue par la suite une loi théorique très importante. La forme générale de l'équation d'Arrhenius est la suivante :

$$k = k_0 \exp^{\frac{-E_\alpha}{RT}} \tag{3.2}$$

Où :
T est la température ;
k_0 est une constante ;
E_α est l'énergie d'activation définie comme l'énergie minimale requise pour déclencher une réaction chimique exprimée en kJ / mol, et R la constante des gaz (dont la valeur usuelle R = 8,314 J K^{-1} mol^{-1}).

On trouve dans la littérature plusieurs travaux, dont le calcul de la dégradation de la qualité est basé sur cette loi, à savoir [LIN, 2014] et [NAK, 2016].

Le taux de détérioration de la qualité pendant le stockage peut être calculé comme suit :

- Pour la réaction d'ordre zéro (n = 0) :

$$q = q_0 - \left[\sum_i^m k_i \ t_i\right] \tag{3.3}$$

Avec :

q_0 est la qualité initiale du produit ;
i est le nombre des périodes de stockage (i = 1 ….. m).

- Pour la réaction de premier ordre (n = 1) :

$$q = q_0 . \ \exp\left[-\sum_i^m k_i \ t_i\right] \tag{3.4}$$

En substituant les équations au taux de dégradation de la qualité, nous obtenons :

- Pour la réaction d'ordre zéro (n = 0) :

$$q = q_0 - \left[\sum_i^m k_0 \ t_i \exp^{\frac{-E_\alpha}{RT}}\right] \tag{3.5}$$

- Pour la réaction de premier ordre (n = 1) :

$$q = q_0 . \exp\left[-\sum_i^m k_0 \ t_i \exp^{\frac{-E_\alpha}{RT}}\right] \tag{3.6}$$

Nous pouvons en déduire la qualité des produits alimentaires après stockage, à des périodes de temps et pour une température données. Dans ce travail, nous considérons la réaction d'ordre zéro qui est linéaire afin de réduire la complexité du problème. Dans ce cas, la dégradation de la qualité Δq pendant une période τ et une température T est donnée par l'équation 3.7.

$$\Delta q = -k_0 \tau \ \exp^{\frac{-E_\alpha}{RT}} \tag{3.7}$$

3.4 Formulation du modèle d'optimisation de la chaîne logistique alimentaire

3.4.1 Représentation générique de la chaîne logistique alimentaire

Le problème de conception de notre chaîne d'approvisionnement alimentaire abordé dans ce travail est un système intégré à produit unique illustré sur la figure 3.2. Cette chaîne logistique générique est basée sur les sites de production, les sites de stockage, le transport et les détaillants. Notre approche de modélisation consiste en une fonction objectif : la minimisation du coût total.La tâche de conception implique le choix des sites de production et des sites de stockage à sélectionner, ainsi que le choix du véhicule de transport pour satisfaire la demande des clients à un coût minimal.

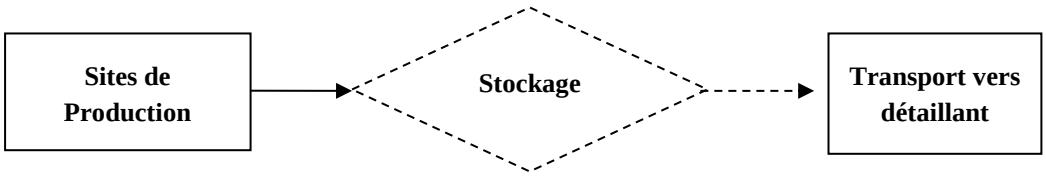


Figure 3.2. Modélisation générique de la FSC étudiée

Dans ce qui suit, nous présentons l'ensemble des indices, des paramètres et des variables utilisés pour le développement de notre modèle d'optimisation de la FSC considérant le coût de la qualité.

3.4.2 Variables du modèle

Ensembles :

t	: Indice de temps (t=1,…, T) ;
P	: Ensemble des sites de production (p=1,…, P) ;
D	: Ensemble des sites de stockage (d=1,…, D) ;
Y	: Ensemble des véhicules de transport (y=1,…, Y) ;
R	: Ensemble des détaillants (r=1,…, R).

Paramètres :

$a_{p,t}$	: Capacité de production pour les sites de production ;
$b_{d,t}$	: Capacité de stockage pour les sites de stockage ;
$f_{d,r,y}$	: Coût de transport d'un produit par période du site de stockage d au détaillant r ;
g_d^1	: Coût de refroidissement pour le site de stockage d par période ;
g_d^2	: Coût de stockage d'un produit par période dans le site de stockage d ;
$P_{p,t}$	: Coût de production d'un produit dans le site de production p∈ P dans la période t ;
$dem_{r,t}$	: Demande au niveau du détaillant r dans la période t ;
q	: Niveau de qualité global de la FSC ;
Δq_d	: Dégradation de la qualité par période pour les produits stockés dans les sites de stockages d ;
$\Delta q_{d,y}$	: Dégradation de la qualité pour les produits transportés des sites de stockage d vers le détaillant r par le véhicule de transport y ;
$C_{A\,fix}$	: Coût fixes d'inspection après stockage ;
$C_{A\,var}$	: Coût variables d'inspection à la fin du stockage ;
$C_{p\,var}$	: Coût variables pour les activités de prévention ;
C_{IFfix}	: Coût fixes des défaillances internes ;
C_s	: Perte générée par les produits alimentaires expédiés des sites de production pour répondre aux exigences de qualité ;
$\overline{C_{EF}}$	: Coût par produit défectueux destiné au traitement.

Variables de décision :

$W_{p,d,t}$	: Flux de produits allant du site de production p vers le site de stockage d pendant la période t ;
$W_{d,r,t}$	: Flux de produits allant du site de stockage d vers le détaillant r pendant la période t ;
α_p	: Taux de défaillance du site de stockage d ;

β_d : Taux d'erreur d'inspection après le processus de stockage ;

$Z_{p,t}$ $\begin{cases} 1 \text{ si le site de production p est sélectionné ;} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$

$O_{d,r,t}$ $\begin{cases} 1 \text{ si le véhicule de transport y est sélectionné à la période t ;} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$

$X_{d,t}$ $\begin{cases} 1 \text{ si le site de stockage d est sélectionné à la période t ;} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$

3.4.3 Organigramme de la FSC modélisée

La Figure 3.3 montre la représentation du flux de produits alimentaires à travers notre FSC étudiée. Le modèle calcule les bons et les mauvais produits à chaque étape.

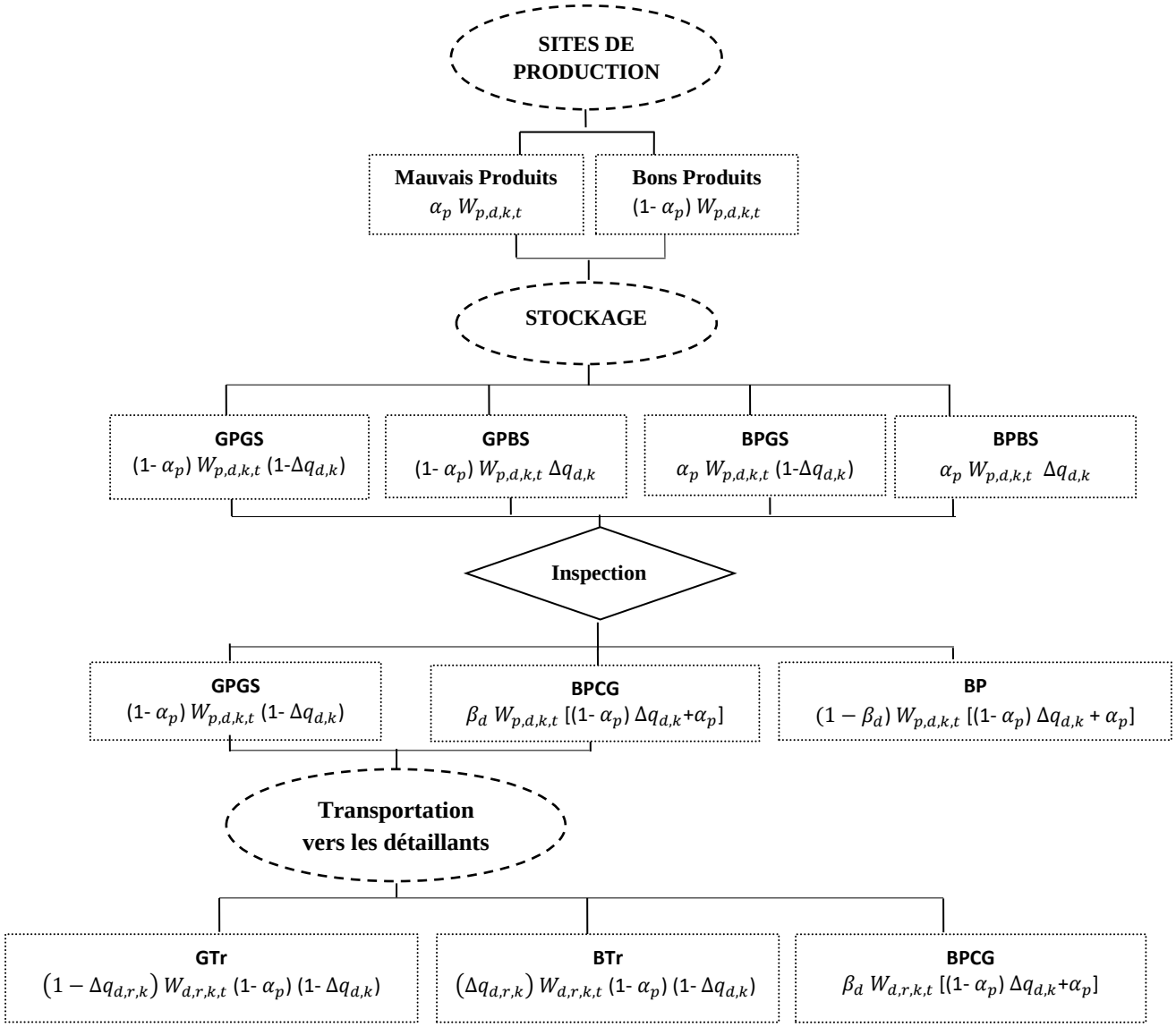


Figure 3.3. Organigramme de la FSC modélisée

3.4.4 Expressions utilisées dans l'organigramme :

L'organigramme présenté dans la figure 3.3 montre le processus conceptuel de notre modèle, ainsi que le flux des produits alimentaires passant à travers notre chaîne logistique depuis les sites de production jusqu'aux détaillants.

Nous décrivons les expressions utilisées dans l'organigramme :

Quantité des bons produits avec un stockage réussi :

$$GPGS = (1- \alpha_p)\, W_{p,d,k,t}\, (1- \Delta q_{d,k}) \tag{3.8}$$

Quantité des bons produits avec un stockage défaillant :

$$GPBS = (1- \alpha_p)\, W_{p,d,k,t} \Delta q_{d,k} \tag{3.9}$$

Quantité des mauvais produits avec un stockage réussi :

$$BPGS = \alpha_p W_{p,d,k,t}\, (1-\Delta q_{d,k}) \tag{3.10}$$

Quantité des bons produits après un transport réussi :

$$GTr = \left(1 - \Delta q_{d,r,k}\right) W_{d,r,k,t}\, (1- \alpha_p)\, (1- \Delta q_{d,k}) \tag{3.11}$$

Quantité des mauvais produits en raison de la dégradation de la qualité du matériel de transport :

$$BTr = \left(\Delta q_{d,r,k}\right) W_{d,r,k,t}\, (1- \alpha_p)\, (1- \Delta q_{d,k}) \tag{3.12}$$

Mauvais produits classés comme bons en raison d'une erreur d'inspection :

$$BPCG = \beta_d W_{p,d,k,t}\, [(1- \alpha_p)\, \Delta q_{d,k} + \alpha_p] \tag{3.13}$$

Total des mauvais produits :

$$BP = (1 - \beta_d)\, W_{p,d,k,t}\, [(1- \alpha_p)\, \Delta q_{d,k} + \alpha_p] \tag{3.14}$$

Quantité des mauvais produits avec un stockage défaillant :

$$BPBS = \alpha_p W_{p,d,k,t} \Delta q_{d,k} \tag{3.15}$$

Nous présentons dans les paragraphes suivants, les expressions des différentes catégories de coûts à travers notre FSC étudiée.

3.4.5 Evaluation des coûts de la chaîne logistique alimentaire FSC

3.4.5.1 Coûts opérationnels

Les coûts opérationnels C_{op} dans l'ensemble de notre FSC sont composés des coûts de production et des coûts de stockage. Les coûts opérationnels sont donnés par l'équation 3.16.

$$C_{op} = \sum_t \sum_p P_{p,t} W_{p,d,t} Z_{p,t} + \sum_t \sum_d g_d^2\, W_{d,r,t} X_{d,t} \tag{3.16}$$

Où le premier terme représente les coûts de production totaux et le second terme, les coûts de stockage.

3.4.5.2 Coût de transport

Le coût du transport C_{tr} des produits alimentaires depuis les sites de stockage aux détaillants est donné par l'équation 3.17.

$$C_{tr} = \sum_{t}\sum_{d}\sum_{y} f_{d,r,y} W_{d,r,t} O_{d,r,t} \tag{3.17}$$

3.4.5.3 Coût d'obtention de la qualité des aliments

Dans notre approche de modélisation, le coût des éléments de qualité selon la classification P-A-F est décrit comme suit :

Coûts de prévention

Dans ce modèle, le coût de prévention Cp est lié à la prévention de la dégradation de la qualité après le processus de stockage. Il est composé d'un coût fixe représentant les coûts de refroidissement des installations de stockage et de refroidissement des équipements de transport et d'un coût variable pour la prévention de la mauvaise qualité des produits alimentaires suite à un processus de stockage défaillant. Lorsque le nombre de bons produits stockés avec succès augmente, le total des déchets diminue et le niveau de qualité du FSC total s'améliore. En effet, les coûts de prévention peuvent être exprimés par l'équation 3.18.

$$C_P = \sum_{d} g_d^1 X_{d,t} + \sum_{d}\sum_{p}\sum_{t} C_{p\,var}(1-\alpha_p) W_{p,d,t} (1-\Delta q_d) Z_{p,t} X_{d,t} \tag{3.18}$$

Coûts d'évaluation

Afin de vérifier la conformité des produits alimentaires sortant des installations de stockage, un système de contrôle est mis en place en aval. Dans les industries alimentaires, les produits alimentaires dont le stockage a échoué ne peuvent être ni vendus ni retravaillés, cela génère des déchets. Les coûts d'évaluation comprennent une partie fixe générée par le coût du système de mesure, du coût de la maintenance, des équipements, du coût des tests de laboratoire, etc., ainsi qu'une partie variable qui augmente lorsque l'inspection est plus précise. Le coût de l'évaluation est donné par l'équation 3.19.

$$C_A = \sum_{p} C_{A\,fix} Z_{p,t} + \sum_{d}\sum_{t}\sum_{p} C_{Avar}(1-\beta_d) W_{p,d,t} Z_{p,t} X_{d,t} \tag{3.19}$$

Coûts de défaillance interne

Les coûts de défaillance interne sont les coûts générés par les produits alimentaires dont la qualité s'est dégradée au cours du stockage et ont été découverts avant expédition au détaillant. Selon le modèle, les coûts de défaillance interne sont générés par BP et BPCG suite à une erreur de contrôle. Les mauvais produits représentent des déchets qui ne peuvent être ni vendus ni retravaillés en raison de la nature critique des produits alimentaires. Le coût de la défaillance interne est donné par l'équation 3.20.

$$\begin{aligned} C_{IF} = & \sum_{p} C_{IF\,fix} Z_{p,t} + \sum_{p}\sum_{t}\sum_{d} g_d^2 (1-\beta_d) W_{p,d,t} \left[(1-\alpha_p)\Delta q_d\right] X_{d,t} Z_{p,t} \\ & + \sum_{p}\sum_{d}\sum_{t} \left(g_d^2 + C_s\right) W_{p,d,t} (1-\beta_d) \alpha_p X_{d,t} Z_{p,t} \end{aligned} \tag{3.20}$$

Le premier terme de cette équation est un coût fixe d'élimination des déchets. Le second terme correspond aux coûts de défaillance opérationnelle calculés comme le coût de stockage par produit multiplié par le nombre de mauvais produits classés comme bons en raison d'une erreur d'inspection. Le troisième terme est calculé en fonction de la perte due à la défaillance de produits provenant d'agriculteurs ou de sites de production (Cs), ainsi que du coût de stockage d'un produit pendant une période dans une installation de stockage d à un niveau de température k multiplié par les mauvais produits dus aux sites de production et les produits défectueux en raison d'un stockage défaillant.

Coûts de défaillance externes :

Les coûts de défaillance externes sont les coûts générés par les déchets qui sont générés lorsque la qualité du produit tombe en dessous du niveau de qualité requis FQ_L et qui sont découverts après leur expédition au détaillant. L'expression des coûts de défaillance externes est donnée par l'équation 3.21.

$$C_{EF} = \sum_{d}\sum_{p}\sum_{t}\sum_{y} \overline{C_{EF}} W_{d,r,t} \left[\Delta q_{d,y}(1-\alpha_p)(1-\Delta q_d) + \beta_d\left[(1-\alpha_p)\Delta q_d + \alpha_p\right]\right] X_{d,t}\, O_{d,r,t} \quad (3.21)$$

Coût total de la qualité des aliments COFQ

Le coût total d'obtention de la qualité des aliments COFQ est calculé en faisant la somme des coûts de prévention, d'évaluation, de défaillance interne et externe, tels que définis par l'équation 3.22.

$$COFQ = C_P + C_A + C_{IF} + C_{EF} \quad (3.22)$$

3.4.6 Formulation mathématique du modèle FSC-COQ

La fonction objectif consiste à minimiser le coût total de la chaîne logistique alimentaire. Ce coût total étant la somme des coûts opérationnels, des coûts liés à la qualité des aliments et des coûts de transport :

Minimiser

$$\sum_{t}\sum_{p} P_{p,t} W_{p,d,t} Z_{p,t} + \sum_{t}\sum_{d} g_{d,k}^2\, W_{p,d,t} X_{d,t} + \sum_{t}\sum_{p} f_{d,r} W_{d,r,t} O_{d,r,t} + \mathbf{COFQ}\,(W_{p,d,t}, W_{d,r,t}, Z_{p,t}, X_{d,t}, O_{d,r,t}, \alpha_p, \beta_d) \quad (3.23)$$

Sujet à :

$$\sum_{t} W_{d,r,t} \geq dem_{r,t}\ ;\ \forall r \in R, \forall t \quad (3.24)$$

$$\sum_{t} W_{p,d,t} \geq \sum_{t} W_{d,r,t}\ \ ;\ \forall d \in D \quad (3.25)$$

$$\sum_{t} W_{p,d,t} \leq \sum_{p} a_{p,t} Z_{p,t} \quad (3.26)$$

$$\sum_{t} W_{d,r,t} \leq \sum_{d} b_{d,t} X_{d,t} \quad (3.27)$$

$$FQ_L \geq l\, R_t \quad (3.28)$$

$$Z_{k,t} \in \{0.1\} \forall\, t \in T \tag{3.29}$$

$$O_{d,r,t} \in \{0.1\} \forall\, t \in T \tag{3.30}$$

$$X_{d,t} \in \{0.1\} \forall\, t \in T \tag{3.31}$$

$$0 \leq\ \alpha_p \leq 1\ \forall\, p\ \in P \tag{3.32}$$

$$0\ \leq\ \beta_d\ \leq 1\ \forall\, d\ \in D \tag{3.33}$$

Dans la formulation ci-dessus, la fonction objectif 3.23 à 3.33 vise à minimiser le coût total, comprenant les coûts opérationnels, les coûts de transport et le coût total de la qualité alimentaire COFQ calculé dans l'équation 3.22. La contrainte 3.24 impose que la demande chez le détaillant ne soit pas dépassée. La contrainte 3.25 garantit que le nombre de produits alimentaires transitant par les sites de stockage est égal au nombre de produits alimentaires transportés vers les détaillants (équilibre de flux).
La contrainte 3.26 garantit que la capacité des producteurs n'est pas dépassée. La contrainte 3.27 impose que la capacité des sites de stockage ne soit pas dépassée. La contrainte 3.28 est la contrainte de niveau de qualité ; ainsi, la qualité des produits alimentaires livrés chez chaque détaillant doit atteindre le niveau de qualité minimal requis. Le niveau de qualité FQ_L est la proportion des bons produits par rapport à la demande totale chez le détaillant, donnée par l'équation 3.34.

$$FQ_L = \frac{\sum_d \sum_p \sum_y (1 - \Delta q_{d,y}) W_{d,r,t} (1 - \alpha_p)(1 - \Delta q_d)\ \mathrm{Z_{p,t}}\ \mathrm{X_{d,t}}\ \mathrm{O_{d,r,t}}}{\sum_d W_{d,r,t}\ \mathrm{X_{d,t}}} \tag{3.34}$$

Les contraintes 3.29, 3.30 et 3.31 sont des contraintes de non-négativité pour les variables de décision. Enfin, les contraintes 3.32 et 3.33 sont les plages de faisabilité des variables du modèle.

3.5 Résolution exacte du modèle FSC-COQ sous la contrainte du coût de la qualité

3.5.1 Solveur CPLEX 12.6 : ILOG OPL

Cette section est consacrée à la résolution basée sur une méthode exacte du modèle FSC-COQ. Rappelons que le modèle présenté précédemment est un modèle non linéaire en nombres entiers mixtes (MINLP), dont une résolution exacte s'avère nécessaire afin de qualifier l'état d'optimalité du problème. La résolution exacte est une application qui permet de trouver une solution optimale pour une instance de taille finie et de prouver son optimalité [PUC, 2005].
Parmi les méthodes exactes les plus utilisées dans la littérature, on trouve l'algorithme de séparation et d'évaluation plus connu sous son appellation anglaise Branch and Bound (B&B) [LAN, 1960]. Cette technique repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, en représentant les solutions par un arbre d'états, avec des noeuds et des branches. On peut rappeler un exemple très courant qui repose sur le Branch & Bound : le problème du sac à dos. La méthode Branch & Bound est basé sur trois axes principaux : – L'évaluation (qui permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale), – La séparation (qui consiste à diviser le problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée), – La stratégie de parcours (La largeur d'abord, La profondeur d'abord, Le meilleur d'abord).
Il existe plusieurs solveurs commerciaux dédiés à résoudre ce type de problèmes, dont le plus célèbre est le solveur CPLEX avec sa dernière version 12.8. Ce logiciel a été développé par l'équipe de Robert

Bixby pour résoudre le problème du voyageur de commerce de grande taille. Ensuite, il a été commercialisé par IBM vu son succès depuis son acquisition de l'entreprise française ILOG en 2009. CPLEX est fréquemment utilisé dans la résolution des modèles mathématiques. Par exemple [ALT, 2009] a résolu un problème de minimisation de coût et d'affectation des entités d'une SCM multi produits par le biais d'une procédure basée sur les algorithmes génétiques. L'efficacité des résultats obtenus a été ensuite testée par le solveur CPLEX. [KHE, 2019] a développé un programme en nombres entiers mixtes et un algorithme de décomposition lagrangienne pour la conception d'un réseau de chaîne logistique avec contrainte de quantité et modes de transport. Le modèle MILP a été résolu par CPLEX qui a généré des solutions entières réalisables pour la majorité des grandes instances du problème.

