



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

N° d'ordre : 67/2020

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mr : Yassine EL KHAYYAM

Spécialité : *Génie Industriel*

Sujet de la thèse : Contribution au pilotage de la performance et à la planification intégrée de la chaîne logistique

Thèse présentée et soutenue le Vendredi 20 Novembre 2020 à 10h devant le jury composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Mohammed EL HAMMOUMI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Abdelhamid EL AMRI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique Casablanca	Rapporteur
El Hassan EL KINANI	PES	Faculté des Sciences Meknès	Rapporteur
Abdelali EN-NADI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Anas CHAFI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examineur
Abdeljabar KHELLOUKI	PH	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Meknès	Examineur
Brahim HERROU	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : **Techniques Industrielles**

Etablissement : **Faculté des Sciences et Techniques, Fès**



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

Résumé de la thèse

Dans une conjoncture où la concurrence est de plus en plus rude et l'environnement socioéconomique est instable, les entreprises sont amenées davantage à améliorer la qualité de leurs produits finis et le niveau de service qu'elles offrent, elles sont aussi amenées à optimiser les coûts et les délais au niveau de toute la chaîne logistique à laquelle elles font partie, dans cette situation, le pilotage intégré de la chaîne logistique s'avère nécessaire. Nous traitons dans cette thèse deux briques essentielles du pilotage intégré qui sont les tableaux de bord de pilotage intégré et la planification intégrée de la chaîne logistique.

L'objectif des tableaux de bord de pilotage intégré est de mettre en place des systèmes de pilotage efficaces qui permettent d'un côté de piloter la performance (gérer la contre-performance : « risques normaux ») et de l'autre côté de gérer les risques « anormaux » (perturbation, incidents, accidents de travail, ...). Nous proposons dans le cadre de cette thèse une démarche pour construire un système de pilotage qui assure un alignement entre le contexte global de la chaîne logistique, la stratégie adoptée, les risques liés à la chaîne logistique et les indicateurs de performance. Nous introduisons également une nouvelle méthode de prise de décision en groupe, la méthode CCAHP qui est une forme hybride de la méthode d'analyse multicritère AHP qui intègre à la fois l'intelligence collective et artificielle.

En ce qui concerne la planification intégrée de la chaîne logistique, nous introduisons une nouvelle méthode permettant la planification des besoins de la production et de la logistique liée aux approvisionnements et à la distribution en prenant en considération la capacité finie des différents moyens faisant partie de la chaîne logistique (unités de production, moyens de transport), cette méthode est le MLRP. La méthode MLRP permet aux planificateurs des chaînes logistiques de déterminer à l'avance, pour tout l'horizon de planification, les ordres de fabrication, les commandes à envoyer aux fournisseurs et les ordres de transport à lancer ainsi que les tournées de véhicules pour les opérations de ramassage des matières premières et les opérations de distribution des produits finis. Pour les tournées de véhicules, nous avons implémenté les principales heuristiques constructives utilisées pour la résolution des problèmes de tournées des flottes de véhicules hétérogènes.

Mots clés : Chaîne Logistique, Performance, Risque, Analyse multicritère ; Prise de décision en groupe, K-means, SCRPM, CCAHP, MRP, VRP, Planification de la production, Planification des transports, Intégration, MLRP, Solveur.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement mon Directeur de Thèse, le Pr. B. Herrou. Je le remercie de ces heures d'encadrement et de discussion qui m'ont guidé jusqu'à l'aboutissement du présent travail. Je le remercie également pour son écoute et sa sympathie ainsi que pour son soutien, ses conseils et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la préparation de cette thèse.

Je remercie également le Pr. M. El Hammoumi, Directeur du Laboratoire techniques Industrielles, ainsi que le Pr. M. Ijaali, doyen de la Faculté de Sciences et Techniques de Fès, de m'avoir donné l'opportunité de m'inscrire au Centre d'Etudes Doctorales au sein de leurs prestigieux laboratoire et établissement.

Je tiens spécialement à remercier chaleureusement les membres du jury, un à un, d'avoir accepté de rapporter et d'examiner nos travaux et de s'être déplacé au Maroc ou à Fès, en souhaitant être à la hauteur de leurs attentes.

N'oublions pas de remercier aussi les administrateurs et responsables des différents services de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, du travail très professionnel et de la qualité des services qu'ils procurent à l'ensemble des intervenants de la faculté et des différents laboratoires de recherche de l'établissement.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ces travaux.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille qui m'a soutenue et encouragée au cours de toutes mes années passées et qui continue à le faire.

Résumé

Dans une conjoncture où la concurrence est de plus en plus rude et l'environnement socioéconomique est instable, les entreprises sont amenées davantage à améliorer la qualité de leurs produits finis et le niveau de service qu'elles offrent, elles sont aussi amenées à optimiser les coûts et les délais au niveau de toute la chaîne logistique à laquelle elles font partie, dans cette situation, le pilotage intégré de la chaîne logistique s'avère nécessaire. Nous traitons dans cette thèse deux briques essentielles du pilotage intégré qui sont les tableaux de bord de pilotage intégré et la planification intégrée de la chaîne logistique.

L'objectif des tableaux de bord de pilotage intégré est de mettre en place des systèmes de pilotage efficaces qui permettent d'un côté de piloter la performance (gérer la contre-performance : « risques normaux ») et de l'autre côté de gérer les risques « anormaux » (perturbation, incidents, accidents de travail, ...). Nous proposons dans le cadre de cette thèse une démarche pour construire un système de pilotage qui assure un alignement entre le contexte global de la chaîne logistique, la stratégie adoptée, les risques liés à la chaîne logistique et les indicateurs de performance. Nous introduisons également une nouvelle méthode de prise de décision en groupe, la méthode CCAHP qui est une forme hybride de la méthode d'analyse multicritère AHP qui intègre à la fois l'intelligence collective et artificielle.

En ce qui concerne la planification intégrée de la chaîne logistique, nous introduisons une nouvelle méthode permettant la planification des besoins de la production et de la logistique liée aux approvisionnements et à la distribution en prenant en considération la capacité finie des différents moyens faisant partie de la chaîne logistique (unités de production, moyens de transport), cette méthode est le MLRP. La méthode MLRP permet aux planificateurs des chaînes logistiques de déterminer à l'avance, pour tout l'horizon de planification, les ordres de fabrication, les commandes à envoyer aux fournisseurs et les ordres de transport à lancer ainsi que les tournées de véhicules pour les opérations de ramassage des matières premières et les opérations de distribution des produits finis. Pour les tournées de véhicules, nous avons implémenté les principales heuristiques constructives utilisées pour la résolution des problèmes de tournées des flottes de véhicules hétérogènes.

Mots-clés : Chaîne Logistique, Performance, Risque, Analyse multicritère ; Prise de décision en groupe, K-means, SCRPM, CCAHP, MRP, VRP, Planification de la production, Planification des transports, Intégration, MLRP, Solveur.

Abstract

In an environment where competition is increasingly tough and the socio-economic environment is unstable, companies are increasingly required to improve their finished products quality and the service level that they offer, they are also required to optimize costs and lead times throughout the supply chain to which they are part, in this situation, integrated supply chain management is necessary. In this thesis, we deal with two essential building blocks of integrated management, which are integrated management dashboards and integrated supply chain planning.

The objective of integrated management dashboards is to put in place effective management systems which make it possible on the one hand to manage performance (manage poor performance: “normal risks”) and on the other to manage “abnormal” risks (disruption, incidents, work accidents, etc.). As part of this thesis, we propose an approach to build a management system that ensures alignment between the overall context of the supply chain, the adopted strategy, supply chain risks and performance indicators. We are also introducing a new method of group decision-making, the CCAHP method that is a hybrid form of the AHP multicriteria analysis method, which integrates both collective and artificial intelligence.

Regarding the integrated supply chain planning, we are introducing a new method allowing production planning and logistics planning (related to supplies and distribution) taking into account finite capacity of the various means that are part of the supply chain (production units, means of transport), this method is the MLRP. The MLRP method allows supply chain planners to determine in advance, for the entire planning horizon, the production orders, the orders to be sent to suppliers and the transport orders to be issued, as well as the vehicle routes for raw material collection and finished product distribution. For vehicles routing, we have implemented the main constructive heuristics used for solving routing problems of heterogeneous vehicle fleets.

Keywords: Supply Chain, Performance, Risk, Multi-criteria analysis; Group Decision Making, K-means, SCRPM, CCAHP, MRP, VRP, Production Planning, Transportation Planning, Integration, MLRP, Solver.