Nous illustrons sur la figure 3.4 les différentes composantes de la suite d'optimisation ILOG.

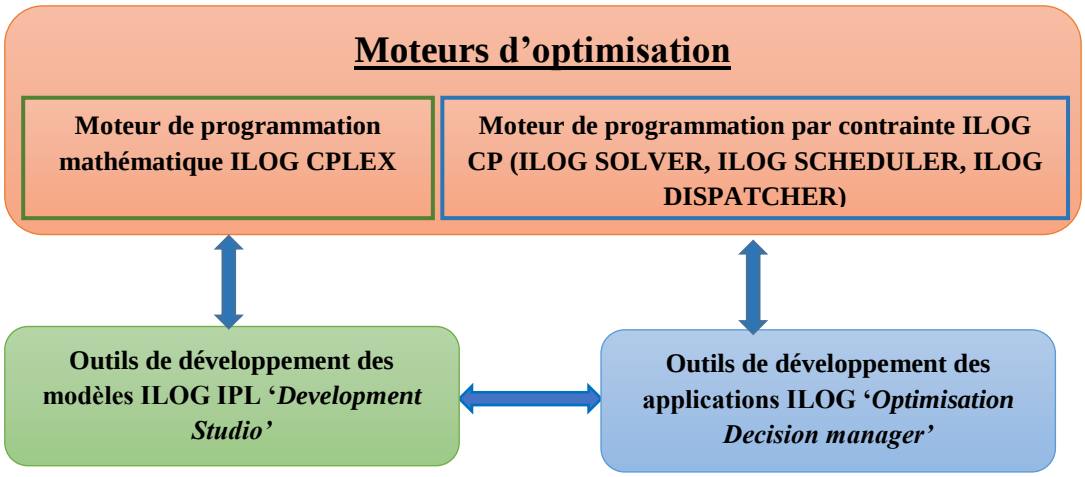


Figure 3.4. Les composantes d'optimisation ILOG

3.5.2 Résultats numériques et discussion

Pour examiner les performances du modèle mathématique FSC-COQ développé, nous appliquons l'approche de modélisation dans une étude de cas illustrative pour une chaîne alimentaire du poivron. La dégradation de la qualité des poivrons suit une réaction d'ordre zéro, ce qui signifie que n = 0 pour l'équation 3.1, c'est-à-dire, la qualité est une fonction linéaire de la température.

Les données expérimentales utilisées dans les problèmes de test sont rapportées dans le tableau 3.1. Le reste des données est rapporté dans les travaux de [ITT, 1996], [RON, 2011] et [KRY, 2014] pour un niveau de qualité compris entre 0,15 et 0,95 et qui a été utilisé comme base pour les applications numériques.

La conception du réseau logistique décrite dans notre modèle aboutit à un problème de programmation non linéaire à entiers mixtes (MINLP), qui a été développé dans OPL Studio d'IBM ILOG en combinaison avec le logiciel d'optimisation CPLEX 12.6 implémenté dans un ordinateur équipé d'un microprocesseur de 4,0 Go de mémoire (RAM). Une limite de 3600 secondes a été imposée dans laquelle une solution optimale doit être fournie sinon le processus doit s'arrêter.

Tableau 3.1. Valeurs des paramètres utilisés en programmation pour générer les instances sur CPLEX 12.6

Paramètre d'entrée	Valeur
Flux de produits allant du site de production p vers le site de stockage d pendant la période t : $W_{p,d,t}$.	1300
Capacité de production pour les sites de production : $a_{p,t}$.	1450
Flux de produits allant du site de stockage d vers le détaillant r pendant la période t: $W_{d,r,t}$.	1200
Capacité de stockage pour les sites de stockage : $b_{d,t}$.	1450
Erreur d'inspection après le processus de stockage : β_d.	2 %
Taux de défaillance du site de stockage d α_p.	2%
Demande au niveau du détaillant r dans la période t: $dem_{r,t}$.	500 ($)
Coût de refroidissement pour le site de stockage d par période : g_d^1.	3,2 ($)
Cout de stockage par période dans le site de stockage d : g_d^2.	2,3 ($)
Coût par produit défectueux destiné au traitement $\overline{C_{EF}}$.	150 ($)
Cout de transport d'un produit par période du site de stockage d au détaillant r $f_{d,r,y}$.	0,9 ($)
Cout de production d'un produit dans le site de production p∈ P dans la période t $P_{p,t}$.	0,21 ($)
Couts variables d'inspection à la fin du stockage $C_{A\,var}$.	2,5 ($)
Couts fixes d'inspection après stockage : $C_{A\,fix}$.	1,8 ($)
Couts variables pour les activités de prévention $C_{p\,var}$.	2,5 ($)
Couts fixes des défaillances internes C_{IFfix}.	3,4 ($)
Perte générée par les produits alimentaires expédiés des sites de production pour répondre aux exigences de qualité C_s.	2,7 ($)

3.5.2.1 Etude de l'impact de la dégradation de la qualité au niveau des sites de stockage sur le coût total

L'impact de la dégradation de la qualité Δq_d des produits stockés dans les sites de stockage sur la courbe de coût total est étudié dans ce premier exemple d'application. Pour notre modèle, nous supposons qu'un site de production et une installation de stockage soient sélectionnés parmi plusieurs. Nous faisons également un choix pour le niveau de la température de stockage pour tout l'horizon de planification. Afin de minimiser le coût total tout en maintenant un niveau de qualité donné FQ_L, nous allons optimiser les paramètres α_p et $\Delta q_{d,y}$. Ensuite, le paramètre Δq_d prendra les valeurs 3% et 30%. Les tableaux 3.2 et 3.3 donnent les résultats numériques pour les deux valeurs de Δq_d .

Tableau 3.2. Coûts totaux pour Δq_d=0,03

FQ_L (%)	Coût ($)	α_p	$\Delta q_{d,y}$	C_A	C_P	C_{IF}	C_{EF}	C_{op1}	C_{op2}	C_{tr}
94,58	27504,36	2%	0,005	3186,8	3092,6	1016,2	855,69	273	18000	1080
94,11	16993,48	2%	0,01	3186,8	3092,6	449,81	1711,2	273	7200	1080
93,15	14031,70	2%	0,02	3186,8	3092,6	216,95	3422,3	273	2760	1080
91,25	17453,86	2%	0,04	3186,8	3092,6	216,95	6844,5	273	2760	1080
87,45	24298,18	2%	0,08	3186,8	3092,6	216,95	13689	273	2760	1080

85,55	27720,34	2%	0,1	3186,8	3092,6	216,95	17111	273	2760	1080
76,04	44831,14	2%	0,2	3186,8	3092,6	216,95	34222	273	2760	1080
66,54	61941,94	2%	0,3	3186,8	3092,6	216,95	51333	273	2760	1080
57,03	79052,74	2%	0,4	3186,8	3092,6	216,95	68443	273	2760	1080
47,53	96163,54	2%	0,5	3186,8	3092,6	216,95	85554	273	2760	1080
38,02	113274,34	2%	0,6	3186,8	3092,6	216,95	102660	273	2760	1080
28,51	130385,14	2%	0,7	3186,8	3092,6	216,95	119775	273	2760	1080
19,01	147495,94	2%	0,8	3186,8	3092,6	216,95	136800	273	2760	1080

Tableau 3.3. Coûts totaux pour Δq_d=0,3

FQ_L (%)	Coût ($)	α_p	$\Delta q_{d,y}$	C_A	C_P	C_{IF}	C_{EF}	C_{op1}	C_{op2}	C_{tr}
68,60	31463,54	2%	0,005	3186,80	2232,7	6072,7	618,34	273	18000	1080
67,91	17680,65	2%	0,01	3186,80	2232,7	2472,4	1235,7	273	7200	1080
66,54	14230,12	2%	0,03	3186,80	2232,7	992,28	3705,3	273	2760	1080
65,85	15464,92	2%	0,04	3186,80	2232,7	992,28	4940,1	273	2760	1080
63,11	20404,12	2%	0,08	3186,80	2232,7	992,28	9879,3	273	2760	1080
61,74	22873,72	2%	0,1	3186,80	2232,7	992,28	12349	273	2760	1080
54,88	35221,72	2%	0,2	3186,80	2232,7	992,28	24697	273	2760	1080
48,02	47569,72	2%	0,3	3186,80	2232,7	992,28	37045	273	2760	1080
41,16	59917,72	2%	0,4	3186,80	2232,7	992,28	49393	273	2760	1080
34,30	72265,72	2%	0,5	3186,80	2232,7	992,28	61741	273	2760	1080
27,44	84613,72	2%	0,6	3186,80	2232,7	992,28	74089	273	2760	1080
20,58	96961,72	2%	0,7	3186,80	2232,7	992,28	86437	273	2760	1080
13,72	109309.72	2%	0,8	3186,80	2232,7	992,28	98785	273	2760	1080

La figure 3.5 présente les courbes du coût total en fonction du niveau de la qualité pour les deux valeurs de Δq_d. Le point de coût minimal est obtenu pour FQ_L= 93,15%, α_p = 0,2, $\Delta q_{d,y}$ = 0,02 dans le premier cas (Δq_d=0,03) et pour FQ_L = 66,54%, αp = 2%, $\Delta q_{d,y}$ = 0,03 dans le deuxième cas (Δq_d=0,3).

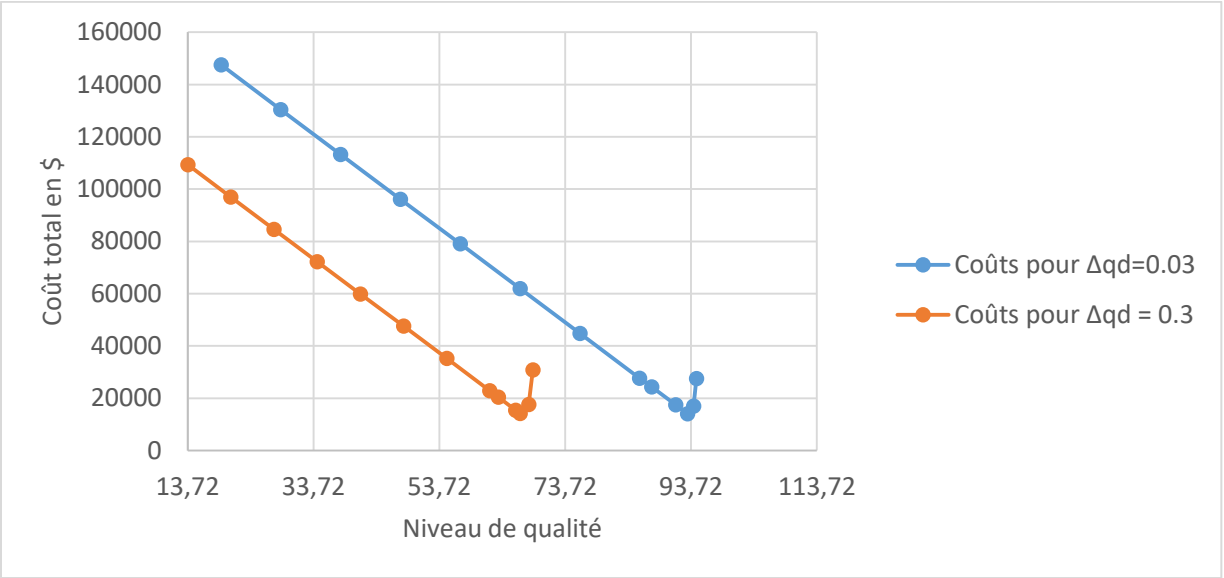


Figure 3.5. Courbe de coût total pour les deux valeurs de Δq_d

Les résultats obtenus montrent que plus la dégradation de la qualité des sites de stockage est importante, plus le niveau de la qualié FQ_L total est faible, ce qui minimise le coût total. Cela signifie que nous deverons maintenir la qualité du produit, par exemple :

- en respectant les conditions du sol, le moment de la récolte et la manipulation du produit pendant la récolte, l'évaluation et le contrôle de la qualité du produit, tout en évitant les pertes du processus, la contamination du processus entraînant une perte de qualité.
- en mettant en place des systèmes automatisés de contrôle statistique des processus permettant d'obtenir des résultats cohérents et une traçabilité de chaque lot mesuré,
- en effectuant des analyses régulières pour évaluer la qualité et les pratiques strictes en matière de sécurité des aliments.
- en considérant les taux de défaillance lors de la sélection des sites de stockage, afin d'éviter le gaspillage alimentaire et les décisions reposant uniquement sur un produit de qualité initiale supérieure conduisant à des coûts d'achat plus élevés, afin de répondre aux exigences de qualité au moindre coût.

Nous pouvons également investir davantage dans les activités de prévention, notamment le coût variable de la mauvaise qualité après un processus de stockage défaillant et les coûts de défaillance interne générés par BP et BPCG. Lors de la sélection des sites de stockage, il est également important de tenir en compte le taux de défaillance afin d'éviter le gaspillage alimentaire et de respecter les exigences de qualité au moindre coût.

Nous concluons que la dégradation de la qualité et le taux de défaillance dans les sites de stockage ont un impact économique sur la chaîne logistique alimentaire en évitant les décisions reposant uniquement sur un produit de qualité initiale supérieure conduisant à des coûts d'achat plus élevés, et en réduisant les coûts de qualité totaux permettant d'atteindre un niveau de qualité élevé.

3.5.2.2 Etude de l'impact du facteur de coût de transport sur le coût total

Analogue à notre application précédente, nous étudions les poivrons comme produit alimentaire connu par sa grande périssabilité. Selon [GON, 1999], la méthode la plus efficace pour maintenir la qualité et contrôler la périssabilité des poivrons consiste à refroidir rapidement après la récolte, puis les stocker et les transporter à basse température. Sinon, la fermeté et la couleur des poivrons se détériorent en

quelques jours, conduisant à une dégradation de la qualité, de la durée de conservation et de la valeur marchande. La figure 3.6 présente une ligne de conditionnement du poivron.



Figure 3.6. Exemple d'une ligne de conditionnement du poivron

Nous étudions dans ce deuxième exemple d'application l'impact du coût de transport $f_{d,r,y}$ sur le coût total et le niveau de qualité atteint. Nous définissons le facteur de coût de transport par l'équation (3.35).

$$f_{d,r,y} = \gamma \times rc_y \tag{3.35}$$

Où :

$f_{d,r,y}$ est le coût du transport d'un produit par période entre le magasin de stockage et le détaillant r ;

rc_y est le coût de transport relatif ;

γ est un paramètre prenant des valeurs comprises entre 0,15 et 1.

Il est à noter que les niveaux de température utilisés dans notre modèle sont limités. C'est-à-dire qu'un seul niveau de température dans les sites de stockage et les véhicules de transport est sélectionné, et qui est défini pour le produit sélectionné. Cette limitation vient des réglementations mises au point par la plupart des pays européens et américains. A titre d'exemple, l'accord relatif aux transports internationaux de denrées périssables connu par accord **ATP**, concernant la température et les équipements nécessaires au transport de produits périssables [PAN, 2008], [RON, 2011].

La durée de vie et de la dégradation de la qualité des poivrons à différentes températures pour notre étude de cas sont résumées dans le tableau 3.4. Et nous reportons sur la figure 3.7 le coût de transport relatif calculé pour différents niveaux de température.

Tableau 3.4. Dégradation estimée de la qualité et durée de conservation des poivrons à différentes températures [RON, 2011]

Température (°C)	2	4	6	8	10
Durée de vie (jours)	34	29	24	19	14
Dégradation de qualité Δq (%)	11	13	16	20	27

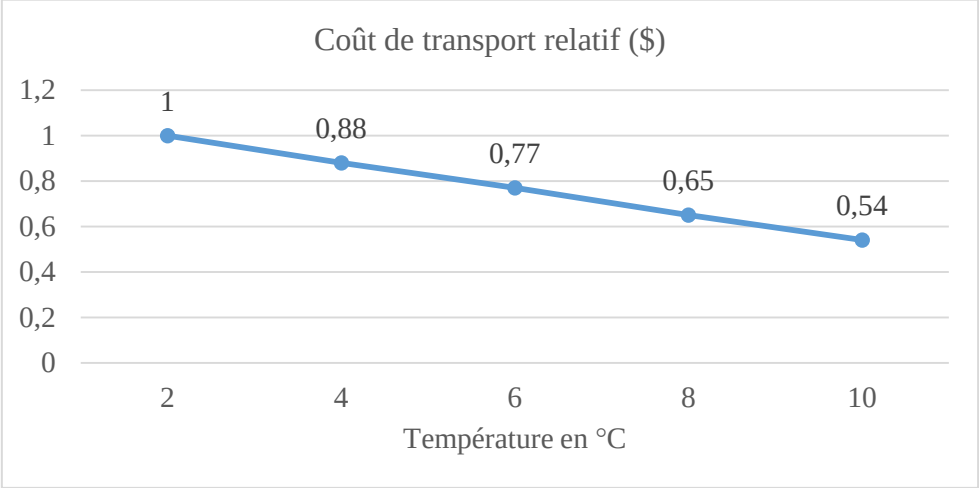


Figure 3.7. Variation du coût de transport relatif pour différents niveaux de température [RON, 2011]

Ensuite, différents scénarios sont étudiés en faisant varier le facteur du coût de transport γ. Le tableau 3.5 donne le coût total et les niveaux de la qualité optimaux pour les trois cas de γ.

Les résultats montrent clairement que pour un facteur de coût de transport réduit, nous réduisons le coût total, mais le niveau de qualité atteint par la chaîne logistique alimentaire ne change pas. De même, pour des facteurs de coûts de transport plus élevés, les résultats changent considérablement tout en maintenant le niveau de qualité requis.

Tableau 3.5. Le coût total et niveau de qualité optimal pour 3 niveaux de γ

			γ =1			**γ =0,6**			**γ =0,15**		
T°C	**Δq**(%)	**rc_y**	FQ_L	**$f_{d,r,y}$**	**Coût Total ($)**	FQ_L	**$f_{d,r,y}$**	**Coût Total ($)**	FQ_L	**$f_{d,r,y}$**	**Coût Total ($)**
2	11	1	0,84	1	29551,42	0,84	0,6	29071,42	0,84	0,15	28531,42
4	13	0,88	0,82	0,88	32829,58	0,82	0,528	32407,18	0,82	0,132	31931,98
6	16	0,77	0,79	0,77	37830,82	0,79	0,462	37461,22	0,79	0,1155	37045,42
8	20	0,65	0,76	0,65	44531,14	0,76	0,39	44219,14	0,76	0,0975	43868,14
10	27	0,54	0,69	0,54	56376,70	0,69	0,324	56117,50	0,69	0,081	55825,90

On peut observer que lorsque la température est élevée pendant le transport, le niveau de qualité diminue considérablement. Cela explique en quoi la durée de conservation des produits est affectée par les écarts de température pendant le transport et le stockage. Plus la température de stockage est basse, plus la durée de vie est longue. Il convient de noter qu'il existe une amélioration significative du coût total et de la durée de vie du produit en stockant les produits à 2 C par rapport à 8 C ou 10 C.

L'augmentation des températures de transport est le résultat d'économies réalisées sur le transport désormais plus coûteux. Le niveau de qualité requis est atteint grâce à une augmentation de la qualité initiale du produit, y compris l'augmentation des coûts de prévention et d'évaluation.

Dans la pratique, les niveaux de qualité initiaux les plus courants pour les produits alimentaires doivent varier entre 85% et 90%, ce qui signifie que les sites de production peuvent effectuer des expéditions à partir de fournisseurs en fonction de ces niveaux de qualité. En conclusion, la courbe de coût total est très similaire pour la plupart des facteurs de coût de transport, comme le montre la figure 3.7, de sorte que les coûts de transport n'ont pas d'impact considérable sur le COFQ total.

La figure 3.8 présente les courbes de coût total pour les trois valeurs de **γ**.

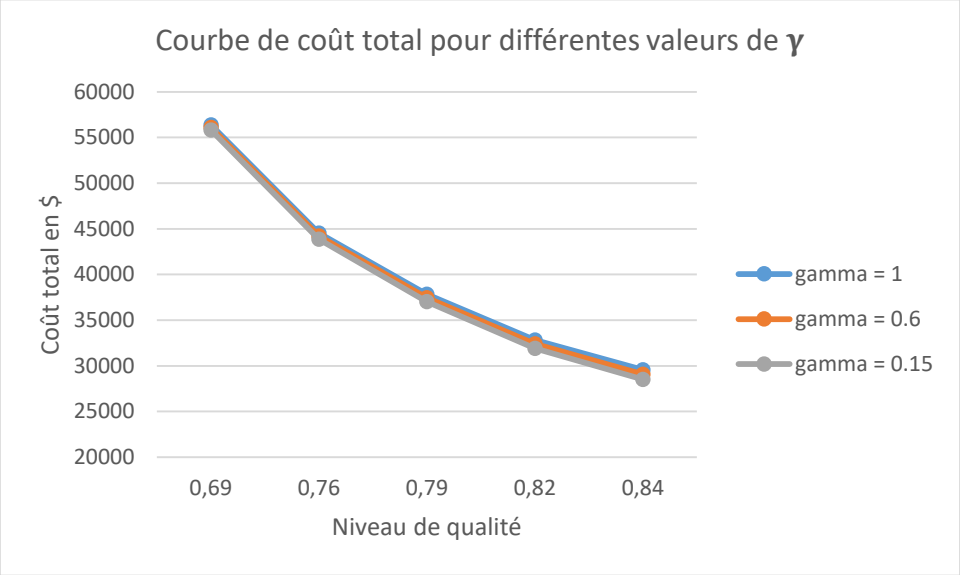


Figure 3.8. Courbes de coût total pour différentes valeurs de **γ**

Ces résultats obtenus par la méthode exacte représentent un ensemble de solutions énumérées par le solveur CPLEX dans le but de trouver la solution optimale. Certes, avec la résolution exacte on est surs d'avoir la solution optimale. Cependant, cette méthode présente des limitations. En effet, le temps d'exécution reste prohibitif, de plus, l'usage des méthodes exactes ne pourra pas fournir des solutions optimales en un temps polynomial pour des problèmes de grandes tailles issues des situations réelles. D'où notre intérêt à utiliser des méthodes approchées qui sont généralement employées lorsque les méthodes exactes échouent. Les méthodes approchées permettent de trouver une bonne solution dans un temps raisonnable. Dans la partie suivante, on s'intéressera à la résolution approchée de notre modèle FSC-COQ.

3.6 Résolution approchée du modèle FSC-COQ par les algorithmes génétiques

3.6.1 Pseudo code AG

Le pseudo code de l'algorithme génétique développé pour notre modèle FSC-COQ est donné dans l'algorithme 3.1. Nous considérons les notations suivantes pour les opérateurs génétiques : Pop_size: taille de la population, Max_iter: nombre maximales d'itérations, Pc: probabilité de croisement, Pm: probabilité de mutation.

Algorithme 3.1. Algorithme génétique pour le modèle FSC-COQ

Etape 1. Définir les valeurs initiales des paramètres utilisés pour générer les instances GA, Pop_size, Pc, Pm et Max_iter ;

Etape 2. Générer une population initiale de chromosomes qui représente une solution réalisable ;

Etape 3. Calculer la fonction fitness 'COFQ' pour évaluer chaque chromosome de la population actuelle ;

Etape 4. Sélectionner la meilleure forme des variables de décision de la population actuelle via la sélection stochastique du reste sans remplacement ;

Etape 5. *Tant que* Max_iter n'est pas atteint, démarrer la reproduction ;

Etape 6. *pour* j < Pop_size:

Sélectionner au hasard une séquence of P (N)

si random_value1 < Pc :

Appliquer le croisement standard et produire deux enfants ;

si random_value2 < Pm :

Appliquer la mutation ;

Copier l'ascendant obtenu dans la nouvelle population ;

Évaluation des fonctions objectifs de tous les chromosomes de la nouvelle population, retour à l'étape 3

Etape 7. Incrémenter j jusqu'au respect des critères d'arrêt : Max_iter et nombre maximum d'itérations sans amélioration ;

Etape 8. Fin tant que.

3.6.2 Calibrage des paramètres par le plan de Taguchi

La qualité et l'efficacité des approches d'optimisation et du processus de convergence des AG dépendent des choix spécifiques et des combinaisons de valeurs de paramètres d'opérateurs génétiques. La méthode Taguchi est un outil puissant pour la conception de systèmes de haute qualité. Il a d'abord été mis au point par un expert japonais du contrôle de la qualité nommé Genechi Taguchi dans les années 1960, [SUR, 2009]. Cette approche est basée sur des conceptions optimales fournissant le maximum d'informations avec un minimum de tests et explorant les facteurs influençant la moyenne et la variance. De plus, cet outil, connu pour sa robustesse, permet de minimiser l'impact du facteur de bruit qui ne peut pas être contrôlé par les concepteurs et de trouver le meilleur niveau de facteurs contrôlables, et ce, en utilisant beaucoup de notions dont le facteur contrôlé, table orthogonale, facteur de bruit, rapport signal sur bruit, etc. L'idée principale de cette méthodologie est de rechercher les facteurs et les niveaux et d'obtenir la combinaison appropriée de ces facteurs et de ces niveaux par la méthode de conception des expériences.

Pour résoudre ce problème, la méthode de Taguchi utilise une fonction de perte de qualité pour calculer l'écart entre la valeur expérimentale et la valeur attendue. Cette fonction de perte peut être transformée en un rapport signal sur bruit (S / N). Taguchi recommande d'utiliser le rapport signal sur bruit pour mesurer les caractéristiques de qualité s'écartant des valeurs souhaitées. En règle générale, l'analyse du rapport signal sur bruit comporte trois catégories de caractéristiques de qualité, à savoir : préférer le plus petit, préférer le plus grand et préférer le nominal. Le rapport signal sur bruit pour chaque niveau de

paramètres de processus est calculé sur la base de l'analyse de rapport signal sur bruit. Comme notre étude porte sur une minimisation de coût, un rapport S / N plus faible correspond à une meilleure caractéristique de qualité, ce rapport est mesuré comme suit :

$$\frac{S}{N} = -10\, Log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{3.36}$$

Où, n représente le nombre d'observations et y représente la variable réponse. Concernant notre approche d'optimisation, les facteurs de contrôle critiques qu'on doit paramétrer sont au nombre de 5, dont la taille de la population, le nombre maximum d'itérations, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation, et la pénalité attribuée à chaque mauvais individu. Pour cette étude, 27 séries d'expériences ont été réalisées en fonction de la distribution de la table orthogonale et trois niveaux ont été attribués à chaque facteur, comme indiqué dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Niveaux considérés pour chaque facteur de l'AG

Facteurs	Niveau (1)	Niveau (2)	Niveau (3)
Popsize	20	50	100
Max_iter	100	150	200
Pc	0,2	0,4	0,7
Pm	0,1	0,4	0,7
Penalité	5000	6500	8000

La figure 3.9 présente le graphique des principaux effets créés sur Minitab 19 en traçant la moyenne des caractéristiques pour chaque niveau de facteur.

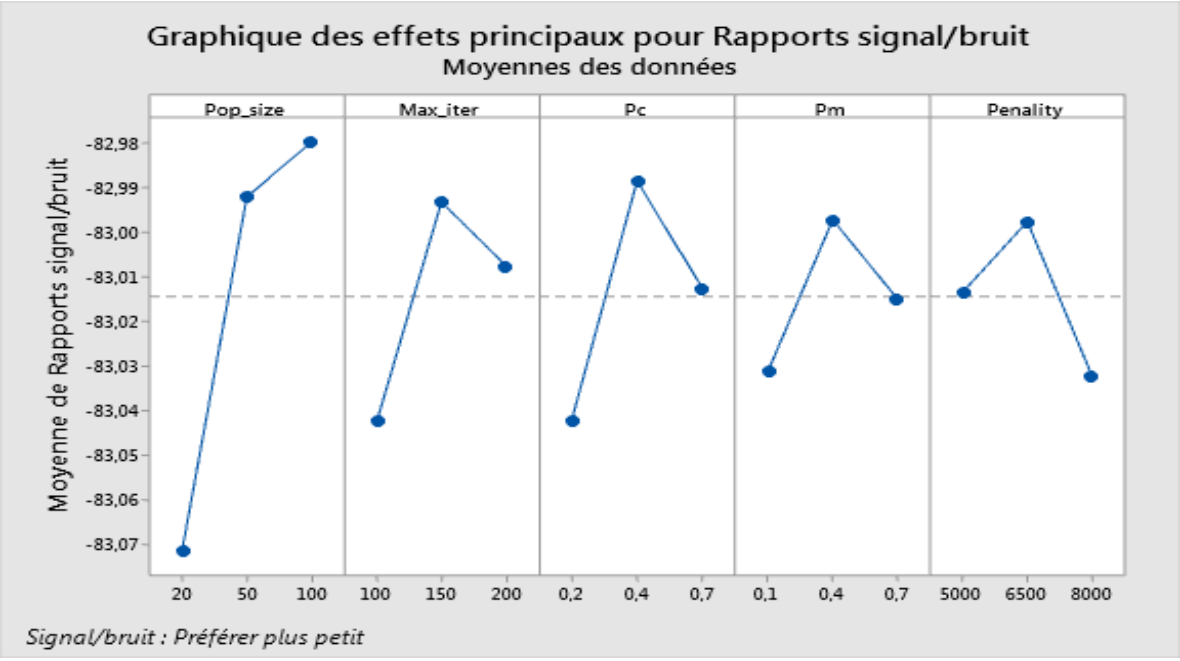


Figure 3.9. Graphique des principaux effets pour le rapport S / N pour AG

De plus, en ce qui concerne l'étalonnage de la démarche d'optimisation, les quatre facteurs mentionnés doivent être ajustés, tels que : la taille de la population = 100, le nombre d'itérations = 150, la probabilité de mutation = 0,4 et la probabilité de croisement = 0,4. Comme indiqué dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7. Paramètres optimaux de l'AG

Méthode	Pop_size	Max_iter	Pc	Pm	Penalty
AG (FSC-COQ)	100	150	0,4	0,4	6500

3.6.3 Résultats numériques obtenus par les AGs

Nous rapportons dans les tableaux 3.8 et 3.9 ci-dessous, les résultats numériques obtenus par l'application des Algorithmes Génétiques, pour le premier exemple numérique qui étudie l'impact de la dégradation de qualité au niveau des sites de stockage Δq_d sur le coût total. Il est à noter que L'AG proposé pour ce problème était codé en Python 3.4.1 et tous les tests ont été effectués sur un PC Intel® core ™ i5 à 1,70 GHz avec 4 Go de RAM.

Tableau 3.8. Coût total ($) pour Δq_d**=0,03**

FQL	$\Delta q_{d,y}$	Coût total (AG)	Moyenne
0,948	0,005	29664,48 30087,90 29712,86	**29821.75**
0,94	0,01	17034,68 17026,13 17069,68	**17043.50**
0,93	0,02	14084,76 14102,46 14090,47	**14092,56**
0,92	0,04	17457,21 17448,44 17461,04	**17455,56**
0,87	0,08	24591,39 24532,41 24658,90	**24594,23**
0.85	0.1	28839.59 27838,11 29406,22	**28694.64**
0.76	0.2	45151,49 44889,32 47332,25	**45791.02**
0.67	0.3	62103,56 62663,78 66092,43	**63619.92**
0.57	0.4	79548,01 79402,84 79539,05	**79496.63**
0,48	0,5	96782,63 96346,39 96778,72	**96635.91**
0,38	0,6	114005,17 113905,88 113460,70	**113790,58**
0,28	0,7	135336,21 138644,02 131416,93	**135132,38**
0,192	0,8	152622,27 149945,01 147660,82	**150076.03**

Tableau 3.9. Coût total ($) pour Δq_d=0,3

FQL	$\Delta q_{d,y}$	Coût total (AG)	Moyenne
0,7	0,005	27155,10 27505,51 27721,95	**27460.85**
0,68	0,01	17843,73 18365,79 17843,13	**18017,55**
0,66	0,03	14412,59 14287,33 14315,41	**14338.44**
0,65	0,04	15484,53 15515,34 15488,42	**15496.10**
0,63	0,08	21251,56 21366,40 20779,70	**21132.55**
0,61	0,1	22953,93 23260,80 23486,56	**23233.76**
0,54	0,2	35692,88 37571,77 37156,42	**36807.02**
0,48	0,3	48503,48 48012,75 50348,76	**48258.12**
0,41	0,4	61691,93 60252,98 63909,31	61951,41
0,34	0,5	72920,59 74602,98 76535,99	**74686,52**
0,27	0,6	84703,44 84742,67 89367,42	**86271.18**
0,2	0,7	102357,45 100349,38 97320,51	**100009.11**
0,137	0,8	117366,28 117178,81 114568,45	**116371.18**

Nous rapportons sur le tableau 3.10 les résultats obtenus par les Algorithmes Génétiques pour étudier l'impact du facteur de cout de transport.

Tableau 3.10. Le coût total obtenu par les AGs pour 3 niveaux de γ

			γ =1		**γ =0,6**		**γ =0,15**	
T°C	**Δq**(%)	**rc_y**	$f_{d,r,y}$	Coût Total	$f_{d,r,y}$	Coût Total	$f_{d,r,y}$	Coût Total
2	11	1	1	30313,76	0,6	30078,02	0,15	29057,65
4	13	0,88	0,88	33637,76	0,528	32791,60	0,132	32344,87
6	16	0,77	0,77	37974,13	0,462	37691,86	0,1155	37093,51
8	20	0,65	0,65	45445,24	0,39	44636,62	0,0975	44616,83
10	27	0,54	0,54	58544,32	0,324	57310,13	0,081	57075,80

On peut conclure de la même manière que le tableau 3.5, que le niveau de qualité diminue au fur et à mesure que température pendant le transport augmente. Aussi, la durée de conservation des produits pendant le transport et le stockage affecte la qualité des produits alimentaires. Plus la durée de conservation et la température de stockage sont basses, plus la durée de vie est longue.

3.7 Comparaison des solutions

3.6.4.1 Comparaison des solutions par temps d'exécution

Dans cette section, nous illustrons cette approche de modélisation en utilisant un petit exemple comportant trois sites de production, trois sites de stockage et trois véhicules de transport. L'instance de problème résultante a 30 contraintes et 18 variables de décision. Comme décrit dans la section procédure de solution, nous utilisons à la fois le solveur standard CPLEX 12.6 et l'algorithme AG pour résoudre cette petite instance. De plus, nous étudions une instance de test plus grande avec diverses tailles de réseau, comme indiqué dans le tableau 3.11, afin de démontrer que la procédure AG développée est en mesure de gérer les compromis entre toutes les catégories de coûts. Nous notons que plus la taille de la population est importante, plus le temps de calcul est long. Pour résoudre le petit exemple, nous fixons une limite de 4 heures pour le temps de résolution du solveur CPLEX.

Tableau 3.11. Tests du problème étudié

Test N°	Taille du problème |P|×|D|×|Y|	Nombre de contraintes	Nombre de variables de décision
1	3 × 3 × 3	30	18
2	5 × 5 × 5	44	28
3	10 × 10 × 10	79	53
4	15 × 15 × 15	114	78
5	20 × 20 × 20	149	103
6	25 × 25 × 25	184	128

Nous démontrons dans cette section la performance de l'algorithme génétique comparé au CPLEX. Nous mesurons les performances en fonction de la qualité de la solution et du temps de calcul, en CPU (secondes). Le tableau 3.14 indique le temps de calcul requis pour chaque procédure de solution sur différents tests du problème.

Tableau 3.12. Temps de solution de CPLEX et AG

Test N°	Temps d'exécution en CPU (s)	
	CPLEX	AG (150 itérations)
1	1,75	78,26
2	17,34	110,20
3	10 min 26	221,90
4	3h 28 min 58	282,43
5	—	387,46
6	—	532,39

Nous observons que les performances de l'AG sont meilleures, même pour des problèmes de petite taille. Le temps de calcul calculé pour la procédure AG correspond à 150 itérations, ce qui signifie que les solutions sont générées extrêmement rapidement. D'autre part, CPLEX nécessite un temps de calcul important, même pour une seule itération, car il ne peut plus résoudre les problèmes de grande taille. Nous concluons que les gestionnaires devraient utiliser l'AG pour les problèmes de taille réelle nécessitant moins de temps de calcul. Ensuite, nous comparons la qualité des solutions de la procédure basée sur AG et de CPLEX. Pour cela, nous étudions les écarts moyens entre AG et CPLEX selon les deux exemples numériques traités précédemment.

3.6.4.2 Comparaison des solutions par GAP

Le GAP est l'écart obtenu par la méthode AG, qui est le pourcentage de déviation du coût obtenu par la méthode approchée relative au coût minimal obtenu par le solveur CPLEX. Le GAP concernant la méthode de résolution utilisée est calculé de la manière suivante :

$$\text{GAP}= [(\text{Résultat AG-Résultat solveur})/\text{Résultat solveur}]*100 \quad (3.37)$$

Nous rapportons ci-après le calcul du GAP pour les deux études de cas précédents :

L'application de l'équation (3.37) nous permet d'avoir les résultats reportés sur les tableaux 3.13 et (3.14) suivants :

Tableau 3.13. Calcul du GAP pour Δq_d=0,03

QL	Résultat CPLEX	Résultat AG	Gap (%)
0,948	29622,84	29821,75	**0,67**
0,94	16993,48	17043,50	**0,29**
0,93	14031,70	14092,56	**0,43**
0,92	17453,86	17455,56	**0,009**
0,87	24298,18	24594,23	**1,21**
0,85	27720,34	28694,64	**3,5**
0,76	44831,14	45791,02	**2,14**
0,67	61941,94	63619,92	**2,7**
0,57	79052,74	79496,63	**0,56**
0,48	96163,54	96635,91	**0,49**
0,38	113274,34	113790,58	**0,45**
0,28	130385,14	135132,38	**3,64**
0,192	147495,94	150076,03	**1,74**
GAP Moyen			**1,37**

Tableau 3.14. Calcul du GAP pour Δq_d=0,3

QL	Résultat CPLEX	Résultat AG	Gap (%)
0,7	26663,47	27460,85	**2,99**
0,68	17680,65	18017,55	**1,9**
0,66	14230,12	14338,44	**0,76**
0,65	14464,921	15496,10	**0,2**
0,63	20404,12	21132,55	**3,5**
0,61	22873,72	23233,76	**1,57**
0,54	35221,72	36807,02	**4,5**
0,48	47569,72	48258,12	**1,44**
0,41	59917,72	61951,41	**3,39**
0,34	72265,72	74686,52	**3,34**
0,27	84613,72	86271,18	**1,95**
0,2	96961,72	100009,11	**3,14**
0,137	109309,72	116371,18	**6,46**
GAP Moyen			**2,71**

D'après les résultats obtenus, les écarts moyens entre AG et CPLEX sont de 1,37% et 2,71% pour Δq_d= 0, 03 et Δq_d= 0, 3 respectivement. Sachant que le GAP doit tendre vers zéro, ce qui traduit l'efficacité du programme AG développé comparé au solveur, cela signifie que les performances de AG sont meilleures lorsque la valeur de Δq_d est plus petite.

Nous présentons dans le tableau 3.15 le GAP moyen obtenu par la méthode AG relativement au solveur CPLEX pour différentes valeurs de γ

Tableau 3.15. Performance d'AG contre CPLEX pour différentes valeurs de γ

		Coût total ($)		
γ	**T°C**	CPLEX	AG	Gap (%)
1	2	29551,42	30313,76	2,58
	4	32829,58	33637,76	2,46
	6	37830,82	37974,13	0,38
	8	44531,14	45445,24	2,05
	10	56376,70	58544,32	3,84
GAP Moyen				**2,26**
0,6	2	29071,42	30078,02	3,46
	4	32407,18	32791,60	1,19
	6	37461,22	37691,86	0,62
	8	44219,14	44636,62	0,94
	10	56117,50	57310,13	2,13
GAP Moyen				**1,77**
0,15	2	28531,42	29057,65	1,84
	4	31931,98	32344,87	1,29
	6	37045,42	37093,51	0,13
	8	43868,14	44616,83	1,71
	10	55825,90	57075,80	2,24
GAP Moyen				**1,5**

D'après les résultats trouvés, l'écart moyen varie proportionnellement au facteur de coût de transport γ. Plus le chiffre est bas, plus le GAP moyen est petit. Ceci est dû à la réduction du coût total pour un facteur de coût de transport réduit, tout en maintenant le niveau de qualité atteint par la chaîne logistique alimentaire. Nous concluons que les performances de l'AG sont meilleures lorsque γ est plus petit. Et selon les résultats obtenus dans les tableaux précédents, qui démontrent que les solutions sont générées très rapidement avec AG, nous concluons que l'AG convient donc à l'intégration dans des systèmes d'aide à la décision.

3.8 Conclusion

Dans cet article, nous avons développé un modèle d'optimisation de la chaîne logistique alimentaire, en particulier pour les fruits et légumes frais. Le modèle est un problème de MINLP qui montre à quel point la gestion FSC est importante pour maintenir la qualité et la sécurité des produits alimentaires et comment un stockage à la température optimale réduit les déchets en prolongeant la durée de vie des produits. La première partie du chapitre a porté sur une résolution exacte à travers la méthode de séparation et d'évaluation (B&B) intégrée dans le solveur CPLEX. Tandis que dans la deuxième partie, nous avons rapporté les résultats obtenus par la méthode approchée basée sur les Algorithmes Génétiques. La comparaison des résultats a démontré les performances de l'AG, d'une part concernant la vitesse de génération des solutions pour les problèmes de petites et grande taille, et d'autre part concernant la qualité des solutions comparé au solveur CPLEX.
Le modèle proposé fournit aux gestionnaires un outil pratique pour prendre des décisions optimisées en termes de coûts. L'optimisation par les AG s'avère très efficace pour les problèmes de taille réelle nécessitant moins de temps de calcul.
Dans le dernier chapitre qui suit, nous présentons une étude comparative de différentes stratégies de sélection des individus à chaque itération afin d'améliorer les résultats du programme AG développé.

Chapitre 4 : Etude comparative des techniques de sélection utilisées dans les AGs pour l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire étudiée

Résumé

L'optimisation classique de l'Algorithme Génétique dépend en grande partie des opérateurs de reproduction, codage ou représentation chromosomique et techniques de sélection. La sélection permet de choisir les individus aptes à se reproduire, au détriment de ceux qui se montrent notoirement inadaptés. Il existe plusieurs techniques de sélection dans la littérature. Nous présentons une étude comparative de trois techniques de sélection à savoir la méthode de tournoi, l'échantillonnage stochastique sans remplacement et la sélection de tournoi de Boltzmann afin de déterminer celle la plus convenable à donner des résultats optimaux pour notre modèle FSC-COQ. La performance de chaque méthode de sélection est étudiée à l'aide des tests statistiques t-test couplé avec l'analyse ANOVA.

Chapitre 4

Etude comparative des techniques de sélection utilisées dans les AGs pour l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire étudiée

4.1 Introduction

La sélection est la première opération d'un algorithme génétique qui a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. L'objectif de cet opérateur n'est pas de créer de nouveaux individus, mais de choisir les mieux adaptés en fonction de leur fitness ou fonction d'adaptation. Ces individus sélectionnés sont censés créer des progénitures aptes à participer aux opérations génétiques suivantes (croisement, mutation), faisant progresser la population à la prochaine génération qui devrait être de plus en plus apte, ou encore, proche de la solution optimale. C'est ainsi que la sélection joue un rôle moteur dans un algorithme génétique en orientant la recherche génétique vers les régions prometteuses dans l'espace de recherche. L'opérateur de sélection opère sur les chromosomes qui sont des codes par lesquelles chaque individu est lié à son environnement. L'idée est de permettre aux meilleurs individus de transmettre leurs gènes à la génération suivante, et d'écarter les moins adaptés, par analogie avec la théorie de l'évolution de Darwin : survie du plus apte. Tous les individus ont une chance d'être sélectionnés, mais les meilleurs individus peuvent être sélectionnés plusieurs fois en fonction de leur fitness.

Il existe plusieurs approches de sélection qui dépendent du problème considéré et de son niveau de difficulté. Le choix de la méthode de sélection la plus appropriée est une étape cruciale de l'AG. C'est à dire, il faut identifier la technique de sélection qui garantit une solution globale et qui réduit le risque de convergence prématurée vers un optimum local.

On trouve dans la littérature plusieurs études comparatives, qui visent à identifier la meilleure technique de sélection. Par exemple, [PAN, 2016] a évalué la performance des méthodes de sélection de l'algorithme génétique pour les problèmes de sécurité du réseau, pour résoudre le problème de voyageur de commerce (TSP). L'auteur a fait la comparaison de trois techniques : la sélection par rang, la sélection par roulette et la sélection de tournoi, et a effectué des tests statistiques afin de signaler l'importance des performances des techniques de sélection considérées. [RAZ, 2011] a fait une étude comparative des techniques de sélection pour le même problème de TSP. L'auteur a démontré, par le biais de plusieurs tests sur les instances de TSP, que la stratégie de sélection de tournoi dépasse les autres techniques, en donnant la meilleure qualité de solution avec des temps de calcul réduits, mais uniquement pour les problèmes de petite taille. A mesure que la taille du problème augmente, elle devient sujette à une convergence prématurée. [CHI, 2010] a fait une comparaison des performances entre différentes stratégies de sélection en Algorithme Génétique appliqué à un problème de calendrier des cours qui est un problème NP difficile. Une étude expérimentale menée par l'auteur a démontré que l'AG avec la sélection de roulette est plus efficace que les autres pour produire des calendriers horaires réalisables. [JIN, 2006] a présenté une comparaison des performances d'un algorithme génétique simple utilisant la sélection de roulette et la sélection du tournoi. L'analyse qualitative des stratégies de sélection étudiées, et les expériences numériques ont démontré que l'AG avec la sélection de tournoi converge beaucoup plus rapidement.