Table des matières

Remerciements	
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Liste des Figures	vii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Abréviations	x
Introduction générale	1
Partie I - Management de la Chaîne Logistique : Pilotage des performances et gestion des risques.....	5
Chapitre I : Le pilotage de la performance et la gestion des risques liés à la chaîne logistique.....	6
I.1 Introduction	7
I.2 La chaîne logistique et le management de la chaîne logistique	7
I.2.1 La chaîne logistique-le supply chain.....	8
I.2.2 La gestion de la chaîne logistique- le Supply chain Management	9
I.3 Les stratégies de gestion des chaînes logistiques.....	10
I.3.1 Les stratégies de la chaîne logistique.....	10
I.3.2 Le lien entre la stratégie et la mesure de la performance	13
I.4 Pilotage de la performance des chaînes logistiques.....	15
I.4.1 La performance des différents maillons de la chaîne logistique.....	15
I.4.2 Les systèmes de mesure de performance de la chaîne logistique	17
I.4.3 Les indicateurs de performance de la chaîne logistique	20
I.4.3 Discussion.....	22
I.5 Gestion des risques liés à la chaîne logistique	23
I.5.1 La gestion des risques	23
I.5.2 La gestion des risques liés à la chaîne logistique	24
I.5.2.1 L'identification et la catégorisation des risques.....	25
I.5.2.2 L'analyse et l'évaluation des risques	26
I.5.2.3 Le traitement des risques	27
I.6 Conclusion.....	31
Chapitre II : Proposition d'une méthode collaborative d'analyse multicritère : CCAHP..	32
II.1 Introduction	33
II.2 Les méthodes de prise de décision multicritère et le processus d'analyse hiérarchique (AHP) 33	
II.2.1 Les méthodes de prise de décision multicritère	33
II.2.2 Le processus d'analyse hiérarchique (AHP)	36
II.3 La prise de décision en groupe et le processus d'élaboration du consensus	38
II.3.1 La prise de décision en groupe.....	38

II.3.2	Le processus d'élaboration du consensus.....	40
II.4	Les méthodes de classification/regroupement	41
II.4.1	Les méthodes de classification.....	41
II.4.2	La méthode des centres mobiles	42
II.5	La méthode collaborative d'analyse multicritère proposée : CCAHP	43
II.6	Etude de cas : la réévaluation des fournisseurs en groupe	47
II.6.1	La mise en situation	47
II.6.2	La problématique	48
II.6.3	La mise en application du modèle proposé et la résolution de la problématique	49
II.7	Conclusion.....	55
Chapitre III : Conception des Tableaux de bord de pilotage intégré des performances et des risques de la chaine logistique.....		56
III.1	Introduction	57
III.2	Modèle proposé pour le pilotage intégré des performances et des risques de la chaine logistique.....	57
III.2.1	La relation entre la gestion des risques et le pilotage de la performance.....	57
III.2.2	Démarche proposée pour la construction d'un tableau de bord de pilotage intégré de la chaine logistique.....	60
III.3	Etude de cas : conception d'un tableau de bord pour une industrie	67
III.3.1	La mise en situation	67
III.3.2	La mise en application de la démarche proposée pour la conception de tableau de bord	69
III.4	Conclusion.....	75
Partie II - Planification intégrée de la Production et de la Logistique : Proposition d'un solveur industriel		76
Chapitre IV : Concepts généraux et état de l'art relatifs à la planification de la chaine logistique.....		77
IV.1	Introduction	78
IV.2	Les interactions au sein de la chaine logistique.....	79
IV.2.1	Les modes de pilotage de la production.....	80
IV.2.2	Les interactions entre processus selon le mode de production	82
IV.3	La planification des besoins de la production.....	83
IV.3.1	Les systèmes de production de type MRP	83
IV.3.1.1	La genèse du MRP	83
IV.3.1.2	La Nomenclature, élément essentiel pour le MRP	84
IV.3.1.3	L'algorithme MRP	85
IV.3.2	Les limites et l'évolution du MRP	86
IV.4	La planification des besoins de la logistique.....	88
IV.4.1	Le problème de tournées des véhicules	88
IV.4.2	Les variantes du problème de tournées des véhicules.....	90
VI.3.1	La résolution des problèmes de tournées des véhicules.....	90
IV.5	Conclusion.....	94

Chapitre V : Modèle proposé pour la planification intégrée de la production et de la logistique - MLRP	95
V.1 Introduction	96
V.2 Nomenclature adaptée au MLRP	96
V.3 Planification des tournées de flottes des véhicules : implémentation et comparaison des heuristiques constructives	99
V.3.1 Définition et implémentation des problèmes de tournées des flottes de véhicules (HFVRP) ...	99
V.3.1.1 L'algorithme des économies pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP	101
V.3.1.2 L'algorithme « Cluster First Route Second » pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP	103
V.3.1.3 L'algorithme « Route First Cluster Second » pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP	105
V.3.2 Comparaison des performances des heuristiques constructives implémentées pour les problèmes CVRP et HFVRP	106
V.4 Le Modèle MLRP	117
V.5 Conclusion.....	122
Chapitre VI : SMLRP, outil de la planification intégrée de la production et de la logistique - Modélisation de l'outil et étude de cas	123
VI.1 Introduction	124
VI.2 Modélisation d'un système d'information	124
VI.2.1 Les méthodes de modélisation des systèmes d'information	124
VI.2.1.1 La modélisation	124
VI.2.1.2 Les méthodes de modélisation d'un système d'information	125
VI.2.2 Le langage de modélisation unifié : UML.....	127
VI.2.2.1 L'approche orienté objet.....	127
VI.2.2.2 Les diagrammes UML	128
VI.3 Outil de la planification intégrée de la production et de la logistique : SMLRP	129
VI.3.1 Les Spécifications fonctionnelles de l'outil	129
VI.3.2 Modélisation UML	131
VI.3.2.1 Diagrammes des cas d'utilisation et IHM associées	131
VI.3.2.2 Diagramme de séquences	135
VI.4 Etude de cas : planification de la production du transport pour une unité industrielle d'assemblage et de vente des transpalettes	137
VI.4.1 Les entrées du SMLRP relatives à l'étude de cas	137
VI.4.1 Les Sorties du solveur SMLRP	139
VI.5 Conclusion.....	142
Conclusion générale et Perspectives.....	143
Liste des Travaux :.....	147
Références bibliographiques :.....	149