Ce chapitre vise à étudier la performance de différentes techniques de sélection à intégrer dans l'algorithme génétique développé dans le chapitre précédent pour le modèle FSC-COQ qui est un problème MINLP. Les problèmes du MINLP étant difficiles à résoudre en raison des contraintes de capacité et de leur nature combinatoire, les techniques évolutives sont plus pratiques. Cependant, chaque étape de ces méthodes a un impact considérable sur les performances d'optimisation. C'est pourquoi il est important de vérifier quelle technique de sélection conduit à la meilleure solution finale. Les techniques de sélection tournoi et stochastique sont comparées à la sélection de tournoi de Boltzmann en utilisant des tests statistiques tels que le t test des échantillons appariés.

4.2 Classification des stratégies de sélection

Les schémas de sélection peuvent être classés en deux grandes catégories à savoir : la sélection proportionnée et la sélection ordinale. La figure 4.1 présente une classification détaillée des schémas de sélection.

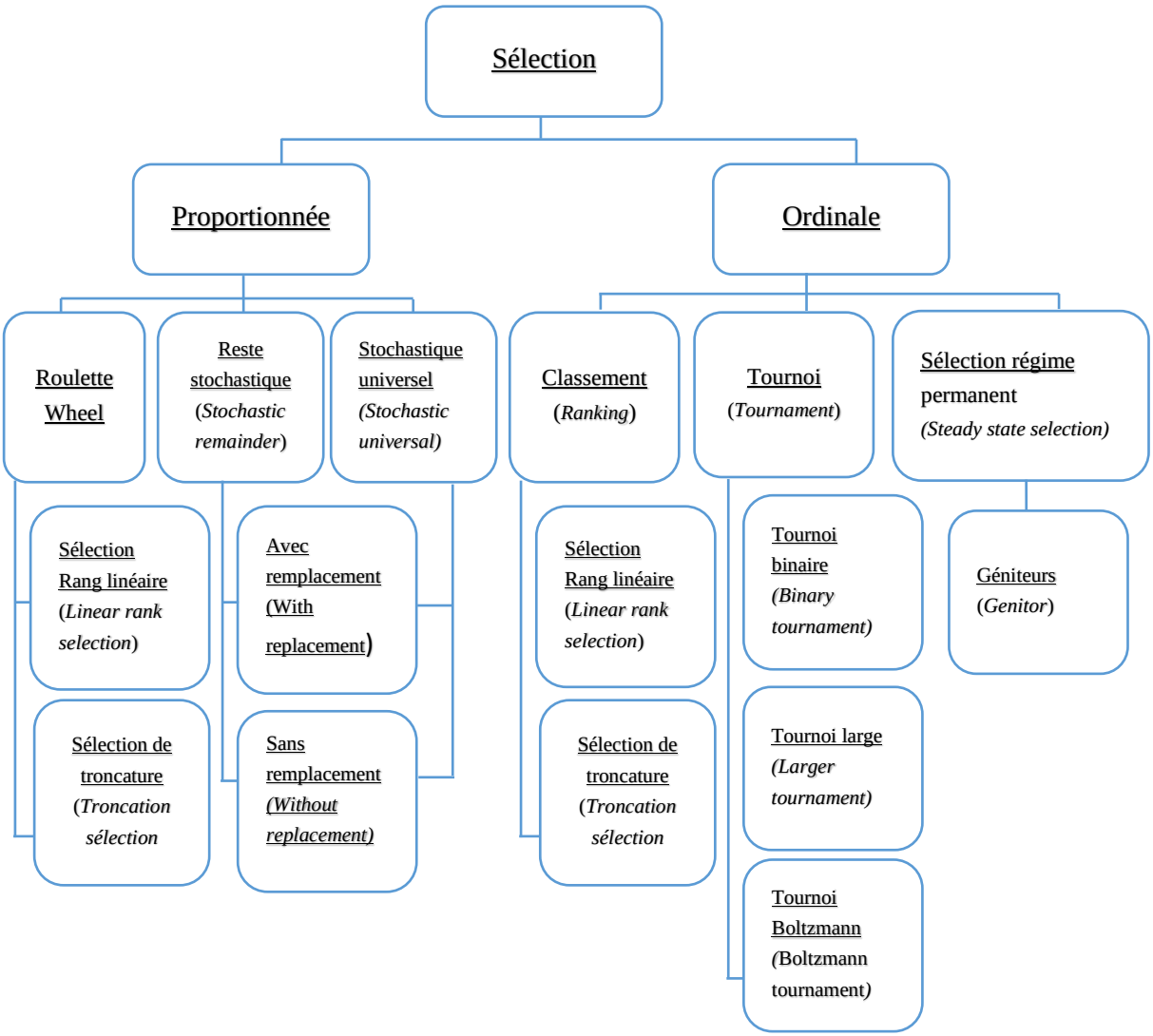


Figure 4.1. Classification des schémas de sélection

4.2.1 La sélection proportionnée :

La sélection des individus se fait sur la base de leurs valeurs de condition physique (fitness) comparée à la fitness des autres individus de la population. On trouve dans cette catégorie la sélection de roulette, sélection de reste stochastique et sélection stochastique universelle.

4.2.1.1 La sélection par roulette biaisée (roulette wheel selection)

C'est la probabilité de sélection proportionnelle à l'adaptation. Le principe de la roulette est le suivant : Pour chaque individu, la probabilité d'être sélectionné et copié dans la nouvelle population est proportionnelle à sa fitness. Plus un individu sera efficace sur la base de sa fitness, plus il se croisera avec un grand nombre d'autres individus. On utilise une roue sur laquelle on place chaque individu en fonction de son efficacité (*roulette wheel selection*). Un exemple est présenté à la figure 4.2.

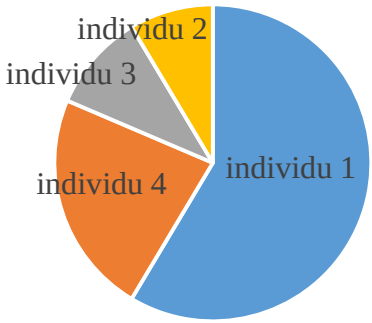


Figure 4.2. Sélection par roulette

Ainsi, la probabilité de sélection d'un chromosome particulier de fitness **g i** (**s**), dans la nouvelle population de taille N est :

$$Pi = \frac{\mathbf{g\ i}\ (\mathbf{s})}{\sum_{k=1}^{N} \mathbf{g\ k}\ (\mathbf{s})} \qquad (4.1)$$

4.2.1.2 Sélection du reste stochastique

La sélection stochastique du reste s'appuie sur le concept selon lequel la fitness de de chaque chromosome devrait se refléter dans l'incidence de ce chromosome dans le pool de reproduction. Dans La technique de sélection de reste stochastique consiste à calculer la forme physique relative d'un chromosome, qui est le rapport entre la forme physique associée à un individu et la forme physique moyenne, disons $m_i = f_i / f_{moy}$. La partie entière de m_i est utilisée pour sélectionner un parent de manière déterministe, pour le reste l'algorithme applique la sélection de roulette.

Par exemple, si la valeur de m_i d'un individu est 2.3, cet individu est sélectionné deux fois en tant que parent car la partie entière est 2. Le reste des parents sont choisis d'une manière stochastique avec une probabilité proportionnelle à la partie fractionnaire de sa valeur mise à l'échelle. Si la sélection stochastique du reste est effectuée sans remplacement, les parties fractionnaires de la valeur d'occurrence attendue sont traitées comme des probabilités. Une partie fractionnaire e_i est calculée comme suit :

$$e_i = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{s})}{\sum \boldsymbol{f(s)/popsize}} \qquad (4.2)$$

Les fractions de 'e_i' sont traitées comme des probabilités que chaque chaîne ait des copies dans les générations suivantes. .Cette méthode a deux variantes : avec remplacement et sans remplacement.

i. Sélection de reste stochastique avec remplacement

Dans le cas de la sélection stochastique des restes avec remplacement, les restes sont utilisés pour dimensionner les parties d'un processus de sélection de roulette, et dont les poids sont calculés par le biais des fractions de la valeur d'occurrence attendue. Ces derniers sont ensuite utilisés pour remplir les espaces de population restants dans le pool de reproduction. L'algorithme devient aussi complexe que la sélection par roulette.

ii. Sélection de reste stochastique sans remplacement

Dans le cas de la sélection stochastique du reste sans remplacement, les fractions des valeurs d'occurrence attendues sont traitées comme des probabilités. Les parties restantes sont remplies par une probabilité de 0.5 (lancer d'une pièce) qui détermine si le reste reçoit une autre copie ou pas. C'est une méthode améliorée de sélection de roulette.

4.2.2 Sélection ordinale

La sélection des individus se fait non sur la base de leurs valeurs de condition physique, mais sur leur rang au sein de la population, c'est-à-dire sur le classement des populations. On trouve dans cette catégorie la sélection de tournoi, sélection de troncature et sélection de classement linéaire.

4.2.2.1 Sélection par tournoi (tournament selection)

Le principe de cette technique consiste à faire une rencontre entre plusieurs paires d'individus pris au hasard de la population, puis choisir parmi ces paires l'individu celui qui a la meilleure qualité d'adaptation qui sera le vainqueur du tournoi et qui sera reproduit dans la nouvelle population (figure 4.3). La procédure est itérée jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète
Cette technique de sélection par tournoi permet aux les individus de moindre qualité de participer à l'amélioration de la population. Il y a différentes façon d'implémenter cette technique : Un individu peut participer à plusieurs tournois, plusieurs tournois peuvent être créés avec plusieurs participants, etc.

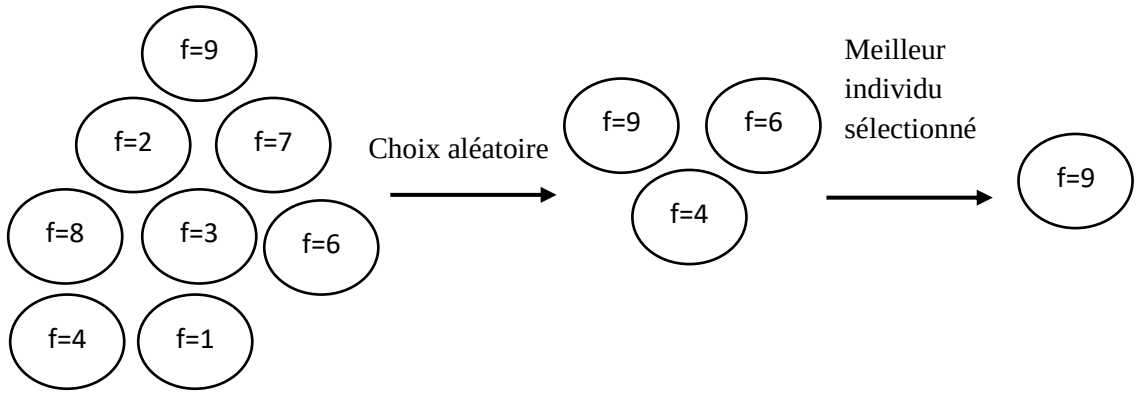


Figure 4.3. Sélection par tournoi

4.2.2.2 Sélection par rang (ranking selection)

Cette technique de sélection est une variante du système de roulette. Le principe est aussi d'implémenter une roulette, mais les secteurs de la roue sont proportionnels aux individus possédant les meilleurs scores d'adaptation. Ces individus sont triés suivant leur fitness ou fonction d'adaptation, puis un rang est attribué à chaque individu selon son classement. Les individus de bonne qualité obtiennent un grand rang, tandis que les moins bons obtiennent un rang faible. Ainsi, on finit par attribuer le rang N pour une population de taille N pour le meilleur individu en itérant sur chaque individu. L'ensemble des individus est représenté sur les secteurs de la roue, et l'angle de chaque secteur est proportionnel au rang de l'individu qu'il représente.

4.2.2.3 Sélection du tournoi Boltzmann (Boltzmann tournament selection)

La notion de distribution de Boltzmann est empruntée au recuit simulé et adaptée à la pratique de l'algorithme génétique pour échapper au problème de la convergence prématurée, asymptotique ou autre. Plus précisément, une procédure de sélection de tournoi de Boltzmann est mise en œuvre afin de donner des distributions stables au sein d'une population de structures proches de Boltzmann. Cette sélection de technique de sélection a été proposée comme alternative pour obtenir un comportement de type niché dans un schéma de tournoi [GOL, 1988]. Il était principalement utilisé dans l'algorithme de recuit simulé (SA) pour accepter ou rejeter les solutions après le processus d'exploration de voisinage. L'approche d'optimisation SA a été introduite pour la première fois par Kirkpatrick [KIR, 1983] et Cerny [CER, 1985].

Dans la sélection de Boltzmann, la température qui contrôle le taux de sélection diminue progressivement et la pression de sélection augmente car elle est inversement proportionnelle à la température. Au départ, la température est élevée et la pression de sélection est basse. La température diminue progressivement et la pression de sélection augmente. Cela se traduit par une réduction de l'espace de recherche tout en maintenant la diversité de la population. Le tournoi Boltzmann vise à trouver un optimum global. La sélection d'un individu est faite avec la probabilité de Boltzmann qui est donnée par l'équation (4.3) :

$$P(\Delta E) = e^{-(s_i - s_j)/T} \qquad (4.3)$$

Où ΔE est la différence d'énergie entre deux valeurs (Si et, Sj) de la fonction d'objectif (aptitude en GA) et le niveau de la température actuelle, P (ΔE) est la probabilité d'acceptation et T est le niveau de température. Le signe moins dans l'exposant est nécessaire car une minimisation est effectuée. De même, aux propriétés thermodynamiques où la possibilité de changer entre deux états d'énergie est très élevée à des températures élevées. Avec la méthode de sélection de Boltzmann, l'acceptation de mauvaises solutions à haute température peut être considérée comme un nombre proche de un. Néanmoins, lorsque le système est refroidi, cette probabilité diminue à zéro [AAR, 1988].

4.3 Évaluation des stratégies de sélection de l'algorithme AG appliqué au modèle FSC-COQ

Dans cette section, nous étudions la performance de l'AG avec deux stratégies de sélection pour résoudre le modèle FSC-COQ, dans lesquelles notre objectif est de trouver le niveau de qualité optimal qui minimise le coût total. Dans ce qui précède, nous avons utilisé la technique stochastique dans la phase de sélection. Choisir une bonne technique de sélection est une étape très critique de l'AG. En effet, s'il n'est pas choisi correctement, il peut conduire à une convergence de la solution vers un optimum local.

Dans notre étude, nous comparons dans un premier temps la sélection de tournoi et l'échantillonnage stochastique sans remplacement sur la base du mode de fonctionnement de chaque technique présenté dans la section précédente.

4.3.3.1 Sélection Tournoi appliquée au modèle FSC-COQ

i. Pseudo code

Comme déjà évoqué dans la section précédente, la sélection tournoi est la méthode la plus populaire de sélection en algorithme génétique, en raison de son efficacité, sa facilité d'implication et d'autres avantages qui incluent une gestion de temps efficace.
Nous rapportons ci-après le pseudo code de la sélection tournoi, hybridé avec l'algorithme génétique développé pour notre modèle FSC-COQ dans le chapitre précédent :

Algorithme 4.1. Procédure de la sélection de Tournoi

Définir les valeurs initiales des paramètres Pop_size, Pc, Pm and Max_iter.

Définir le paramètre t de la méthode tournoi

Etape 4 de l'algorithme 3.1

Tant que j<t

Commencez par choisir des individus aléatoires dans Pop_size

Calculer la valeur fitness de ces individus

Sélectionner le meilleur et stocker dans de nouveaux vecteurs

Boucle jusqu'à ce que tous les vecteurs soit remplis

ii. Calibrage des paramètres

L'étalonnage des paramètres de sélection du tournoi est effectué selon la technique de Taguchi avec les mêmes paramètres que l'algorithme génétique présenté précédemment. De même, 27 séries d'expériences ont été réalisées en fonction de la distribution du tableau orthogonal et trois niveaux ont été attribués à chaque facteur, comme indiqué dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Niveaux considérés pour chaque facteur de la sélection du tournoi

Facteurs	Niveau (1)	Niveau (2)	Niveau (3)
Pop_size	20	50	100
Max_iter	100	150	200
Pc	0.2	0.4	0,7
Pm	0,1	0,4	0,7
Penalité	5000	6500	8000
T	5	10	15
S	2	5	10

La figure 4.4 montre le graphique des principaux effets créés sur Minitab en traçant la moyenne des caractéristiques pour chaque niveau de facteur :

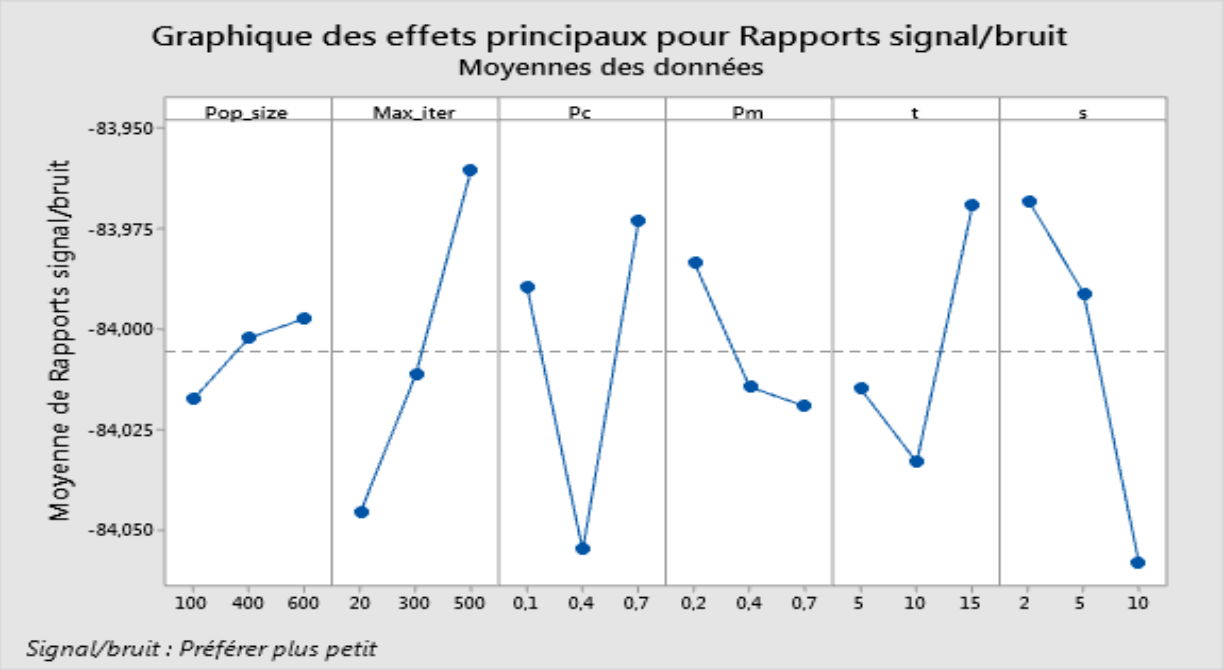


Figure 4.4. Graphique des principaux effets du rapport signal/bruit de la sélection tournoi

Le tableau 4.2 récapitule les niveaux sélectionnés de chaque facteur pour contrôler et optimiser la technique de sélection du tournoi :

Tableau 4.2. Paramètres optimaux de la sélection du tournoi

Méthodologie	Pop_size	Max_iter	Pc	Pm	t	s
Sélection Tournoi	600	500	0,7	0,2	15	2

4.3.3.2 Sélection stochastique appliquée au modèle FSC-COQ

i. Pseudo code

Il est à noter que la sélection du reste stochastique sans remplacement est une méthode améliorée de sélection de roulette. Le pseudo code de cette technique est donné par l'algorithme 4.1.

Algorithme 4.2. Procédure de la sélection stochastique sans remplacement

Initialiser les paramètres pop_size, max_iter, Pc, Pm

Pour chaque élément i, calculer le ratio r_i de sa fonction fitness par rapport à la fitness moyenne

Soit e (r_i) la partie entière de r_i, chaque élément est reproduit e (r_i) fois

La sélection de roulette décrite ci-dessus est appliquée aux individus de fitness r_i - e(r_i)

Répéter jusqu'à ce que tous les vecteurs soient remplis pour respecter la taille pop_size

4.3.3.3 Sélection Boltzman appliquée au modèle FSC-COQ

i. Pseudo code

Algorithme 4.3. Procédure de la sélection de Boltzman

Initialiser les paramètres Pop_size, Pc, Pm , Max_iter, Temp, cool_rate..

Tant que cool_iteration<= max_iteration

Cool_iteration= cool_iteration+1

Temp_iteration=0

Tant que temp_iteration<=nrep

Temp_iteration=temp_iteration+1

Sélectionner un nouveau point du voisinage

Calculer fitness (à partir de ce point)

δ = obj_actuel - obj_précédent

Si δ <0, accepter voisinage

Sinon, accepter avec probabilité exp(-δ/T)

Fin tant que

T = $\alpha * T$ $(0 < \alpha < 1)$

Fin tant que

ii. Paramétrage de la technique Boltzman

Dans le tableau 4.3, nous reportons les paramètres d'entrée utilisées pour effectuer la sélection de Boltzman :

Tableau 4.3. Paramètres d'entrée de la sélection de Boltzman

Paramètres du programme	**Valeurs**
Population size (pop size)	120-200-300
Crossover probability	0,7
Mutation probability	0.2
Penalty cost	5000$
Maximum iteration	100
Temperature	1750
Cool rate	0.9

4.4 Test statistique de Student ou t test

Le test de **Student** ou t test est l'un des tests statistiques les plus utilisés pour comparer les moyennes de deux échantillons indépendants ou appariés. Selon [FAI, 2012], le test t permet d'extrapoler les constatations faites à un ensemble plus vaste (taille>30) et permet de tester des hypothèses sur cet ensemble ainsi que de prendre des décisions. Le test statistique permet de trancher entre deux hypothèses appelées : l'hypothèse nulle (H0), et l'hypothèse alternative (Ha), dont une seule qui est vraie, et donc prendre la décision de retenir soit H0 ou Ha.

D'après [FAI, 2012], ce test permet de comparer :

- Une moyenne d'un échantillon à une valeur donnée
- Les moyennes de deux échantillons indépendants
- Les moyennes de deux échantillons appariés.

Pour notre étude, il s'agit de comparer les stratégies de sélection par paires.

Généralement, l'application de ce test est soumise à deux conditions qui sont la normalité (figure 4.5) et le caractère aléatoire et simple des échantillons.

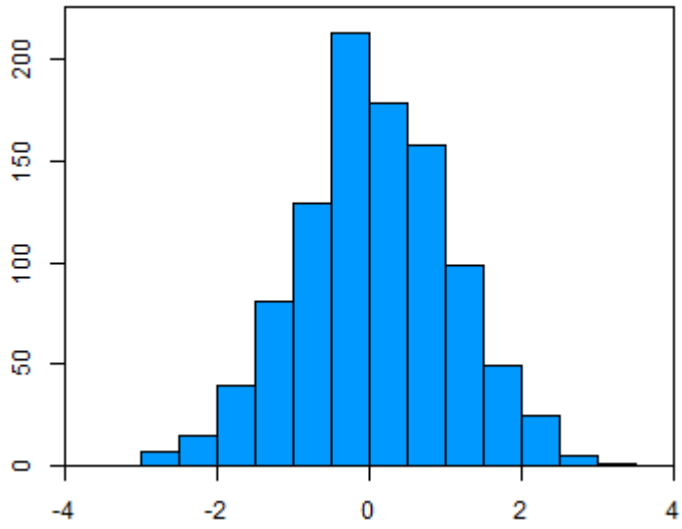


Figure 4.5. Histogramme d'une variable approximativement normalement distribuée

Le test de Student pour l'échantillonnage apparié sert à comparer les moyennes de deux populations, dont chaque élément de l'une des populations est mis en relation avec un élément de l'autre.
Généralement, la procédure pour un test t d'échantillons appariés est résumée en quatre étapes :
1) Calculer la moyenne, 2) Calculer l'écart type, 3) Calculer la statistique de test de Student, et 4) Calculer la probabilité d'observer la statistique de test sous l'hypothèse nulle. Cette valeur est obtenue en comparant la statistique de test t, à une distribution t avec (n - 1) degrés de liberté : $p = Pr(T > |t|)$
Cela peut être fait en recherchant la valeur dans un tableau (voir annexe), qu'on peut trouver dans de nombreux manuels de statistiques, ou à l'aide d'un logiciel statistique.
L'interprétation des résultats d'un t test du point de vue statistique est déterminée en examinant la probabilité d'observer les résultats du test sous l'hypothèse nulle. Une faible valeur de cette probabilité p implique une faible probabilité d'obtenir un résultat comme celui qui a été observé si l'hypothèse nulle était vraie, et donc une diminution de la prise en compte de l'hypothèse nulle. La valeur seuil pour déterminer la signification statistique est décidée par le chercheur, mais généralement une valeur de 0,05 ou moins est choisie. Cela correspond à une chance de 5% (ou moins) d'obtenir un résultat comme celui qui a été observé si l'hypothèse nulle était vraie.

Le t test des échantillons appariés est largement utilisé dans la recherche scientifique afin de déterminer si la différence moyenne entre deux ensembles d'observations est nulle. Par exemple [PAN, 2016] a fait appel aux tests statistiques de Student pour comparer la performance des différentes techniques de sélection considérées, afin de résoudre le problème du voyageur de commerce. [IBR, 2019] a effectué le t test apparié pour deux algorithmes : L'algorithme mimétique évolutif adaptatif multi-objectif (MAMOT) et l'algorithme génétique multi-objectif basé sur un réseau de rétro propagation à trois termes (MOGAT), afin de tester la différence de précision et la complexité du modèle, respectivement. L'hypothèse nulle est qu'il n'y a pas de différence entre la précision moyenne de MAMOT par rapport à MOGAT. Les résultats du test t apparié montrent que la valeur p du t test est inférieure au niveau de signification (0,05), ce qui implique le rejet de l'hypothèse nulle et donc l'auteur a conclu que MAMOT était significativement meilleur que MOGAT. [ZAK, 2019] a développé un modèle hybride de prévision de la volatilité des prix du cuivre qui combine le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) et l'algorithme génétique (GA). L'auteur a utilisé le t test des échantillons appariés et le test de somme de rang de Wilcoxon, pour identifier toute différence significative entre les valeurs réelles et les résultats prévus de GA basés sur un intervalle de confiance de 95%, où l'hypothèse nulle représente : la différence entre la moyenne des valeurs actuelles et la moyenne prévue des valeurs du modèle est nulle. La comparaison des résultats du t test des échantillons appariés indiquent que l'hypothèse nulle peut être rejetée à la signification de 0,05 ce qui confirme en outre les performances supérieures du modèle proposé.

Le test t apparié est probablement le test le plus largement utilisé aussi en recherche clinique pour les comparaisons statistique des résultats des groupes expérimentaux et témoins. Par exemple, [WON, 2016] a utilisé le test de Student pour variables continues à variance inégale afin de déterminer la différence entre le nombre moyen de colonies aérobies avant et après nettoyage manuel et désinfection UVC. [KAL, 2009] a également effectué un t test pour déterminer les prédicteurs du développement d'une récidive d'uvéite. L'analyse a été effectuée en utilisant SPSS version 15 avec un intervalle de confiance de 5%. Grace au t test, l'auteur a pu faire des conclusions concernant le rôle certain de la thérapie antituberculeuse dans la tuberculose latente avec uvéite suite à une étude rétrospective de 51 enregistrements de patients atteints d'uvéite et un minimum de 1 an de suivi. [ALE, 2011] a utilisé un test t de Student bilatéral non apparié en utilisant GraphPad Prism 5, pour calculer la signification statistique (p-values) des résultats, afin de sélectionner les paramètres optimaux pour faire la distinction entre les cas d'infection latente et les cas de maladie active.

4.5 Résultats et discussion

Pour étudier la performance des stratégies de sélection présentées ci-dessus, nous procédons à cette étape par un processus expérimental et en collectant les résultats afin de réaliser une analyse comparative. Le problème de la chaîne logistique alimentaire, tel que présenté dans la section précédente, est optimisé à l'aide de la méthode d'optimisation GA développée dans le code Python 3.6 et exécutée sur un système d'exploitation Windows 8 64 bits, 4 Go de RAM, processeur Intel Core i5 à 2,5 GHz. Nous proposons d'abord une étude comparative basée sur la convergence des méthodes de sélection, suivie par une étude statistique basée sur le t test.

4.5.1 vitesse de convergence

Dans un premier temps, nous calculons les meilleurs résultats obtenus pour 13 niveaux de qualité et pour différentes tailles du problème (3, 5 et 10), avec les deux techniques de sélection : sélection par tournoi, et sélection stochastique. Les résultats sont reportés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4. Résultats de la meilleure solution pour les problèmes de taille 3, 5 et 10

	Taille = 3		**Taille = 5**		**Taille = 10**	
QI	Stochastique	Tournoi	Stochastique	Tournoi	Stochastique	Tournoi
0,96	27546	27936	29151	29073	30131	29105
0,94	20266	20428	20356	18546	20665	20275
0,93	15754	15741	15804	15741	16089	15746
0,92	17485	17470	17520	17470	17835	17470
0,88	24384	24384	24465	24384	25364	24392
0,86	24477	27842	27929	27847	28645	27842
0,76	34480	45129	45317	45163	47465	45129
0,67	54481	62416	62502	62416	64494	62416
0,57	81261	79703	79724	79703	84800	79703
0,48	98461	96991	97056	96991	102564	96991
0,38	115754	114278	114371	114278	117431	114312
0,28	133085	131565	131677	131567	139481	131565
0,19	150331	148852	148873	148852	155309	148852

Il est clairement démontré que, pour les problèmes de petite taille, l'AG avec sélection stochastique offre la qualité de solution la plus élevée (c'est-à-dire un coût total minimum) pour la plupart des niveaux de qualité testés. Pour les problèmes de grande taille, la technique du tournoi est en mesure d'atteindre une solution optimale pour tous les niveaux de qualité testés. Cependant, à mesure que la taille des problèmes de test augmente, la qualité de la solution diminue.

Nous reportons sur la figure 4.5 ci-après, la déviation calculée pour les deux méthodes, par rapport à la solution optimale :

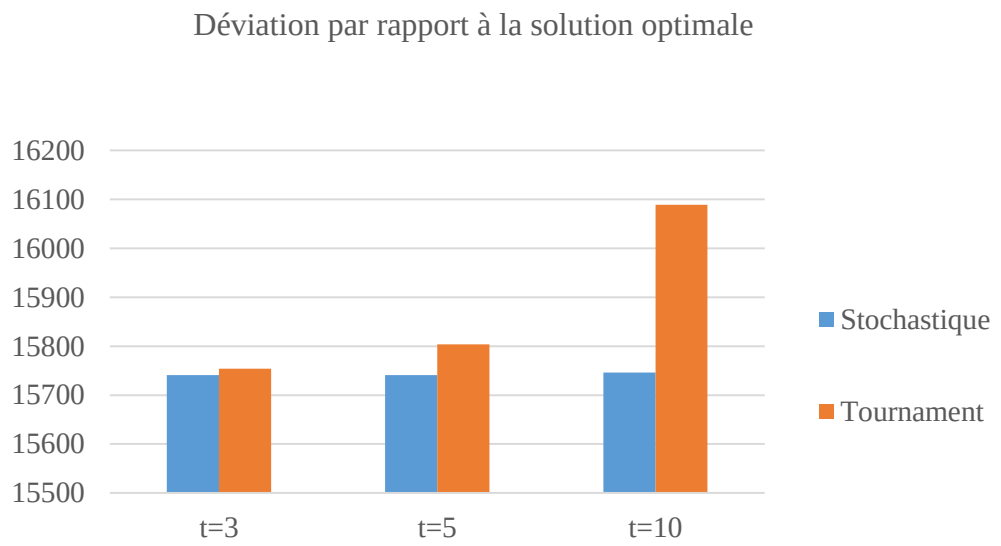


Figure 4.6. Déviation par rapport à la solution optimale

Selon la figure 4.6, nous pouvons voir que le pourcentage d'écart par rapport à la solution optimale est inférieur à 1% pour les petites tailles et à 2% pour les grandes tailles pour la sélection stochastique. Alors que la sélection de tournoi ne donne aucun écart par rapport à la solution optimale pour les petites instances (0%), et moins de 1% pour les problèmes de grande taille. Nous concluons que la sélection du tournoi donne de meilleurs résultats que la sélection stochastique pour toutes les tailles de problèmes.

La performance de la méthode de sélection d'optimisation est également liée à un autre facteur principal, à savoir la courbe de convergence. La figure 4.7 correspond à la courbe de convergence des méthodes de sélection d'AG proposées : tournoi et stochastique. Il est clairement démontré que lorsque le temps de calcul et le nombre de générations augmentent, la courbe de convergence de l'algorithme de sélection du tournoi atteint le niveau le plus bas (à la 5ème itération) par rapport à la sélection stochastique.

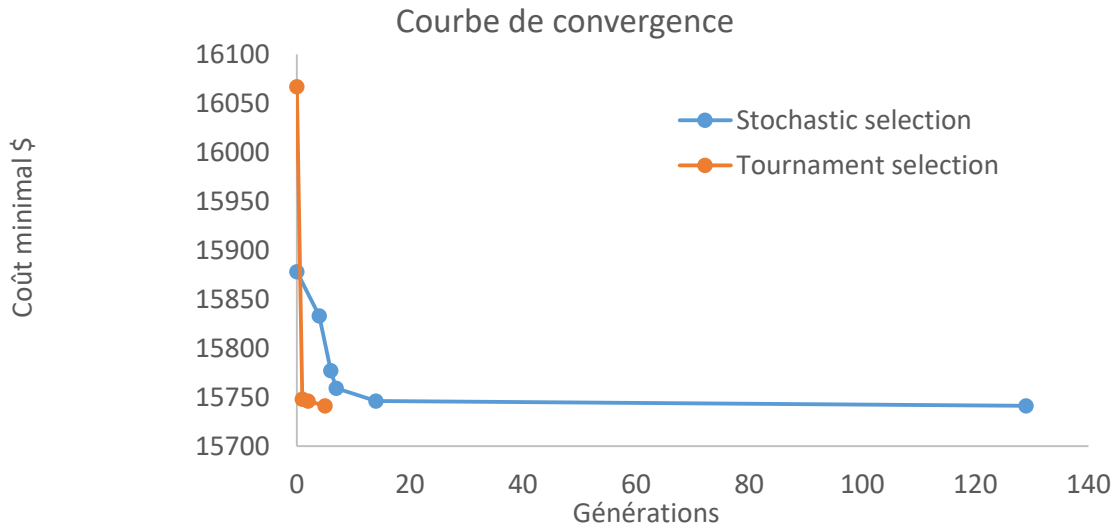


Figure 4.7. Courbe de convergence

4.5.2 Résultats du t test

Afin de déterminer quelle technique de sélection fournit la meilleure solution, nous effectuons une analyse statistique en utilisant un t test d'échantillons appariés. Le but étant de trouver le coût total optimal de la qualité des aliments. La performance a été testée pour dix séries de COFQ pour chacune des techniques de sélection. Pour cette expérience, les probabilités de croisement et de mutation sont respectivement de 0,7 et 0,2. Nous utilisons la taille 2 pour la sélection du tournoi. Les populations sont 120, 200 et 300. Le coût de la pénalité est fixé à 5000 $, la température est de 1750 et le taux de refroidissement est de 0, 9. Le nombre maximum d'itérations est fixé à 100. Nous avons utilisé le logiciel de statistique 'IBM SPSS statistics' version 23 pour analyser les données.

Le tableau 4.5 rapporte les paramètres d'entrée du modèle FSC-COQ, et le tableau 4.6 montre un exemple de résultats expérimentaux obtenus des trois stratégies de sélection présentées ci-dessus. La taille de la population de l'algorithme ayant un impact considérable sur la qualité de la solution, nous proposons d'étudier différentes tailles de population. Par conséquent, un t test apparié sera effectué pour analyser et comparer les données collectées.

Tableau 4.5. Paramètres d'entrée du modèle FSC-COQ

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$\mathbf{P_{p,t}}$	0.21	$\mathbf{C_{IF\ fix}}$	2.5
$\mathbf{g_d^2}$	2.3	$\mathbf{\Delta q_d}$	0.03
$\mathbf{f_{d,r,y}}$	0.9	$\mathbf{\Delta q_{d,y}}$	0.02
$\mathbf{g_d^1}$	3.2	$\mathbf{C_s}$	2.7
$\mathbf{C_{p\ var}}$	2.5	$\mathbf{\overline{C_{EF}}}$	150
$\mathbf{\alpha_p}$	0.2	$\mathbf{dem_{r,t}}$	500
$\mathbf{C_{A\ fix}}$	1.8	$\boldsymbol{a_{p,t}}$	1450
$\mathbf{C_{Avar}}$	2.5	$\boldsymbol{b_{d,t}}$	1450
$\mathbf{\beta_d}$	0.2	$\boldsymbol{l\ R_t}$	[1%-98%]
T	1	**p**	3
D	3	**y**	3
R	3		

Tableau 4.6. Exemples de résultats obtenus avec des coûts différents

	Solutions				
O	[1, 0, 0]	[0, 1, 0]	[0, 1, 0]	[0, 1, 0]	[1, 0, 0]
X	[1, 0, 0]	[0, 1, 0]	[0, 1, 0]	[0, 0, 1]	[1, 0, 0]
Z	[1, 0, 0]	[0, 1, 0]	[0, 1, 0]	[0, 0, 1]	[1, 0, 0]
W_{pd}	[1300, 0, 0]	[0, 1300, 0]	[0, 1302, 0]	[0, 0, 1303]	[1301, 0, 0]
W_{dr}	[1200, 0, 0]	[0, 1201, 0]	[0, 1201, 0]	[0, 0, 1200]	[1200, 0, 0]
Ql	93%	93%	93%	93%	93%
Min cost ($)	14031,56	14037,61	14048,01	14048,96	14045,76
CEF ($)	3422,16	3186,8	3425,01	3422,16	3422,16
CIF ($)	216,95	216,95	217,28	217,44	217,11
CA ($)	3186,8	3092,65	3191,7	3194,15	3189,25
CP ($)	3092,65	3092,65	3097,4	3099,78	3095,03
Operational cost ($)	273,0	273,0	273,42	273,63	273,21
	2760,0	2762,3	2762,3	2760,0	2760,0
Transport Cost ($)	1080,0	1080,9	1080,9	1081,8	1089,0

Ensuite, nous effectuons des tests pour chaque échantillon, c'est-à-dire pour chaque taille de population. Nous rapportons sur le tableau 4.7 les résultats des différentes techniques de sélection pour différentes tailles.

Tableau 4.7. Résultats statistiques des trois techniques de sélection

	Test N°	**Boltzmann**	**Tournoi**	**Stochastique**
Popsize 120	1	14036,71	14031,56	14088,77
	2	14067,02	14052,36	14077,42
	3	14036,76	14156,19	14106,83
	4	14059,26	14037,66	14093,87
	5	14059,91	14046,86	14118,93
	6	14057,56	14071,96	14095,67
	7	14042,81	14052,36	14085,02

	8	14048,01	14075,47	14148,13
	9	14065,51	14052,36	14058,41
	10	14031,56	14078,36	14089,33
Popsize 200	1	14054,92	14036,76	14109,57
	2	14065,86	14031,56	14073,07
	3	14064,47	14052,36	14069,67
	4	14041,96	14052,36	14107,47
	5	14031,56	14031,56	14134,33
	6	14031,56	14031,56	14107,77
	7	14036,76	14031,56	14042,81
	8	14034,26	14031,56	14058,41
	9	14049,71	14031,56	14039,81
	10	14041,96	14031,56	14057,12
Popsize 300	1	14048,06	14031,56	14123,44
	2	14031,56	14031,56	14048,06
	3	14042,81	14031,56	14101,87
	4	14041,96	14031,56	14074,21
	5	14043,66	14031,56	14102,47
	6	14039,66	14052,36	14060,97
	7	14031,56	14042,81	14042,26
	8	14036,76	14049,61	14059,26
	9	14045,01	14031,56	14152,03
	10	14043,66	14031,56	14116,13

D'après le tableau 4.7, nous ne pouvons pas conclure laquelle des techniques de sélection fournit la meilleure solution au problème considéré. Pour cette raison, le t test pour échantillons appariés a été réalisé sur nos résultats pour les analyser statistiquement et trouver la technique de sélection la mieux adaptée à notre problème.

La procédure de t test sur échantillons appariés est basée sur la vérification de deux hypothèses contraires. La première s'appelle l'hypothèse nulle (H0) qui pourrait être formulée ainsi : la moyenne de chaque observation est la même. Dans le second cas, l'hypothèse alternative (HA) est simplement l'opposé de H0. Nous définissons l'hypothèse avec laquelle travailler :

Hypothèse :

H0: µ1 = µ2 = µ3 (c'est-à-dire que toutes les stratégies de sélection donnent les mêmes résultats)

HA: au moins une stratégie de sélection est différente de la précédente.

La signification est fixée à 0,05 (95% de confiance)

Les mesures sont prises à partir du même programme avec des stratégies de sélection différentes, nous devons vérifier si ces techniques donnent les mêmes résultats. Dans ce cas, si la différence moyenne entre les mesures est égale à 0, l'hypothèse nulle est vérifiée. D'autre part, si leur impact sur les résultats obtenus est similaire, la différence moyenne n'est pas égale à 0, l'hypothèse nulle est rejetée et l'alternative Ha est acceptée.

Le tableau 4.8 donne la moyenne, l'écart type et l'erreur moyenne standard de chaque technique de sélection. Les techniques de sélection sont appariées en trois combinaisons :

- paire 1 : sélection de Boltzmann- Tournoi
- paire 2 : sélection de Boltzmann- Stochastique
- paire 3 : sélection Tournoi- Stochastique.

Tableau 4.8. Statistiques des échantillons appariés

		N	Mean		Std. Deviation
			Statistic	Std. Error	
Popsize 120	Boltzmann	10	14050,51	4,10	12,98
	Tournoi	10	14065,51	11,22	35,47
	Stochastique	10	14096,24	7,70	24,36
Popsize 200	Boltzmann	10	14045,30	4,08	12,90
	Tournoi	10	14036,24	2,74	8,65
	Stochastique	10	14080,00	10,27	32,48
Popsize 300	Boltzmann	10	14040,47	1,76	5,57
	Tournoi	10	14036,57	2,65	8,39
	Stochastique	10	14088,07	11,54	36,49

Sur la base de ces données, nous pouvons maintenant effectuer l'analyse pour vérifier la différence entre chaque observation. Par conséquent, pour chaque paire, nous évaluons la valeur de «t» par l'équation (2.4) suivante :

$$t = \frac{\bar{x}-\mu}{s/\sqrt{n}} \qquad (2.4)$$

Où :
$\bar{x}$: la moyenne,
n : le nombre d'échantillons pris en considération (n=10),
μ : l'erreur standard moyenne,
s : l'écart type.

Le tableau 4.9 suivant récapitule les résultats de l'analyse du t test pour échantillons appariés pour chaque taille de population du programme GA. Ce tableau fournit des informations pertinentes sur la mesure étudiée présentée ci-dessus ; en d'autres termes, il contient la moyenne, l'écart type et les différences de moyenne d'erreur standard des paires.
Par exemple la valeur de la première ligne (paire 1 : tournoi de Boltzmann - Tournoi) est la suivante : 14050,51-14065,51 = -15. Les colonnes supplémentaires nous aident à prendre une décision concernant les mesures (avec le degré de liberté 9). Grâce à ces sorties, nous pourrons choisir la meilleure technique de sélection.
Pour la taille de la population de 200, la solution optimale moyenne donnée par la sélection de tournoi est inférieure à celle donnée par la sélection stochastique : 43,76 $ -31,88 SD. De plus, il existe de fortes preuves que tournoi est meilleure que stochastique, puisque la valeur p obtenue est 0,002, ce qui est inférieur au niveau de signification choisi $\alpha = 0,05$. Par conséquent, nous pouvons conclure que les coûts optimaux moyens de la sélection de tournoi et stochastique sont significativement différents.

La dernière colonne de ce tableau montre que la probabilité d'obtenir le résultat par hasard est de 0,7% pour la paire 1 de Popsize 300. À partir des tableaux ci-dessus, nous pouvons agréger sur le tableau 4.9 les valeurs p afin de discuter des résultats de cette analyse statistique.