Liste des Figures

FIGURE I- 1 CATEGORIES DES CHAINES LOGISTIQUES	8
FIGURE I-2 LIEN ENTRE LA STRATEGIE ET LES INDICATEURS DE PERFORMANCE	14
FIGURE I- 3 TRIANGLE D'OR DU PILOTAGE	15
FIGURE I- 4 LES PROCESSUS DU MODELE SCOR.....	20
FIGURE I- 5 LES ACTIVITES DE LA GESTION DES RISQUES	24
FIGURE II- 1 PROCESSUS DE PRISE DE DECISION MULTICRITERE	34
FIGURE II- 2 LES METHODES D'ANALYSE MULTICRITERES	36
FIGURE II- 3 STRUCTURE GENERIQUE DU PROCESSUS D'ANALYSE HIERARCHIQUE	37
FIGURE II- 4 PROCESSUS D'ELABORATION DE CONSENSUS.....	40
FIGURE II- 5 LOGIGRAMME DE LA METHODE CCAHP	46
FIGURE II- 6 ORGANIGRAMME DE L'ENTREPRISE TSP.....	48
FIGURE II- 7 SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'APPLICATION DE RECUEIL DES JUGEMENTS EN LIGNE.....	50
FIGURE II- 8 PRIORISATION DES CRITERES DE REEVALUATION PAR UNE ENTITE	51
FIGURE III. 1 LA RELATION ENTRE LES RISQUES ET LA MESURE DE LA PERFORMANCE	58
FIGURE III. 2 LA GESTION INTEGREE DE LA PERFORMANCE ET DES RISQUES.....	60
FIGURE III. 3 HIERARCHIE DE PRIORISATION DES RISQUES ET DES INDICATEURS	63
FIGURE III. 4 STRUCTURE HIERARCHIQUE UTILISEE SOUS SUPERDECISION POUR ANALYSE DU CONTEXTE...	67
FIGURE III. 5 PRIORISATION DES FACTEURS CLES DE COMPETITIVITE POUR L'ENTREPRISE ETUDIEE	68
FIGURE III. 6 PRIORISATION DES BESOINS EN NIVEAU MAITRISE PAR PROCESSUS ET PAR FACTEUR CLE DE COMPETITIVITE	68
FIGURE III. 7 ANALYSE DES RISQUES DE L'ENTREPRISE ETUDIEE	70
FIGURE III. 8 PRIORISATION DES KPI DE L'ENTREPRISE ETUDIEE	72
FIGURE IV- 1 MATRICE DE PLANIFICATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE	79
FIGURE IV- 2 LES DIFFERENTS MODES DE PILOTAGE DE PRODUCTION.....	81
FIGURE IV- 3 INTERACTIONS ENTRE LES MAILLONS DE LA CHAINE LOGISTIQUE	82
FIGURE IV- 4 ORGANIGRAMME DU PROCESSUS MRP	84
FIGURE IV- 5 EXEMPLE D'UNE TOURNEE DE VEHICULES	88
FIGURE IV- 6 METHODES DE RESOLUTION DES PROBLEMES DE TOURNEES DE VEHICULES	91
FIGURE V- 1 EXEMPLE DE NOMENCLATURE ADAPTEE AU MLRP	97
FIGURE V- 2 EXEMPLE DES DONNEES XML ET JSON FOURNI AU GENERATEUR DE NOMENCLATURE	98
FIGURE V- 3 FUSION DE DEUX ITINERAIRES.....	101
FIGURE V- 4 ALGORITHME DES ECONOMIES POUR LES PROBLEMES CVRP ET HFVRP	103
FIGURE V- 5 L'ALGORITHME « SWEEP » POUR LA CERATION DES SOUS-GROUPES	104
FIGURE V- 6 ALGORITHME « CFRS » POUR LE CVRP ET LE HFVRP	105
FIGURE V- 7 ALGORITHME « RFCS » POUR LE CVRP ET LE HFVRP	106
FIGURE V- 8 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION, REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	108
FIGURE V- 9 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION, REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	108
FIGURE V- 10 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION, REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	109
FIGURE V- 11 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION, REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	109
FIGURE V- 12 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE, PETITE DISPERSION REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	110