Tableau 4.9. Les p-values

	Sig. (2-tailed)		
	120	200	300
Boltzmann – Tournoi	29,40%	4,80%	0,70%
Boltzmann – Stochastique	0,10%	1,70%	0,10%
Tournoi – Stochastique	2,80%	0,20%	0,10%

La figure 4.8 montre la p value pour différentes tailles de population :

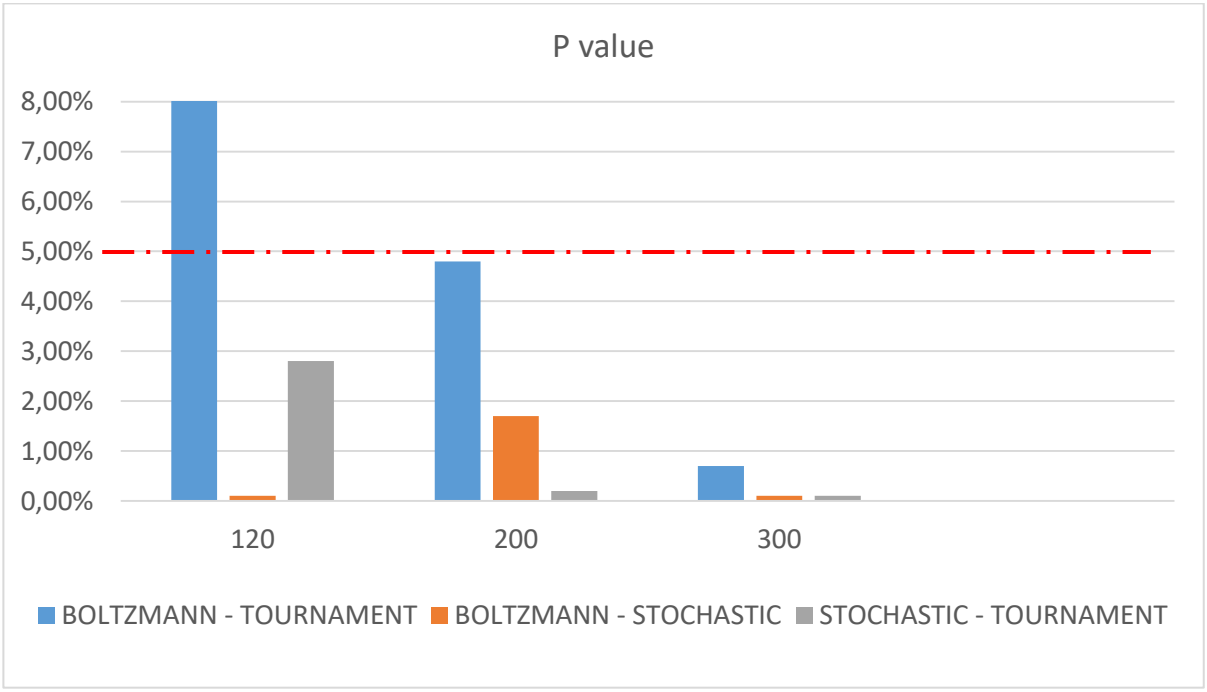


Figure 4.8. p values agrégées

Comme on peut le voir à la figure 4.8, des populations plus importantes donnent des valeurs p moins élevées. Pour la taille de la pop 120, il n'y a pas de différence de signification entre la sélection de Boltzmann et celle du tournoi, donc l'hypothèse nulle est vraie. Cependant, pour les deuxième et troisième paires, p est inférieur à 5%, ce qui signifie que le H0 est rejeté et qu'il existe une différence significative entre la méthode de sélection stochastique et les autres. Lorsque la taille de la population est fixée à 200, nous constatons que le tournoi se comporte mieux que Boltzmann et que la technique de sélection stochastique. La même conclusion peut être faite pour une taille de pop fixée à 300. De plus, dans ce cas, les valeurs p sont plus petites et la variabilité diminuée, par exemple : le coût optimal moyen à la taille de pop 200 paire 1 (Boltzmann - Tournoi) est passé de 9,06 -12,52SD à 6.9 $ -6.36SD.

Tableau 4.10. t test des échantillons appariés

			Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
						Lower	Upper			
Popsize 120	Pair 1	Boltzmann- Tournoi	-15,00	42,56	13,46	-45,45	15,44	-1,11	9	0,294
	Pair 2	Boltzmann- Stochastique	-45,72	30,08	9,51	-67,25	-24,20	-4,80	9	0,001
	Pair 3	Tournoi- Stochastique	-30,72	36,99	11,69	-57,18	-4,26	-2,62	9	0,028
Popsize 200	Pair 1	Boltzmann- Tournoi	9,06	12,52	3,96	0,10	18,02	2,29	9	0,048
	Pair 2	Boltzmann- Stochastique	-34,70	37,47	11,85	-61,50	-7,90	-2,93	9	0,017
	Pair 3	Tournoi- Stochastique	-43,76	31,88	10,08	-66,57	-20,96	-4,34	9	0,002
Popsize 300	Pair 1	Boltzmann- Tournoi	6,90	6,36	2,01	2,35	11,45	3,43	9	0,007
	Pair 2	Boltzmann- Stochastique	-47,60	31,73	10,04	-70,30	-24,90	-4,74	9	0,001
	Pair 3	Tournoi- Stochastique	-54,50	36,72	11,61	-80,76	-28,24	-4,69	9	0,001

4.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons abordé la question de la stratégie de sélection à choisir dans l'approche d'optimisation d'algorithme génétique. L'objectif était de trouver la stratégie de sélection qui nous permet d'avoir le résultat optimal pour notre modèle FSC-COQ. Dans la première partie du chapitre, nous avons rappelé les différentes techniques de sélection existant dans la littérature. Sur la base de cette étude, nous avons effectué une étude comparative de trois techniques à savoir : la sélection par tournoi, la sélection stochastique et la sélection de Boltzmann. Les résultats expérimentaux ont démontré que la technique de tournoi donne un écart minimal par rapport à la solution optimale pour les petites et grandes instances comparé aux autres techniques.

Dans la deuxième partie du chapitre, une analyse statistique a été effectuée afin de déterminer laquelle des techniques étudiées donne le meilleur résultat. Les résultats obtenus par la méthode d'évaluation du t test montrent que la technique de sélection du tournoi est la meilleure par rapport à l'échantillonnage stochastique sans remplacement et au tournoi de Boltzmann. Étant donné que la taille de la population est un paramètre important de l'AG, différents niveaux ont été évalués afin de valider le test statistique.

Dans les travaux futurs liés à cette étude, d'autres paramètres peuvent être étudiés, tels que les probabilités de mutation et de croisement, le taux de refroidissement de la technique de sélection de Boltzmann. Un autre paramètre à prendre en compte est le temps de calcul du programme d'AG basé sur chaque méthode de sélection, en particulier pour les plus grandes tailles de réseau de la chaîne logistique alimentaire.

Nous allons finalement conclure nos travaux de recherche en donnant un bilan général de ce qui a été effectué et en fixant des perspectives de recherche future.

Conclusion Générale et Perspectives

Dans cette thèse, nous avons contribué à la conception et optimisation des Réseaux des Chaines Logistiques SCND pour les industries agroalimentaires et les industries de fabrication, Considérant le Coût de la Qualité COQ. Cette recherche a permis d'élargir la compréhension du cout de la qualité en tant que mesure de performance, et aussi à intégrer le COQ à la modélisation de la chaîne logistique. Un certain nombre de conclusions supplémentaires peuvent être tirées de cette recherche et seront discutées comme suit :

Dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur l'étude de la problématique d'optimisation des réseaux des chaînes logistiques considérant le coût de la qualité. Cette étude considère le large éventail de décisions que les managers doivent prendre pour une gestion pertinente de la SC. Allant de la définition de la qualité et du coût de la qualité, à la description des approches d'optimisation qui sont capables de retourner des solutions de qualité pour ces problèmes, passant par une revue des structures essentielles des chaines logistiques, l'ensemble des critères, niveaux décisionnels et mesures de performances les caractérisant. Une recherche bibliographique approfondie laisse voir :
Le manque étonnant de références ayant inclus le COQ dans l'étude de la SCND, malgré son grand apport dans l'amélioration simultanée de la rentabilité et la qualité.
L'intérêt d'opter pour une méthode de résolution qui tient compte des situations industrielles et agroalimentaires réelles.
D'après cette bibliographie qui a fait apparaître les enjeux industriels et méthodologiques de notre thèse, nous nous sommes intéressés, du point de vue méthodologique, aux approches à bases d'Algorithmes Génétiques pour la résolution des problèmes d'optimisation des SCND.

Le premier sous-objectif atteint dans cette recherche a été décrit au chapitre 2, où un modèle quantitatif pour le calcul du COQ sur une chaîne logistique a été présenté. Ce modèle mathématique calcule le COQ total pour l'ensemble de la chaîne logistique en fonction des décisions internes de l'usine de fabrication, ainsi que le taux de défaillance chez le fournisseur et chez le détaillant. Le modèle, basé sur la classification P-A-F, a été validé par des tests expérimentaux, suite à une procédure de résolution basée sur les algorithmes génétiques. Cette approche par métaheuristique nous a permis d'obtenir des solutions pertinentes dans un laps de temps relativement réduit, de surcroit de sa bonne exploration de l'espace de recherche et sa flexibilité. Ensuite, des comparaisons graphiques du comportement des courbes de CoQ pour différents scénarios ont été effectuées avec le modèle de Juran. Sur la base des résultats, nous avons pu faire apparaître la relation entre le taux de défaillance du fournisseur et le niveau de qualité optimal, ainsi qu'entre le taux de défaillance des détaillants et le niveau de qualité atteint.

La seconde contribution a porté sur le développement d'un modèle d'optimisation d'une chaîne logistique alimentaire, en intégrant le coût de qualité alimentaire COFQ dans la prise de décision sur les conditions de stockage et de transport. A l'issue du modèle quantitatif développé dans la première contribution de notre thèse, une méthodologie de calcul des différentes catégories de coût, notamment le coût de qualité alimentaire, a été définie. Le modèle est un problème de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes (MINLP), dont l'objectif est de minimiser le coût total sous les contraintes de niveau de qualité global, en raison du caractère périssable des produits, et des autres contraintes de la demande, de la capacité, de l'équilibre des flux et des coûts.
Le modèle a démontré l'importance de la gestion de la FSC, afin de maintenir la qualité et la sécurité des produits alimentaires et assurer une prolongation de la durée de vie des produits alimentaires par un stockage et une transportation à une température optimale.

Dans un premier temps, nous avons procédé par une résolution exacte à travers la méthode de séparation et d'évaluation (B&B) intégrée dans le solveur CPLEX. Ensuite, nous avons rapporté les résultats obtenus par la méthode approchée basée sur les Algorithmes Génétiques. Cette dernière a prouvé sa performance quant à la vitesse de génération des solutions pour les problèmes de petites et grande taille, et aussi concernant la qualité des solutions comparé au solveur CPLEX.

L'attention a été, enfin, focalisée sur l'amélioration de l'AG proposé pour notre modèle FSC-CoQ. Pour ce faire, nous avons présenté une étude comparative des différentes stratégies de sélection afin d'améliorer les résultats du programme AG développé. Ce dernier sous-objectif était de définir laquelle des stratégies de sélection, qui est une étape importante dans la reproduction, était la meilleure à fournir des résultats optimaux. Dans la première partie, nous avons rappelé les différentes techniques de sélection existant dans la littérature, suivie d'une étude comparative de trois techniques à savoir : la sélection par tournoi, la sélection stochastique et la sélection de Boltzmann. Dans la deuxième partie, nous avons effectué une analyse statistique basée sur le test –T afin de déterminer laquelle des techniques étudiées donne le meilleur résultat. Les résultats expérimentaux obtenus pour différents niveaux de la taille de population, ont démontré que la technique de tournoi donne un écart minimal par rapport à la solution optimale pour les petites et grandes instances comparé aux autres techniques. Ainsi, nous avons conclu que la technique de sélection du tournoi est la meilleure par rapport à l'échantillonnage stochastique sans remplacement et au tournoi de Boltzmann pour l'optimisation de notre modèle FSC-COQ.

Dans les travaux futurs liés à cette étude, d'autres paramètres peuvent être étudiés, tels que les probabilités de mutation et de croisement, le taux de refroidissement de la technique de sélection de Boltzmann. Un autre paramètre à prendre en compte est le temps de calcul du programme d'AG basé sur chaque méthode de sélection, en particulier pour les plus grandes tailles de réseau de la chaîne logistique alimentaire.
Les résultats fournis à travers les algorithmes génétiques ont une limitation qui réside dans leur convergence prématurée. En conséquence, afin d'éliminer ces faiblesses et d'améliorer davantage la qualité des solutions fournies, une méthode hybride combinant deux métaheuristiques telles que les algorithmes génétiques et le recuit simulé peut être développée dans des travaux ultérieures. Un autre travail futur comprend l'extension du modèle à plusieurs niveaux dans la chaîne logistique.

Une autre perspective de recherche très intéressante, liée aux problèmes mathématiques appliqués au domaine de la chaîne d'approvisionnement en bioénergie. Sachant que la bioénergie est une nouvelle source d'énergie renouvelable dans de nombreux pays. La production de bioénergie devrait augmenter en raison de ses avantages uniques, tels que l'absence d'émissions nocives et son abondance. Les problèmes d'approvisionnement sont les principaux obstacles à l'augmentation de l'utilisation de la biomasse qui est à la fois volumineuse et à faible densité énergétique pour produire de la bioénergie.

Production scientifique

Publications :

- Douiri, L., Jabri, A. and El Barkany, A. (2016). "Models for Optimization of Supply Chain Network Design Integrating the Cost of Quality: A Literature Review". **American Journal of Industrial and Business Management, 6, 860-876.** http://dx.doi.org/10.4236/ajibm.2016.68082

- Douiri Lamiae, Jabri Abdelouahhab and Abdellah El Barkany, 2017. "A Genetic Algorithm Procedure for Optimizing Supply Chain under Quality Measures". **Journal of Engineering and Applied Sciences, 12: 7214-7222.** 10.3923/jeasci.2017.7214.7222

- Douiri Lamiae, Jabri Abdelouahhab and Abdellah El Barkany, 2019. « Optimal Quality Degradation Modeling in Food Supply Chain", **International Journal of Engineering Research in Africa,** *Vol. 45, pp 192-204.*

- Douiri Lamiae, Jabri Abdelouahhab ,Abdellah El Barkany and A.-Moumen Darcherif, 2020. "Optimization of Fresh Food Distribution Route Using Genetic Algorithm with the Best Selection Technique". Constraint Handling in Metaheuristics and Applications. Springer book chapter, accepté en mars 2020.

Communications:

- **L. Douiri, A. Jabri et A. El Barkany** , 'Modèles de Supply Chain Intégrant Le Cout de la qualité et les méthodes d'optimisation : revue de littérature' Xème Conférence Internationale : Conception Et Production Intégrées, **CPI 2015**, 2-4 Décembre 2015, Tanger – Maroc

- **L. Douiri, A. Jabri et A. El Barkany**, 'Méta heuristiques pour l'optimisation des supply chain intégrant le coût de la qualité' 1er Forum Des Doctorants **TICSM 17** Décembre 2015 À La Fst Fès.

- **L. DOUIRI, A. EL BARKANY, A. JABRI**, 'Modèle quantitatif pour la conception d'une chaîne logistique considérant les couts de la qualité', 9ème Edition du Colloque International de la Logistique et de Supply Chain (***LOGISTIQUA 2016***), Berrechid, Maroc, 19-20 Mai 2016.

- **L. DOUIRI, A. JABRI et A. EL BARKANY**, 'Vers l'optimisation d'une Chaîne Logistique considérant les coûts de la qualité' 3ème édition du Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels (***CIMSI 2016***), Fès, Maroc, 19-20 Octobre 2016.

- **DOUIRI Lamiae, JABRI Abdelouahhab and EL BARKANY Abdellah**, Optimization Approach for a Deterministic Supply Chain Network**,** *Journée de Recherche Inter-Laboratoire* ***(JRIL2017)***, 13 mai 2017, Fès, Maroc.

- **L. DOUIRI, A. JABRI Abdelouahhab and A. EL BARKANY,** A Deterministic Model for the Design of Supply Chain Network, ***3ème Congrès International du Génie Industriel et du Management des Systèmes (CIGIMS'2017),*** *17-18 mai 2017, Meknès, Maroc.*

- **L. DOUIRI, A. JABRI, A. EL BARKANY**, Quality considerations in food supply chain network: a conceptual framework***, 1ère édition du Congrès International de Modélisation et Optimisation des Systèmes Mécaniques (CIMOSM'2017),*** 05-06 décembre 2017, Fès, Maroc.

- ***L. Douiri, A. Jabri Et A. El Barkany,*** *'Performance Evaluation of Evolutionary Algorithm based Optimization for multi-level Food Supply Chain' IEEE, 11 th Edition,* ***The International Conference on Integrated Design and Production CPI'2019 (14-16 October 2019).***

- **A. Jabri, L. Douiri, Et A. El Barkany**, 'Comparative study of different Selection Techniques used in Genetic Algorithms for Food Supply Chain Optimization IEEE, 11 th Edition, ***The International Conference on Integrated Design and Production CPI'2019 (14-16 October 2019).***

Bibliographie

[AAR, 1988] AARTS, Emile et KORST, Jan. Simulated annealing and Boltzmann machines. 1988.

[ABB, 2011] Abbas, H., Hussein, M. and Etman, M. (2011) "A Hybrid Genetic Algorithm Approach for Optimizing Dynamic Multi- Commodity Supply Chains". Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering, Los Angeles, 23-25 October 2011, 154-159.

[ALA, 2012] Alaoui Abdiya, Application des techniques des métaheuristiques pour l'optimisation de la tâche de la classification de la fouille de données, 2012.

[ALB, 1992] Albright, T.L. and Roth, H.P. "The Measurement of Quality Costs: An Alternative Paradigm". Accounting Horizons, **6**, 15-27, 1992.

[ALB, 2011] Alborzi, F., Vafaei, H., Gholami, M.H. and Esfahani, M.M.S. "A Multi-Objective Model for Supply Chain Network Design under Stochastic Demand". World Academy of Science, Engineering and Technology, **5**, 1651-1655, 2011.

[ALE, 2011] Harari, A., Rozot, V., Enders, F. B., Perreau, M., Stalder, J. M., Nicod, P.Pantaleo, G. "Dominant TNF-α+ Mycobacterium tuberculosis–specific CD4+ T cell responses discriminate between latent infection and active disease". Nature Medicine, 17(3), pp.72–376, 2011. doi:10.1038/nm.2299

[ALG, 2017] Asama Alglawe, Andrea Schiffauerova & Onur Kuzgunkaya. "Analysing the cost of quality within a supply chain using system dynamics approach", Total Quality Management & Business Excellence.vol.2017, 2017.

[ALR, 2013] Mahmoud Alrefaei , Ali Diabat, Ameen Alawneh , Raid Al-Aomar , Mohd Nishat Faisal, "Simulated Annealing for Multi Objective Stochastic Optimization", International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT), Vol.2 , No.2, pp. 18-21, 2013.

[ALT, 2006] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L. and Paksoy, T. "A Genetic Algorithm Approach for Multi-Objective Optimization of Supply Chain Networks". Computers & Industrial Engineering, **51**, 196-215, 2006.

[ALT, 2009] Fulya Altiparmak , Mitsuo Gen , Lin Lin , Ismail Karaoglan, "A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design". Computers & Industrial Engineering 56, pp. 521–537, 2009.

[ANI, 2015] Anil J., Kuldip S.S. and Sachin S.P. Network Design and Optimization for Multi-Product, Multi-Time, Multiechelon Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty. The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, **29**, pp.656-661, 2015.

[AQE, 2012] Aqeel Asaad Al Salem, "An Integrated Model for Supplier Quality Evaluation", A Thesis in The Department of Mechanical and Industrial Engineering, CONCORDIA UNIVERSITY Montréal, Québec, Canada, 2012.

[ARA, 2007] H. Aramyan, Alfons G.J.M. Oude Lansink, Jack G.A.J. van der Vorst and Olaf van Kooten, "Performance measurment in Agri food supply chain, A case study", Supply chain managment : an international Journal, vol.12/4, 304-315, 2007.

[ARM, 2011] V.A. Armentano, A.L. Shiguemoto, A. Lokketangen, "Tabu search with path relinking for an integrated production–distribution problem", Computers & Operations Research 38, pp. 1199–1209, 2011.

[ARM, 2017] Armando Elizondo-Noriega, Mario G. Beruvides, David Güemes-Castorena, "A Historical Analysis of the Evolution of the Economics of Quality: The Cost of Quality Revisited". 2017 Proceedings of PICMET '17: Technology Management for Interconnected World.

[ARN, 1995] Arntzen, B.C., Brown, G.G., Harrison, T.P. and Trafton, L.L. "Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation". Interfaces, **25**, pp. 69-93, 1995. http://dx.doi.org/10.1287/inte.25.1.69

[ARR, 1967] ARRHENIUS, S. "On the reaction velocity of the inversion of cane sugar by acids. Selected Readings in Chemical Kinetics", pp.31–35. 1967 doi:10.1016/b978-0-08-012344-8.50005-2

[ASI, 2008] Asil Bulgak, A., Alzaman, C. and Ramudhin, A. "Incorporating the Cost of Quality in Supply Chain Design". Portland International Conference on Management of Engineering & Technology, Cape Town, 27-31, pp.1650-1655, July 2008. http://dx.doi.org/10.1109/picmet.2008.4599784

[AYA, 2013] Ehsan Ayati, "Quantitative Cost of Quality Model in Manufacturing Supply Chain", Master's thesis, Concordia University 2013.

[BAN, 2001] Banerjee, S., Banerjee, A., Burton, J. and Bistline, W. "Controlled partial shipments in two-echelon supply chain networks: a simulation study". International Journal of Production Economics, 71, pp.91–100, 2011.

[BAN, 2012] M. Banasik and M. Beruvides, "A case study of the costs of quality: Water Utilities," Engineering Management Journal, vol. 24, pp. 3-14, 2012

[BEA, 1998] Beamon, B. M. "Supply chain design and analysis*", International Journal of Production Economics,* vol 55(3), pp.281–294, (1998). doi:10.1016/s0925-5273(98)00079-6

[BEA, 2000] Sabri, E.H. and Beamon, B.M. "A Multi-Objective Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design". Omega, **28**, pp. 581-598, 2000. http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00080-8

[BEA, 2001] Beamon, B. M. and Chen, V. C. P. "Performance analysis of conjoined supply chains". International Journal of Production Research, 39, pp.3195–3218J, 2001.

[BEN, 2011] Bennekrouf, M., Mtalaa, W., Boudhar, F. and Sari, Z. "A Dynamic Model for the Design of Green Logistic Networks". Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering, Los Angeles, 23-25 October 2011, pp.62-67, 2011.

[BES, 2015] B. Beshah, E. Gidey and A. Leta, "Modellig macroeconomics of quality," International Journal of Productivity and Quality Management, vol. 16, pp. 114-126, 2015.

[BLA, 1978] Blank, L et Solorzano,J. "Using quality cost analysis for management improvement". Industrial Engineering (February), pp.46-51, 1978.

[BOT, 1997] Bottorff, D.L. "CoQ Systems: The Right Stuff". Quality Progress, **30**, pp. 33-35, 1997.