FIGURE V- 13 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE, GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	110
FIGURE V- 14 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE, PETITE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	111
FIGURE V- 15 RESULTATS DE SIMULATIONS CVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE, GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	111
FIGURE V- 16 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	112
FIGURE V- 17 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	112
FIGURE V- 18 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	113
FIGURE V- 19 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET 2π	113
FIGURE V- 20 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	114
FIGURE V- 21 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MAX DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	114
FIGURE V- 22 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET PETITE DISPERSION REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	115
FIGURE V- 23 RESULTATS DE SIMULATIONS HFVRP : DEMANDE MAX=CAP MIN DISPONIBLE ET GRANDE DISPERSION ET REPARTITION DES POINTS AUTOUR DU DEPOT θ ENTRE 0 ET $\pi/2$	115
FIGURE V- 24 L'EVOLUTION DES COUTS EN FONCTION DE LA DIMENSION ET DE LA DEMANDE MAXIMALE PERMISE	116
FIGURE V- 25 EXEMPLE DE CALCUL DES ORDRES PRODUCTION ET DE TRANSPORT	118
FIGURE V- 26 L'ALGORITHME MLRP (CALCUL DES ORDRES DE PRODUCTION ET DE TRANSPORT)	120
FIGURE V- 27 L'ALGORITHME MLRP (PLANIFICATION DES TOURNEES DE VEHICULES)	121
FIGURE VI- 1 LES DIAGRAMMES D'UML	128
FIGURE VI- 2 LES ENTREES/SORTIES DU SMLRP	130
FIGURE VI- 3 LES MODULES DE L'OUTIL SMLRP	130
FIGURE VI- 4 DIAGRAMMES DES CAS D'UTILISATION RELATIFS A LA NOMENCLATURE	131
FIGURE VI- 5 IHM ASSOCIEE A L'AJOUT D'UN COMPOSANT	132
FIGURE VI- 6 DIAGRAMMES DES CAS D'UTILISATION RELATIFS A LA GESTION DES FOURNISSEURS ET CLIENTS	133
FIGURE VI- 7 IHM ASSOCIEE A LA GESTION DES CLIENTS ET DES FOURNISSEURS	133
FIGURE VI- 8 DIAGRAMMES DES CAS D'UTILISATION RELATIFS A LA PLANIFICATION MLRP	134
FIGURE VI- 9 IHM ASSOCIEE A LA GESTION DU PLAN DE PRODUCTION ET DES MOYENS LOGISTIQUES	135
FIGURE VI- 10 DIAGRAMME DE SEQUENCE DE L'OPERATION « OP_MLRP »	136
FIGURE VI- 11 TRANSPALLETTE MANUEL PESEUR	137
FIGURE VI- 12 NOMENCLATURE DE LA TRANSPALLETTE	138
FIGURE VI- 13 TOURNEE DE DISTRIBUTION POUR LA PERIODE 9	141