[BOZ, 2012] Seyedyaser-Mohammad, B., Desa, I. and Wibowo, A. "Genetic Algorithm Enhancement to Solve Multi Source Multi Product Flexible Multistage Logistics Network". International Journal of Computer Science Issues, **9**, pp.157-165, 2012.

[BRE, 1987] Breitman, R.L. and Lucas, J.M.PLANETS: "A Modeling System for Business Planning". Interfaces, **17**, pp. 94-106, 1987. http://dx.doi.org/10.1287/inte.17.1.94

[BUR, 1996] Burgess, T.F. "Modeling Quality-Cost Dynamics". International Journal of Quality & Reliability Management, **13**, pp. 8-26, 1996. http://dx.doi.org/10.1108/02656719610116054

[CAM, 1983] J. Campanella and F. Corcoran, "Principles of Quality costs: A review of the history, fundamental concepts and operation of a quality costs system," Quality Progress, pp. 17-22, 1983.

[CAM, 1997] Camm, J.D., Chorman, T.E., Dill, F.A., Evans, J.R., Sweeney, D.J. and Wegryn, G.W. "Blending OR/MS, Judgment, and GIS: Restructuring P&G's Supply Chain". Interfaces, **27**, pp.128-142, 1997.

[CAR, 1992] Carr, L.P. "Applying Cost of Quality to a Service Businesses". Sloan Management Reviews, **33**, pp.72-77, 1992.

[CAS, 2012] Castillo-Villar, K.K., Smith, N.R. and Simonton, J.L. "The Impact of the Cost of Quality on Serial Supply-Chain Network Design". International Journal of Production Research, **50**, pp.5544-5566, 2012.

[CAS, 2014] Castillo-Villar, K.K., Smith, N.R. and Herbert-Acero, J.F. "Design and Optimization of Capacitated Supply Chain Networks Including Quality Measures". Mathematical Problems in Engineering, pp. 1-17, 2014.

[CER, 1985] Cerny, V. "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm". Journal of Optimization Theory and Applications, 45(1), pp. 41-51, 1985.

[CHA, 2004] Chan, F.T.S. and Chung, S.H. "A Multi-Criterion Genetic Algorithm for Order Distribution in a Demand Driven Supply Chain". International Journal Computer Integrated Manufacturing, **17**, pp.339-351, 2004.

[CHA, 2010] Chandrasekaran Sowmya Danalakshmi and Gabriel Mohan Kumar, "Optimization of Supply Chain Network Using Genetic Algorithm", Manufacturing and Industrial Engineering, Issue 3,pp. 30-35, 2010.

[CHE, 2002] Cheung, K. L. and Lee, H. L., 2002, The inventory benefit of shipment coordination and stock rebalancing in a supply chain. Management Science, 48, 300–306.

[CHE, 2007] Laurent Cheyroux. « Sur l'évaluation de performances des chaines logistiques ». Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003.

[CHE, 2012] Z.H. Che, "A particle swarm optimization algorithm for solving unbalanced supply chain planning problems", Applied Soft Computing 12, pp.1279–1287, 2012.

[CHI, 2002] Y. Chiu, "A Study on the economics of quality in a technology management environment", Lubbock, Texas: Texas Tech University, 2002.

[CHI, 2010] Chinnasri, W., & Sureerattanan, N. "Comparison of performance between different selection strategies on genetic algorithm with course timetabling problem". 2010 IEEE International Conference on Advanced Management Science (ICAMS 2010). doi:10.1109/icams.2010.5552828.

[CHR, 1994] Christy, D.P. and Grout, J.R. "Safeguarding Supply Chain Relationships". International Journal of Production Economics, **36**, pp.233-342, 1994. http://dx.doi.org/10.1016/0925-5273(94)00024-7.

[CHR, 1998] Christopher M.G., "Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Services", Pitman, London, 1998.

[CLA, 1986] Clark, R., et McLaughlin,J. « Controlling the cost of product defects. Managment Accounting".1986.

[COH, 1989] Cohen, M.A. and Lee, H.L. "Resource Deployment Analysis of Global Manufacturing and Distribution Networks". Journal of Manufacturing and Operations Management, **2**, pp.81-104, 1989.

[COL, 1988] Collins, N.E., Egelese, R.W. and Golden, B.L., "Simulated Annealing—An Annotated Bibliography". American Journal of Mathematical and Management Sciences, 8, pp.209-307, 1988.

[COL, 2002] Collette Yann, Siarry, Patrick, Optimisation multiobjectif, Paris: Eyrolles, 2002, Numéros: ISBN 2-212-11168-1.

[COO, 1988] Cooper, R. and Kaplan, R.S. "Measure Costs Right: Make the Right Decisions". Harvard Business Review, **66**, pp.96-103, 1988.

[CRI, 2009] Cristina. Marreiros, M. Ness, "A Conceptual Framework of Consumer Food Choice Behaviour", Faculty of Science, Agriculture and Engineering. University of Newcastle, CEFAGE-UE Working Paper2009/06.

[CRO, 1979] Crosby, P. "Quality is free: The art of making quality certain ": New American Library New York, 1979.

[CRO, 1984] Crosby, P. "Quality without Tears: The Art of Hassle Free Management". McGraw-Hill, New York, 1984.

[CRO, 1990] Crossfield, R.T. and Dale, B.G. "Mapping Quality Assurance Systems: A Methodology". Quality and Reliability Engineering International, **6**, pp.167-178, 1990. http://dx.doi.org/10.1002/qre.4680060303

[DAL, 1995] Dale, B.G. and Plunkett, J.J. "Quality Costing". 2nd Edition, Chapman and Hall, London, 1995.

[DAS, 2011] Das, KA. "Quality Integrated Strategic Level Global Supply Chain Model". International Journal of Production Research, **49**, pp.5-31, 2011. http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.508933

[DAW, 1993] Dawes, E.W. and Siff, W. "Using Quality Costs for Continuous Improvement". ASQC Annual Quality Congress Transactions, **47**, pp.810-816, 1993.

[DOU, 2016] Lamiae Douiri, Abdelouahhab Jabri, Abdellah El Barkany, 'Models for Optimization of Supply Chain Network Design Integrating the Cost of Quality: A Literature Review', American Journal of Industrial and Business Management, vol 6, pp.860-876, 2016.

[EDW, 1991] Edwin B. Dean, "Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview", Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts, 1991.

[FAI, 2012] Fayçal Zarrouk, « Cours de statistiques à distance », ISSEP Ksar-Said, 2011-2012.

[FAR, 2008] Farahani, R.Z. and Elahipanah, M. "A Genetic Algorithm to Optimize the Total Cost and Service Level for Just-in-Time Distribution in a Supply Chain". International Journal of Production Economics, **111**, pp.229-24, 2008.

[FEI, 1957] Feigenbaum, A. "The Challenge of Total Quality Control". Industrial Quality Control, **13**, pp.17-23, 1957.

[FLE, 2011] Fleischmann, M. and Beullens, P. (2011) Reverse Logistics Network Structures and Design. Faculty of Business Admin Erasmus University Rotterdam, Netherlands.

[FOX, 1989] Fox, M.J. "The Great Economic Quality Hoax". Quality Assurance, **15**, pp.72-74, 1989.

[FOX, 2000] Fox, M. S., Barbuceanu, M. and Teigen, R., "Agent-oriented supply-chain management". The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 12, pp.165–188, 2000.

[FRE, 2004] Freiesleben,J. "On the Limited Value of Cost of Quality Models". Total Quality Managment, 15(7), pp.959-969, 2004.

[FRE, 2008] Freeman, J.M. "The Case for Quality Costing Simulation". Journal of Total Quality Management, **20**, pp.476-487, 2008.

[FUL, 2009] Fulya, A., Mitsuo, G.B., Lin, L.B. and Ismail, K. "A Steady-State Genetic Algorithm for Multi-Product Supply Chain Network Design". Computers & Industrial Engineering, pp.**56**, 521-537, 2009. http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.05.012

[GAN, 2001] Ganeshan, R., Boone, T. and Stenger, A. J., "The impact of inventory and flow planning parameters on supply chain performance: an exploratory study". International Journal of Production Economics, 71, pp.111–118, 2001.

[GEO, 1974] Geoffrion A.M. and Graves, G.W. "Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition". Management Science, **20**, pp.822-844, 1974. http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.20.5.822

[GHA, 2018] Fathallah A. Ghanem, "cost of quality as a tool to improve the palestinian industrial organization competitive advantage", International journal of business quantitative economics and applied managment research, Volume-4, Issue-11, April-2018.

[GOD, 1988] J. Godfrey and W. Pasewark, "Controlling quality costs: A flaw in today's quality control cost systems is their focus on reducing individual, not the total quality costs of production," Management Accounting, vol. 69, pp. 48-51, 1988.

[GOL, 1988] Goldberg D. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Machine learning, Vol. 3, pp. 95-99, 1988.

[GOU, 1995] Goulden, C. and Rawlins, L. "A Hybrid Model for Process Quality Costing. International Journal of Quality & Reliability Management", **12**, pp.32-47, 1995. http://dx.doi.org/10.1108/02656719510097499

[GUP, 2007] Gupta. P. « Reduce Appraisal Costs. Quality » (December).20, 2007.

[HAC, 2013] Hachimi Hanaâ, « hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications », 2013.

[HAR, 1987] Harrington, H. Poor Quality Cost : CRC Press, 1987.

[HAS, 2016] Ali Akbar Hasani, "Competitive Supply Chain Network Design Considering Marketing Strategies: A Hybrid Metaheuristic Algorithm", International Journal of Supply and Operations Management, Volume 3, Issue 3, pp. 1429-1441, November 2016.

[HEA, 1991] Heagy, C.D. "Determining optimal quality costs by considering cost of lost sales", Journal of Cost Management, Vol.5, No.3, pp. 64-72, 1991.

[HOL, 1975] Holland, J. and Arbor, A. "Adaptation in Natural and Artificial Systems". University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

[HUB, 2007] Hübner, R. "Strategic Supply Chain Managment in process industries: an application to specially chemicals production network design": Springer Verlag, 2007.

[HWA, 2010] G. H. Hwang & E. M. Aspinwall, "Quality cost models and their application: A review", Total Quality Management, 7:3, pp.267-282, 1996.

[IBR, 2019] Ibrahim, A. O., Shamsuddin, S. M., Abraham, A., & Qasem, S. N. "Adaptive memetic method of multi-objective genetic evolutionary algorithm for backpropagation neural network". Neural Computing and Applications. **31**, pp. 4945–4962, 2019. doi:10.1007/s00521-018-03990-0.

[ITT, 1996] Ittner, "Exploratory evidence on the behavior of quality costs", Operations Research, vol. 44, pp. 114-130, 1996.

[IZQ, 2008] J. Izquierdo , R. Minciardi , I. Montalvo , M. Robba , M. Tavera, "Particle Swarm Optimization for the biomass supply chain strategic planning", iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software.

[JAB, 2013] Jabri, A. Barkany and A. Khalfi, "Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms of Multi-Pass Turning Process," Engineering, Vol. 5 No. 7, pp. 601-610, 2013.

[JAY, 2003] Jayaraman, V. and Ross, A. "A Simulated Annealing Methodology to Distribution Network Design and Management". European Journal of Operational Research, **144**, pp. 629-645, 2003.
http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00153-4

[JIN, 1999] Jin-Kao Hao, Philippe Galinier, Michel Habib, « Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes », Revue d'Intelligence Artificielle Vol : No. 1999.

[JIN, 2006] Jinghui Zhong, Xiaomin Hu, Jun Zhang, & Min Gu. (n.d.). "Comparison of Performance between Different Selection Strategies on Simple Genetic Algorithms". International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06). doi:10.1109/cimca.2005.1631619

[JOR, 1992] Jorgenson, D.M. and Enkerlin, M.E. "Managing Quality Costs with the Help of Activity Based Costing". Journal of Electronics Manufacturing, **2**, pp. 47-55, 1992. http://dx.doi.org/10.1142/S0960313192000182.

[JUL, 2007] Julien Francois. « Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance ». Sciences de l'ingénieur. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2007. Français.

[JUR, 1951] Juran, J.M. "Quality Control Handbook". McGraw-Hill, New York, 1951.

[JUR, 1975] J. Juran, "The non-pareto principle mea culpa," Quality Progress, vol. 8, pp. 8-9, 1975.

[JUR, 1993] Juran, et Gryna "Quality planning and analysis : from product development through use". New york : McGraw-Hill, 1993.

[JUR, 1998] J. Juran and F. Gryna, Juran's Quality Control Handbook, 4th ed., McGraw Hill, pp. 35, 1998.

[KAL, 2009] Babu, K., Satish, V., Prakash, O., SubbaKrishna, D. K., & Murthy, K. R. "Role of the Mantoux Test and Treatment with Antitubercular Therapy in a South Indian Patient Population of Presumed Intraocular Tuberculosis. Ocular Immunology and Inflammation", 17(5), pp. 307–311, 2009. doi:10.3109/09273940902999349

[KHA, 2013] A. Khataie and A. Bulgak, "A cost of quality decision support model for lean manufacturing: Activity-based costing application," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 30, pp. 751-764, 2013

[KHE, 2019] M. Kheirabadi , B. Naderi , A. Arshadikhamseha , V. Roshanaei, "A mixed-integer program and a Lagrangian-based decomposition algorithm for the supply chain network design with quantity discount and transportation modes", Expert Systems With Applications 137, pp. 504–516, 2019.

[KIM, 2002] Kim, B., Leung, J. M. Y., Park, K. T., Zhang, G. and Lee, S., "Configuring a manufacturing firm's supply network with multiple suppliers". IIE Transactions, 34, pp. 663–677, 2002.

[KIR, 1983] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P. "Optimization by Simulated Annealing". Science, **220**, pp. 671-680, 1983.

[KIR, 2012] András Király, Tamás Varga, János Abonyi, "Constrained Particle Swarm Optimization of Supply Chains", World Academy of Science, Engineering and Technology 67, 2012.

[KLI, 2008] Walid, K. "The Design of Robust Value Creating Supply Chain Networks: A Critical Review". Interuniversity Research Center on Enterprise Networks Logistics and Transportation—CIRRELET, 2008.

[KRY, 2014] Krystel K. Castillo-Villar, 1 Neale R. Smith, 2 and José F. Herbert-Acero3, "Design and Optimization of Capacitated Supply Chain Networks Including Quality Measures», Mathematical Problems in Engineering, vol 2014, pp. 1-17.

[LAN, 1960] A. H. Land et A. G. Doig. An automatic method for solving discrete programming problems. Econometrica, 28 :497–520, 1960

[LEE, 1993] Lee, H.L. and Billington, C. "Material Management in Decentralized Supply Chains. Operations Research", **41**, pp. 835-847, 1993. http://dx.doi.org/10.1287/opre.41.5.835

[LES, 1954] Lesser, W.H. "Cost of quality. Industrial Quality Control", November, 11-14, 1954.

[LID, 1999] Li, D. and O'Brien, C., "Integrated decision modelling of supply chain efficiency", International Journal of Production Economics, vol.59, pp. 147-57, 1999.

[LIN, 2007] Lin, L., Gen, M. and Wang, X. "A Hybrid Genetic Algorithm for Logistics Network Design with Flexible Multistage Model". International Journal of Information Systems for Logistics and Management, **3**, pp.1-12, 2007.

[LIN, 2014] Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., & Wang, S. "Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: a Review". Food and Bioprocess Technology, 8(2), pp.343–358, 2014. doi:10.1007/s11947-014-1398-3.

[MAC, 2016] Gabriel Machado Braido, Denis Borenstein, Gilmar D'Agostini Oliveira Casalinho, "Supply chain network optimization using a Tabu Search based heuristic", Gest. Prod., São Carlos, v. 23, n. 1, pp. 3-17, 2016.

[MAG, 2006] B. Magua, "The modern quality movement: Origins, development and trends," Total Quality Management, vol. 17, pp. 179-203, 2006.

[MAJ, 2013] Majid, R., Mahdi, B. and Reza, T.M. "A New Multi-Objective Stochastic Model for a Forward/Reverse Logistic Network Design with Responsiveness and Quality Level". Applied Mathematical Modeling, **37**, pp.328-344, 2013.

[MAR, 1989] Marsh, J. "Process Modeling for Quality Improvement". Proceedings of the 2nd International Conference on Total Quality Management, London, 14-15 June 1989, pp. 111-215, 1989.

[MAS, 1998] Machowski, F. and Dale, B.G. "Quality Costing: An Examination of Knowledge, Attitudes and Perceptions". Quality Management Journal, **5**, pp. 84-95, 1998.

[MET, 1953] Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. and Teller, E. "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines". The Journal of Chemical Physics, **21**, pp.1087-1092, 1953.

[MIC, 2010] Michel, G. and Jean-Yves, P. (2010) Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, Berlin.

[MOD, 1987] Modarres, B. and Ansari, A. "Two New Dimensions in the Cost of Quality". International Journal of Quality & Reliability Management, **4**, pp.9-20, 1987. http://dx.doi.org/10.1108/eb002886.

[MOS, 1995] R. Moskowitz, Howard R., "Food Quality - Conceptual and Sensory Aspects", Journal of Food Quality and Preference, vol.6, pp. 157-62, 1995.

[MUR, 2018] Amar Murumkar, S. N. Teli, Sandhya Jadhav, Sagar Dharmadhikari, Manoj Nikam, "Integrated Approach of Cost of Quality and Six Sigma", **Conference Paper** · January 2018.

[NAK, 2016] Dilupa Nakandala, "Cost-optimization modelling for fresh food quality and transportation", Industrial Management & Data Systems, Vol. 116 Iss 3, pp. 564 – 583, 2016.

[NAL, 2018] S. Nallusamy, K. Balakannan, P.S. Chakraborty, Gautam Majumdar, "A Mixed-Integer Linear Programming Model of Closed Loop Supply Chain Network for Manufacturing System", International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 35, pp. 198-207, 2018.

[ONW, 2001] G. C. Onwubolu & T. Kumalo "Optimization of multipass turning operations with genetic algorithms", International Journal of Production Research, 39:16, pp. 3727-3745, 2001.

[OZG, 2009] Ozgur, A. and Huseyin, A. "Cost of Quality Management: An Empirical Study from Turkish Marble Industry". Scientific Research and Essay, **4**, pp. 1275-1285, 2009.

[PAK, 2010] Paksoy, T., Özceylan, E. and Weber, G.-W. "A Multi-Objective Mixed Integer Programming Model For Multi Echelon Supply Chain Network Design and Optimization". Selçuk University, Department of Industrial Engineering, Campus, 42031, Konya, Turkey, 2010.

[PAN, 2016] Hari Mohan Pandey, Performance Evaluation of Selection Methods of Genetic Algorithm and Network Security Concerns, Procedia Computer Science 78, pp.13 – 18, 2016.

[PAR, 2018] Mahmood Pariazara, Mustafa Y. Sirb, "A multi-objective approach for supply chain design considering disruptions impacting supply availability and quality", Computers & Industrial Engineering. 121, pp.113–130, 2018.

[PAT, 2019] Amiya Kumar Pattanayak, Anand Prakash and R. P. Mohanty, "Risk analysis of estimates for cost of quality in supply chain: a case study", production planning & control, January 2019.

[PIN, 2004] Pinto, E.G. "Supply Chain Optimization Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms". Department of Industrial and Manufacturing Engineering, the Pennsylvania State University, University Park 16802, pp. 15-26, 2004.

[PIS, 2010] Pishvaee, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W. "A Memetic Algorithm for Bi-Objective Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design". Computers & Operations Research, **37**, pp. 1100-1112, 2010.

[PLU, 1987] J. Plunkett and B. Dale, "A review of the literature on quality-related costs," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 4, pp. 40-52, 1987.

[PLU, 1988] Plunkett and B. Dale, "Quality costs: a critique of some economic cost," International Journal of Production Research, vol. 26, pp. 1713-1726, 1988.

[POR, 1992] L. Porter and P. Rayner, "Quality costing for total quality management," International Journal of Production Economics, vol. 27, pp. 69-81, 1992.

[PUC, 2005] J. Puchinger et G. R. Raidl. « Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: A survey and classification", in proceedings of the first international work-coriference on the interplay between natural and artificial computation. Springer (Ed), Las Palmas, Spain, LNCS, pp. 41–53, 2005.

[PYK, 1993] Pyke, D.F. and Cohen, M.A. "Performance Characteristics of Stochastic Integrated Production-Distribution Systems". European Journal of Operational Research, **68**, pp. 23-48, 1993. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)90075-X

[RAD, 2013] Radhakrishnan Perumalsamy , Jeyanthi Natarajan, "Particle Swarm Optimization Model for Dynamic Supply Chain Inventory Optimization involving Lead Time", IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management, Vol. 16 Issue 5, September 2013.

[RAJ, 2012] Rajeshwar S. Kadadevaramath , Jason C.H. Chen , B. Latha Shankar , K. Rameshkumar, "Application of particle swarm intelligence algorithms in supply chain network architecture optimization", Expert Systems with Applications 39 pp.10160–10176, 2012.

[RAS, 2015] C. Raßfeld, F. Behmer, M. Dürlich and R. Jochem, "Do quality still matter," Total Quality Management, vol. 26, pp. 1071-1082, 2015.

[RAZ, 2011] Noraini Mohd Razali, John Geraghty, "Genetic Algorithm performnace with different selection strategies in solving TSP", Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.

[REH, 2018] Rehacek Petr, "Costs of quality or quality costs", International Journal of Advanced and Applied Sciences, 5(2), pp. 8-13, 2018.

[REZ, 2007] Reza, Z.F. and Mahsa, E. "A Genetic Algorithm to Optimize the Total Cost and Service Level for Just-in-Time Distribution in a Supply Chain". International Journal of Production Economics, **111**, pp.229-243, 2007.

[RON, 2011] Aiying Rong, "An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain", Int. J. Production Economics vol., pp.131, 421–429, 2011.

[ROO,2003] Pascal ROOS, « Les systèmes d'informations, leviers de la performance logistique de l'entreprise » Creg.ac-versailles.fr 2003.

[ROS, 1977] Ross, D.T. "Structured Analysis (SA): A Language for Communicating" Ideas. IEEE Transactions on Software Engineering, **3**, pp.16-34, 1977. http://dx.doi.org/10.1109/TSE.1977.229900

[RUI, 2011] Rui, T.S., Songsong, L., Lazaros, G.P. and Nilay, S. "Global Supply Chain Planning for Pharmaceuticals". Chemical Engineering Research and Design, **8**, pp. 2396-2409, 2011.

[SAI, 1999] Sait, H. Youssef, "Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering: Solving Combinatorial Optimization Problems", IEEE Computer Society, 5.1, 2011.

[SAN, 1994] D. Sandoval-Chávez, "A topological case study of the cost of quality in a continuous process manufacturing environment", El Paso, Texas: University of Texas, 1994 B. Dale and J. Plunkett, Quality costing, UK: Springer, 1991.

[SAN, 1998] Sandoval-Chavez, D.A. and Beruvides, M.G. "Using Opportunity Costs to Determine the Cost of Quality: A Case Study in a Continuous-Process Industry". Engineering Economist, **43**, pp.107-124, 1998.