Liste des Tableaux

TABLEAU-I.1 STRATEGIES DE LA CHAINE LOGISTIQUE EN FONCTION DU NIVEAU D'INCERTITUDE EN AMONT ET EN AVAL.....	11
TABLEAU-I.2 INDICATEURS DU MODEL SCOR	21
TABLEAU-I.3 BANQUE D'INDICATEURS DE LA CHAINE LOGISTIQUE	22
TABLEAU-I. 4 RISQUES LIES A LA CHAINE LOGISTIQUE	26
TABLEAU-I. 5 STRATEGIES DE TRAITEMENT DES RISQUES LIES A LA CHAINE LOGISTIQUE.....	30
TABLEAU II- 1 LES DIFFERENCES ENTRE MADM ET MODM	35
TABLEAU II- 2 VALEURS DE L'INDICE ALEATOIRE RIN	38
TABLEAU II- 3 CRITERES DE REEVALUATION DES FOURNISSEURS	49
TABLEAU II- 4 LES MATRICES DES COMPARAISONS DES CRITERES RELATIVES AUX DIFFERENTES ENTITES....	52
TABLEAU II- 5 PRIORISATION DES CRITERES PAR LES DIFFERENTES ENTITES ET POIDS REDUIT DE CHAQUE ENTITE	52
TABLEAU II- 6 PRIORISATION DES CRITERES PAR ST1 ET ST2 (DEUXIEME ITERATION).....	53
TABLEAU II- 7 PRIORISATION DES CRITERES PAR ST1, ST2 ET ST3 (TROISIEME ITERATION)	53
TABLEAU II- 8 CRITERES DE REEVALUATION DES FOURNISSEURS PONDERES.....	54
TABLEAU II- 9 EVALUATION DU FOURNISSEUR F1.....	54
TABLEAU III- 1 RISQUES ET INDICATEURS ASSOCIES AU PROCESSUS APPROVISIONNEMENTS.....	64
TABLEAU III- 2 RISQUES ET INDICATEURS ASSOCIES AU PROCESSUS PRODUCTION	65
TABLEAU III- 3 RISQUES ET INDICATEURS ASSOCIES AU PROCESSUS DISTRIBUTION	66
TABLEAU III- 4 RESULTAT D'ANALYSE DES RISQUES DE L'ENTREPRISE ETUDIEE.....	71
TABLEAU III- 5 RESULTATS DE PRIORISATION DES INDICATEURS DE L'ENTREPRISE ETUDIEE	73
TABLEAU III- 6 TABLEAU DE BORD PROPOSE A L'ENTREPRISE ETUDIEE	74
TABLEAU VI- 1 LES COMMANDES DES CLIENTS DE L'ENTREPRISE EP	139
TABLEAU VI- 2 PLANIFICATION DES ORDRES D'APPROVISIONNEMENT, DE PRODUCTION ET DE TRANSPORT POUR L'ENTREPRISE EP	140

Liste des Abréviations

AHP : Analytic Hierarchy Process

AMDEC : Analyse des modes de défaillance Effet et Criticité

BSC: Balanced Score Card

CAHP: Collaborative Clustering Analytic Hierarchy Process

CFRS: Cluster First Route Second

COSO ERM: Committee of Sponsoring Organizations Enterprise Risk Management

CVRP: Capacitated Vehicle Routing Problem

DLtI: Distribution Lead time Indicators

DLtR: Distribution Lead time Risks

DVRP: Dynamic Vehicle Routing Problem

ELECTRE: ELimination Et Choice Translating Reality

ETO: Engineer to Order

FTO: Finish to Order

GRA : Grey Relational Analysis

GRAI : Graphes à Résultats et activités Interreliées

GRC: Governance Risk compliance

HFVRP: Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem

IHM: Interface Home Machine.

ISO: International Organization for Standardization

MADM: Multiple Attribute Decision Making

MDVRP: Multi-Depot Vehicle Routing Problem

MLRP: Manufacturing and Logistics Requirement planning

MODM: Multiple Objectif Decision Making

MQ: Market Qualifier

MRP: Manufacturing Requirement planning

MTF: Make to Forecast

MTO: Make to Order

MTS: Make to Stock

MW: Market Winner

ORESTE : Organisation Rangement Et Synthèse De Donnes Relationnelles

OVRP: Open Vehicle Routing Problem

PQI: Production Quality Indicators

PQR: Production Quality Risks

PROMETHE: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation

RFCS: Route First Cluster Second

SCI: Sourcing Cost Indicators

SCOR: Supply chain Operations Reference

SCR: Sourcing Cost Risks

SMART: Strategic Measurement Analysis and Reporting Technique

SMLRP: Solver for Manufacturing and Logistics Requirement planning

SOM: Self Organizing Map

TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

UML: Unified Modeling language

VMI: Vendor Management Inventory

VRP: Vehicle Routing Problem

VRPB: Vehicle Routing Problem with Backhauls

VRPTW: Vehicle Routing Problem with Time Window

Introduction générale

Cette thèse traite d'une manière générale le pilotage de la chaîne logistique, elle aborde plusieurs notions fondamentales utilisées pour la gestion industrielle. Les notions abordées sont le pilotage de la performance, la gestion des risques et la planification des besoins relatifs aux différents maillons de la chaîne logistique.

Dans une optique d'intégration, qui a été mise en application ces dernières décennies par les acteurs industriels pour faire face à un environnement économique instable et dans le but d'améliorer la qualité et d'optimiser les coûts et les délais, nous avons abordé dans cette thèse la nécessité d'intégration des deux modes de management, le management des risques et le management de la performance et nous avons par la suite proposé une démarche de construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques liés à la chaîne logistique. Nous avons également souligné la nécessité d'intégration de la planification de la production et la planification de la logistique relative aux approvisionnements et à la distribution.

L'intégration des deux modes de management relatifs au pilotage de la performance et à la gestion des risques est motivée par le fait que la gestion des risques et celle de la performance se pratiquent séparément dans les milieux industriels, or la relation étroite qui existe entre le risque et la performance d'une part, et entre le cycle de vie du management des risques et le cycle de vie de pilotage de la performance de l'autre part nous induit à opter pour un mode de management intégré de la performance et des risques. Nous proposons ainsi une démarche de construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques de la chaîne logistique.

En ce qui concerne la planification industrielle intégrée, elle a passé par plusieurs étapes passant par une planification à base de prévisions et de gestion économique des stocks à une planification des besoins en ressources et capacités. La planification industrielle a évolué également en termes de contexte, initialement effectuée indépendamment au niveau de chaque maillon de la chaîne logistique (approvisionnements, production, distribution et ventes) pour converger actuellement à une planification globale qui prend en considération tous les maillons

de la chaîne ainsi que les différents horizons de planification. Nous proposons dans cette thèse une méthode pratique permettant d'assurer la planification des besoins de la production et de la logistique liée aux approvisionnements et celle liée à la distribution. Un solveur industriel sera également mis en œuvre afin d'implémenter la méthode proposée.

Nous abordons également dans cette thèse la résolution de la problématique d'analyse multicritères et multi acteurs afin de la mettre à la disposition des responsables industriels, qui sont souvent confrontés à des situations dans lesquels ils doivent faire le choix entre plusieurs alternatives en prenant en considération un ensemble de critères et généralement ce choix (la décision) se fait en commission composée de plusieurs décideurs. Nous proposons ainsi une méthode pratique de prise de décision en groupe, cette méthode sera implémentée pour la construction du tableau de bord intégré de pilotage de la performance et des risques de la chaîne logistique.

Ce mémoire de thèse est organisé en deux parties, la première partie concerne le pilotage de la performance et la gestion des risques, dans cette partie nous proposons une démarche de construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques et nous proposons également une méthode d'analyse multicritère et multi-acteurs qui sera utilisée pour la priorisation des indicateurs et des risques du tableau de bord proposé. La deuxième partie traite les aspects liés à la planification au sein de la chaîne logistique, nous introduisons dans cette partie la méthode MLRP « Manufacturing and Logistics Requirement Planning » et nous présentons par la suite l'outil informatique, le SMLRP « Solver for Manufacturing and Logistics Requirement Planning », permettant d'exécuter cette méthode.

Nous abordons dans **le Chapitre 1**, dans un premier lieu, la définition de la chaîne logistique ainsi que la définition du management de la chaîne logistique, ensuite nous abordons les différentes stratégies de la chaîne logistique et les différents paramètres permettant d'opter pour une stratégie spécifique (contexte de la chaîne logistique), puis nous mettons en évidence le lien entre la stratégie et les indicateurs de performance et nous présentons les différents modèles de pilotage de la chaîne logistique. Nous abordons, en second lieu, la gestion des risques en présentant les principaux Framework de gestion des risques existants et nous présentons également une panoplie de risques relatifs aux différentes parties de la chaîne logistique (amont, centrale et aval).

Le **Chapitre 2** a pour objectif de présenter une nouvelle méthode collaborative d'analyse multicritère (CCAHP) en tant que méthode d'analyse multi critères, multi acteurs intégrant également un processus d'élaboration de consensus.

Nous commençons ce chapitre par introduire les différentes notions qui seront utilisées par la méthode proposée qui sont le processus d'analyse hiérarchique (AHP), la prise de décision en groupe, le processus d'élaboration de consensus et la méthode de classification des centres mobiles qui sera utilisée dans l'élaboration du consensus. Nous présentons ensuite la méthode proposée et nous terminons le chapitre par une étude de cas relative à la réévaluation en groupe des fournisseurs d'une entreprise marocaine.

Le **Chapitre 3** met en évidence la relation entre le risque et la performance d'une part, et de l'autre part entre le cycle de vie du management des risques et le cycle de vie de pilotage de la performance. Il introduit ensuite un cycle de vie intégré permettant à la fois une gestion des risques et un pilotage de la performance. Ce cycle de vie peut être appliqué pour le management des entreprises et des organisations d'une manière générale, et il peut être utiliser également pour le management des chaines logistiques.

Nous présentons ensuite, dans ce chapitre, une démarche proposée pour la construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques dans laquelle nous avons intégré les deux modes de management et nous avons introduit la notion de priorisation des indicateurs et des risques en prenant en considération le contexte de la chaine logistique (facteurs clés de compétitivité et le niveau de maitrise des différents maillons de la chaine). Ce Chapitre se termine par une étude de cas industriel permettant d'appliquer la démarche proposée.