[SCH, 2006] Schiffaureova and V. Thompson, "A review of research on cost of quality models and best practices," International Journal of Quality and Reliability Management, vol. 23, no. 6, pp. 647-669, 2006.
http://dx.doi.org/10.1108/02656710610672470

[SEY, 2014] Seyed, H. and Reza, P. "Two Metaheuristics to Solve a Multi-Item Multiperiod Inventory Control Problem under Storage Constraint and Discounts". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **69**, pp. 1671-1684, 2014.

[SHA, 2013] Shahrooz, S., Payam, C. and Ahmad, A. "Designing an Integrated Multi-objective Supply Chain Network Considering Volume Flexibility". Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, Vol. II, San Francisco, pp. 23-25 October 2013.

[SHI, 2010] Andre Luıs Shiguemotoaand, Vinıcius Amaral Armentano, "A tabu search procedure for coordinating production,inventory and distribution routing problems", Intl. Trans. in Op. Res. 17, pp.179–195, 2010.

[SOU, 2009] Sourirajan, K., Ozsen, L. and Uzsoy, R. "A Genetic Algorithm for a Single Product Network Design Model with Lead Time and Safety Stock Considerations". European Journal of Operational Research, **197**, pp. 599-608, 2009.

[SOW, 2002] V. Sower and R. Quarles, "Cost of quality usage and its relationship to quality systems maturity," Center for Business and Economic Development, Sam Houston State University, 2002.

[SRI, 2008] S. Srivastava, "Towards estimating cost of quality in supply chain," Total Quality Management, vol. 19, no. 3, pp. 193-208, 2008.

[SUR, 2009] Surace, R., De Filippis, L. A. C., Ludovico, A. D., & Boghetich, G. " Application of Taguchi method for the multi-objective optimization of aluminium foam manufacturing parameters". International Journal of Material Forming, 3(1), pp. 1–5, 2009.doi:10.1007/s12289-009-0409-9

[SVO, 1991] Svoronos, A. and Zipkin, P. "Evaluation of One-for-One Replenishment Policies for Multi-Echelon Inventory Systems". Management Science, **37**, pp. 68-83, 1991.
http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.37.1.68

[SYA, 2002] Syarif, A., Yun, Y.S. and Gen, M. "Study on Multi-Stage Logistics Chain Network: A Spanning Tree-Based Genetic Algorithm Approach". Computers & Industrial Engineering, **43**, pp. 299-314, 2002.

[SYA, 2005] Syarif, A. "Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Time Period Production/Distribution Planning". Computers & Industrial Engineering, **48**, pp. 799-809, 2005.

[TAT, 1996] Tatikonda, L.U. and Tatikonda, R.J. "Measuring and Reporting the Cost of Quality". Production and Inventory Management Journal, **37**, pp. 1-7, 1996.

[TOW, 1991] Towill, D.R. "Supply Chain Dynamics. International", Journal of Computer Integrated Manufacturing, **4**, pp. 197-208, 1991. http://dx.doi.org/10.1080/09511929108944496

[TSA, 1998] Tsai, W.H. "Quality Cost Measurement under Activity-Based Costing". International Journal of Quality and Reliability Management, **15**, pp.719-752, 1998. http://dx.doi.org/10.1108/02656719810218202.

[TSA, 2013] Yu-Chung Tsao, "Designing a Fresh Food Supply Chain Network: An Application of Nonlinear Programming", Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics, pp. 1-8, 2013.

[VAN, 2000] Van der Vorst, J.G.A.J., "Effective food supply chains. Generating, modelling and evaluating supply chain scenarios", PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, 2000.

[VAN, 2005] Van der Vorst, J.G.A.J, "Performance measurment in agri-food supply chain networks. An overview", Quantifying the Agri-food Supply, 2005.

[VAX, 2008] Vaxevanidis, N.M. and Petropoulos, G. "A Literature Survey of Cost of Quality Models". Annals of Faculty of Engineering Hunedoara—Journal of Engeering, **6**, pp. 274-283, 2008.

[VOU, 1996] Voudouris, V.T. "Mathematical Programming Techniques to Debottleneck the Supply Chain of fine Chemical Industries". Computers and Chemical Engineering, **20**, pp. 1269-1274, 1996.
http://dx.doi.org/10.1016/0098-1354(96)00219-0

[WAL, 2016] Gueir, Waleed Abdussalam, "Integrating the Cost of Quality into Multi-Products Multi-Components Supply Chain Network Design", PhD diss., University of Tennessee, 2016.
https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/4138.

[WAN, 2001] Wang, S.K., "Handbook of Air Conditioning and Refrigeration", second ed McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2001.

[WEN, 1999] Weng, Z. K., "Concurrence, postponement and trans-shipment in a two-echelon manufacturing and distribution system". International Journal of Production Research, 37, pp.341– 357, 1999.

[WIL, 1999] Williams, A., Van der Wiele, A., Dale, B. "Quality costing : a managment review". International Journal of management reviews, l (4), pp. 441-460, 1999.

[WON, 2016] Wong, T., Woznow, T., Petrie, M., Murzello, E., Muniak, A., Kadora, A., & Bryce, E. "Postdischarge decontamination of MRSA, VRE, and Clostridium difficile isolation rooms using 2 commercially available automated ultraviolet-C–emitting devices". American Journal of Infection Control, 44, pp.416–420, 2016. doi:10.1016/j.ajic.2015.10.016

[WUS, 1998] Wu, S. D. and Meixell, M. J., "Relating demand behavior and production policies in the manufacturing supply chain". Lehigh University, Bethlehem, PA., 1998

[XIA, 2011] Xia Zhao, "Optimal Design of Agri-food Chain Network: anImproved Particle Swarm Optimization Approach", University of Finance and Economics (No. IFE-2010 T 07) and high school and philosophy social science fund of Jiangsu education department 2011.

[YAS, 2016] Yasamann, K. and Joseph, S. "An Optimization Model for Downstream Petroleum Supply Chain Incorporating Geographic Information System (GIS)". International Journal of Integrated Supply Management, **10**, pp. 151-172, 2016.

[ZAK, 2019] Alameer, Z., Elaziz, M. A., Ewees, A. A., Ye, H., & Jianhua, Z."Forecasting Copper Prices Using Hybrid Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Genetic Algorithms". Natural Resources Research. 28, pp 1385–1401, 2019. doi:10.1007/s11053-019-09473-w.

[ZHA, 2001] Zhao, X., Xie, J. and Lau, R. S. M., "Improving the supply chain performance use of forecasting models versus early order commitments". International Journal of Production Research, 39, pp. 3923–3939, 2001.

[ZHA, 2014] Zhang, Y., & Chen, X. D. ,'An Optimization Model for the Vehicle Routing Problem in Multi-product Frozen Food Delivery". Journal of Applied Research and Technology, 12(2), pp. 239–250, 2014.
DOI: 10.1016/s1665-6423(14)72340-5.

Annexes

Annexe 1 : Table diagonale pour le calibrage des paramètres de l'AG

pop_size	max_iter	Pc	Pm	COQ
100	300	0.1	0.2	24996
100	500	0.4	0.4	24996
100	20	0.7	0.7	24986
400	300	0.1	0.2	25007
400	500	0.4	0.4	24981
400	20	0.7	0.7	24975
600	300	0.1	0.2	24975
600	500	0.4	0.4	24990
600	20	0.7	0.7	24981

Annexe 2 : Table diagonale pour calibrage des paramètres de la sélection Tournoi

Pop_size	Max_iter	Pc	Pm	t	s	coût	RAPPORT SB1
100	20	0,1	0,2	5	2	15878,89	-84,0164028
100	20	0,1	0,2	10	5	15822,89	-83,98571618
100	20	0,1	0,2	15	10	15947,54	-84,053874
100	300	0,4	0,4	5	2	15893,93	-84,02462592
100	300	0,4	0,4	10	5	16284,7	-84,23559525
100	300	0,4	0,4	15	10	15817,14	-83,98255917
100	500	0,7	0,7	5	2	15751,62	-83,94650452
100	500	0,7	0,7	10	5	15756,35	-83,94911239
100	500	0,7	0,7	15	10	15780,68	-83,96251427
400	20	0,4	0,7	5	5	15828,14	-83,98859766
400	20	0,4	0,7	10	10	16492,99	-84,34598791
400	20	0,4	0,7	15	2	15811	-83,97918677
400	300	0,7	0,2	5	5	15757,92	-83,94997783
400	300	0,7	0,2	10	10	15788,84	-83,96700447
400	300	0,7	0,2	15	2	15741,3	-83,94081192
400	500	0,1	0,4	5	5	15759	-83,95057311
400	500	0,1	0,4	10	10	15764	-83,95332852
400	500	0,1	0,4	15	2	15746	-83,94340494
600	20	0,7	0,4	5	10	16015,56	-84,09084258
600	20	0,7	0,4	10	2	15809,43	-83,97832424
600	20	0,7	0,4	15	5	15793,39	-83,9695072
600	300	0,1	0,7	5	10	16056	-84,11274719
600	300	0,1	0,7	10	2	15741	-83,94064638
600	300	0,1	0,7	15	5	15751	-83,94616263
600	500	0,4	0,2	5	10	15945,37	-84,05269202
600	500	0,4	0,2	10	2	15741,3	-83,94081192
600	500	0,4	0,2	15	5	15746,46	-83,94365869

Tableau des réponses pour les rapports signal/bruit

Préférer plus petit

Niveau	**Pop_size**	**Max_iter**	**Pc**	**Pm**	**t**	**s**
1	-84,02	-84,05	-83,99	-83,98	-84,01	-83,97
2	-84,00	-84,01	-84,05	-84,01	-84,03	-83,99
3	-84,00	-83,96	-83,97	-84,02	-83,97	-84,06
Delta	0,02	0,09	0,08	0,04	0,06	0,09
Rang	6	2	3	5	4	1

Annexe 3: Programme CPLEX

```
/*********************************************
 * OPL 12.6.0.0 Model
 * Author: HP
 * Creation Date: 20 Juillet. 2019 at 13:27:36
*********************************************/
using CP;
int T=1;
range Period=1..T;

int P=3;
range produ=1..P;
dvar boolean Z[p in produ];

int D=3;
range storage=1..D;
dvar boolean X[d in storage];

int Y=3;
range transport=1..Y;
dvar boolean O[y in transport];

int R=3;
range retail=1..R;
dvar boolean Rr[r in retail];


//-------------------------------------------------------------


float Ppt[produ];// cost for producing one product

// cost of quality parameters
float Cp_var[produ];
float Ca_fix[produ];
float CA_var[produ];
float Cif_fix[produ];
float Cs[produ];
float CEF_=150;


float alpha_p [produ];

execute{
for(var i in produ){
       Ppt[i]=0.21;
       Cp_var[i]=2.5;
       alpha_p[i]=2;
       CA_var[i]=2.5;
       Ca_fix[i]=1.8;
       Cs[i]=2.7;
       Cif_fix[i]=3.4;
}

writeln
("Ppt  =  ",Ppt);
writeln
```

```
("Ca_fix  =  ",Ca_fix);

writeln
("Cif_fix  =  ",Cif_fix);
writeln
("Cs  =  ",Cs);


}


float g2[storage];// cost for storing one product
float g1[storage];// cooling cost for storage

float delta_qdk[storage];
float beta_d[storage];
execute{
for(var i in storage){
       g2[i]=2.3;
       g1[i]=3.2;
       delta_qdk[i]=3;
       beta_d[i]=2;
}

writeln
("g2  =  ",g2);
writeln
("g1  =  ",g1);
writeln
("delta_qdk  =  ",delta_qdk);
writeln
("alpha_p  =  ",alpha_p);
writeln
("beta_d  =  ",beta_d);

}

float rck=...;
float gamma=...;
float delta_qyk[transport];
float fdr[transport];
execute{
for(var i in transport){
       fdr[i]=0.9;
       delta_qyk[i]=2;
}
writeln
("fdr  =  ",fdr);
writeln
("delta_qyk  =  ",delta_qyk);
}

int apt[Period][produ];
int Demand[Period];

float QL_min[Period];
float QL_max[Period];

dvar int Wpd [t in Period][p in produ];
execute {
for(var i in Period){
       Demand[i]=500;
       QL_min[i]=10;
       QL_max[i]=98;
```

```
        for(var j in produ){

        //Wpd[i][j]=Opl.round((1451-1450)*Opl.rand(100)/100+1450);
        apt[i][j]=1450;
}
}

writeln
("Demand  =  ",Demand);
writeln
("QL_min  =  ",QL_min);
writeln
("QL_max  =  ",QL_max);
writeln
("Wpd  =  ",Wpd);
writeln
("apt  =  ",apt);

}

int bdt[Period][storage];
dvar int Wdr [t in Period][d in storage];

execute{
for(var i in Period){

        for(var j in storage){

        //Wdr[i][j]=Opl.round(((1301-1300)*Opl.rand(100)/100)+1300);
        bdt[i][j]=1450;

}
}
writeln
("Wdr  =  ",Wdr);
writeln
("bdt  =  ",bdt);

}

dexpr float Op_cost_1=sum(t in Period,p in produ)(Ppt[p]*Wpd[t][p]*Z[p]);
dexpr float Op_cost_2=sum(t in Period,d in storage)(g2[d]*Wdr[t][d]*X[d]);


dexpr float transport_cost=sum(t in Period,d in storage,y in
transport)(fdr[y]*Wdr[t][d]*O[y]);

dexpr float Cp=sum(d in storage)(g1[d]*X[d])+sum(t in Period,p in produ,d in
storage)(Wpd[t][p]*Cp_var[p]*(1-alpha_p[p]/100)*(1-delta_qdk[d]/100)*Z[p]*X[d]);
dexpr float CA=sum(p in produ)(Ca_fix[p]*Z[p])+sum(t in Period,p in produ,d in
storage)(Wpd[t][p]*CA_var[p]*(1-beta_d[d]/100)*Z[p]*X[d]);
dexpr float CIF=sum(p in produ)(Cif_fix[p]*Z[p])+sum(t in Period,p in produ,d in
storage)(Wpd[t][p]*g2[d]*(1-beta_d[d]/100)*(1-
alpha_p[p]/100)*delta_qdk[d]/100*Z[p]*X[d])+sum(t in Period,p in produ,d in
storage)(Wpd[t][p]*(g2[d]+Cs[p])*(1-beta_d[d]/100)*(alpha_p[p]/100)*Z[p]*X[d]);

dexpr float CEF1=sum(t in Period,d in storage,y in transport,p in produ)((Wdr[t][d])*(1-
alpha_p[p]/100)*(delta_qyk[y]/100)*(1-delta_qdk[d]/100))*X[d]*Z[p]*O[y];
dexpr float CEF2=sum(t in Period,d in storage,p in produ)((beta_d[d]/100)*((1-
alpha_p[p]/100)*(delta_qdk[d]/100)+alpha_p[p]/100)*X[d]*Z[p]);

dexpr float CEF=CEF_*(CEF1+CEF2);

dexpr float cout_optimal=Op_cost_1+Op_cost_2+transport_cost+Cp+CA+CIF+CEF;
//demand_rt=300;
```

```
dexpr float Qlevel_1[t in Period]=sum(d in storage,y in transport,p in produ)(((((1-
delta_qyk[y]/100)*Wdr[t][d]*(1-alpha_p[p]/100)*(1-delta_qdk[d]/100)*Z[p]*X[d]*O[y])))));
dexpr float Qlevel_2[t in Period]=sum(d in storage)(Wdr[t][d]*X[d]);
dexpr float Qlevel[t in Period]=Qlevel_1[t]/Qlevel_2[t]*100;
//dexpr float aa=sum(t in Period,p in produ) Wpd[t][p]*Z [p];

minimize cout_optimal;
subject to
	{

		ctUsine:
	forall(p in produ)
	sum(p in produ)Z[p]==1;
	ctStokage:
	forall(d in storage)
	sum(d in storage)X[d]==1;
	cttransport:
	forall(y in transport)
	sum(y in transport)O[y]==1;
	ctdetaillant:
	forall(r in retail)
	sum(r in retail)Rr[r]==1;

		forall(t in Period)
		ctDemand:
			sum(d in storage)
				Wdr[t][d]*X[d]>=Demand[t];

		forall(t in Period)
		ctEquality:
			sum(p in produ)Wpd[t][p]*Z[p]>=sum(d in storage)Wdr[t][d]*X[d];



		forall(t in Period)
		ctProdCapacity:
			sum(p in produ)Wpd[t][p]*Z[p]<=sum(p in produ)apt[t][p]*Z[p];



		forall(t in Period)
		ctStorageCapacity:
			sum(d in storage)Wdr[t][d]*X[d]<=sum(d in storage)bdt[t][d]*X[d];




		forall(t in Period)
		ctQuality_min:
		Qlevel[t]>=QL_min[t];
		forall(t in Period)
		ctQuality_max:
		Qlevel[t]<=QL_max[t];

		//forall(d in storage)
		//ctdelta_qd_min:
			//delta_qdk[d]>=5;
		//forall(d in storage)
		//ctdelta_qd_max:
			//delta_qdk[d]<=99;

		forall(y in transport)
		ctdelta_qy_min:
			delta_qyk[y]>=2;
```

```
                forall(y in transport)
                ctdelta_qy_max:
                        delta_qyk[y]<=90;

                forall(p in produ)
                ctdalpa_min:
                        alpha_p[p]>=2;
                forall(p in produ)
                ctdalpa_max:
                        alpha_p[p]<=20;



                forall(t in Period, d in storage)
                ctWdr_max:

                                sum(d in storage)Wdr[t][d]*X[d]<=1350;

                forall(t in Period,p in produ)
                ctWpd_min:
                        forall(p in produ)
                                sum(p in produ)Wpd[t][p]*Z[p]>=1400;


                forall(t in Period,d in storage)
                ctWpd_max:
                        forall(p in produ)
                                sum(p in produ)Wpd[t][p]<=1430;

                forall(t in Period, d in storage)
                ctWdr_min:
                        forall(d in storage)
                                Wdr[t][d]>=1300;


        }
dexpr float delta_qdk_opt[d in storage]=delta_qdk[d]*X[d];
dexpr float delta_qyk_opt[y in transport]=delta_qyk[y]*O[y];
dexpr float alpha_p_opt[p in produ]=alpha_p[p]*Z[p];


execute
{
writeln
("Qlevel  =  ",Qlevel);
writeln
("delta_qdk_opt  =  ",delta_qdk_opt);
writeln
("X  =  ",X);
writeln
("delta_qyk_opt  =  ",delta_qyk_opt);
writeln
("O  =  ",O);
writeln
("alpha_p_opt  =  ",alpha_p_opt);
writeln
("Z  =  ",Z);

writeln
("Cp  =  ",Cp);
}
```

Annexe 4 : Table de Student

TABLE 8	FRACTILES de la LOI de STUDENT									
α / ν	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995
1	0,3249	0,7265	1,3764	3,0777	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	318,2888	636,5776
2	0,2887	0,6172	1,0607	1,8856	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	22,3285	31,5998
3	0,2767	0,5844	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	10,2143	12,9244
4	0,2707	0,5686	0,9410	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	7,1729	8,6101
5	0,2672	0,5594	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	5,8935	6,8685
6	0,2648	0,5534	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	5,2075	5,9587
7	0,2632	0,5491	0,8960	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	4,7853	5,4081
8	0,2619	0,5459	0,8889	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	4,5008	5,0414
9	0,2610	0,5435	0,8834	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	4,2969	4,7809
10	0,2602	0,5415	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	4,1437	4,5868
11	0,2596	0,5399	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	4,0248	4,4369
12	0,2590	0,5386	0,8726	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	3,9296	4,3178
13	0,2586	0,5375	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	3,8520	4,2209
14	0,2582	0,5366	0,8681	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	3,7874	4,1403
15	0,2579	0,5357	0,8662	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	3,7329	4,0728
16	0,2576	0,5350	0,8647	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	3,6861	4,0149
17	0,2573	0,5344	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,6458	3,9651
18	0,2571	0,5338	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,6105	3,9217
19	0,2569	0,5333	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,5793	3,8833
20	0,2567	0,5329	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,5518	3,8496
21	0,2566	0,5325	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,5271	3,8193
22	0,2564	0,5321	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,5050	3,7922
23	0,2563	0,5317	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,4850	3,7676
24	0,2562	0,5314	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,4668	3,7454
25	0,2561	0,5312	0,8562	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,4502	3,7251
26	0,2560	0,5309	0,8557	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,4350	3,7067
27	0,2559	0,5306	0,8551	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,4210	3,6895
28	0,2558	0,5304	0,8546	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,4082	3,6739
29	0,2557	0,5302	0,8542	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,3963	3,6595
30	0,2556	0,5300	0,8538	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,3852	3,6460
31	0,2555	0,5298	0,8534	1,3095	1,6955	2,0395	2,4528	2,7440	3,3749	3,6335
32	0,2555	0,5297	0,8530	1,3086	1,6939	2,0369	2,4487	2,7385	3,3653	3,6218
33	0,2554	0,5295	0,8526	1,3077	1,6924	2,0345	2,4448	2,7333	3,3563	3,6109
34	0,2553	0,5294	0,8523	1,3070	1,6909	2,0322	2,4411	2,7284	3,3480	3,6007
35	0,2553	0,5292	0,8520	1,3062	1,6896	2,0301	2,4377	2,7238	3,3400	3,5911
36	0,2552	0,5291	0,8517	1,3055	1,6883	2,0281	2,4345	2,7195	3,3326	3,5821
37	0,2552	0,5289	0,8514	1,3049	1,6871	2,0262	2,4314	2,7154	3,3256	3,5737
38	0,2551	0,5288	0,8512	1,3042	1,6860	2,0244	2,4286	2,7116	3,3190	3,5657
39	0,2551	0,5287	0,8509	1,3036	1,6849	2,0227	2,4258	2,7079	3,3127	3,5581
40	0,2550	0,5286	0,8507	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	3,3069	3,5510
50	0,2547	0,5278	0,8489	1,2987	1,6759	2,0086	2,4033	2,6778	3,2614	3,4960
60	0,2545	0,5272	0,8477	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603	3,2317	3,4602
70	0,2543	0,5268	0,8468	1,2938	1,6669	1,9944	2,3808	2,6479	3,2108	3,4350
80	0,2542	0,5265	0,8461	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	3,1952	3,4164
90	0,2541	0,5263	0,8456	1,2910	1,6620	1,9867	2,3685	2,6316	3,1832	3,4019
100	0,2540	0,5261	0,8452	1,2901	1,6602	1,9840	2,3642	2,6259	3,1738	3,3905
200	0,2537	0,5252	0,8434	1,2858	1,6525	1,9719	2,3451	2,6006	3,1315	3,3398
500	0,2535	0,5247	0,8423	1,2832	1,6479	1,9647	2,3338	2,5857	3,1066	3,3101
∞	0,2533	0,5244	0,8416	1,2816	1,6449	1,9600	2,3264	2,5758	3,0902	3,2905