Nous abordons dans le **Chapitre 4**, dans un premier lieu les relations et les interactions entre les différents maillons de la chaine logistique en fonction des différentes stratégies de production, ensuite nous examinons la planification de la production et de la distribution et plus particulièrement la planification des besoins de la production et la planification des tournées de véhicules. Nous terminons ce chapitre par une discussion générale relative à la planification intégrée des besoins de la production et de la logistique visant à introduite le modèle proposé dans le chapitre suivant.

Le **Chapitre 5** introduit l'algorithme MLRP « Manufacturing and Logistics Requirement Planning » permettant de déterminer les besoins de la production, de la logistique amont (relative aux composants et matières premières) et de la logistique aval (relative à la distribution des produits finis) en prenant en considération les demandes clients, la nomenclature restructurée (structure de composition du produit fini adaptée au MLRP), les délais de livraison (de transport et de production), les dimensions et le poids des composants, le volume et le poids maximal des moyens de transport disponibles et les coûts de transport par voyage. Le MLRP permettra ainsi de planifier simultanément les besoins de production et ceux de la logistique amont (liées aux approvisionnement) et de la logistique aval (liées à la distribution), ainsi que la planification des tournées de véhicules liées à la distribution et au réapprovisionnement tout en prenant en considération les capacités liées aux unités de production qu'elles soient internes ou chez les fournisseurs. Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la nouvelle structure de la nomenclature adaptée au MLRP qui prend en considération les nouveaux paramètres à définir au niveau de chaque composant de la nomenclature. Nous détaillons ensuite les algorithmes utilisés pour l'implémentation des heuristiques utilisées pour la planification des tournées de véhicules et nous comparons les performances de ces différentes heuristiques. Nous terminons le chapitre par la présentation du modèle de planification intégrée de la production et de la logistique.

Le **Chapitre 6** présente l'outil de planification intégrée de la production et de la logistique, le SMLRP « Solver for Manufacturing and Logistic Requirement Planning », Cet outil vise à informatiser le modèle présenté dans le chapitre 5 afin de faciliter la planification des besoins de production et de la logistique au sein des chaînes logistiques. Un cas d'étude industriel est présenté dans ce chapitre afin de démontrer l'applicabilité du modèle MLRP. Il s'agit de la planification de la production et de la logistique amont et aval au sein d'une entreprise de fabrication des transpalettes manuels peseurs. Nous déroulons les différentes étapes de la démarche MLRP depuis l'introduction des éléments de la nomenclature jusqu'à la génération des ordres de production et de transport ainsi que la génération des tournées de véhicules pour la distribution du produit fini et pour l'approvisionnement en matières premières et/ou composants.

Partie I - Management de la Chaîne Logistique : Pilotage des performances et gestion des risques

Chapitre I : Le pilotage de la performance et la gestion des risques liés à la chaîne logistique

I.1 Introduction

Face à un environnement économique instable, les parties prenantes industrielles avaient tendance, ces dernières décennies, à créer des alliances et s'intégrer formant des chaînes logistiques globales dans le but d'optimiser les coûts et les délais. Afin de résister aux différents obstacles économiques, concurrentielles, sociopolitiques et environnementales, ces chaînes logistiques doivent mettre en place des systèmes de pilotage efficaces qui permettent d'un côté de piloter la performance (gérer la contre-performance : « risques normaux ») et de l'autre côté de gérer les risques anormaux (perturbation, incidents, accidents de travail, ...). La compréhension du contexte globale de la chaîne logistique : les facteurs clés de compétitivité (coûts, qualité, délais et niveau de service) ainsi que le niveau de maîtrise de l'incertitude en amont et en aval de la chaîne, est une condition nécessaire pour assurer l'efficacité et l'efficience du système de pilotage de la chaîne logistique.

Nous abordons dans ce chapitre, dans un premier lieu, la définition de la chaîne logistique ainsi que la définition du management de la chaîne logistique, ensuite nous abordons les différentes stratégies de la chaîne logistique et les différents paramètres permettant d'opter pour une stratégie spécifique (contexte de la chaîne logistique), puis nous mettons en évidence le lien entre la stratégie et les indicateurs de performance et nous présentons les différents modèles de pilotage de la chaîne logistique, notamment le modèle SCOR. Nous abordons, en second lieu, la gestion des risques en présentant les principaux Framework de gestion des risques introduits au cours des dernières décennies et nous présentons également une panoplie de risques relatifs aux différentes parties de la chaîne logistique (amont, centrale et aval). Nous terminons le chapitre par une discussion sur la nécessité d'intégrer la gestion des risques et le pilotage des performances afin d'assurer un management efficace de la chaîne logistique.

I.2 La chaîne logistique et le management de la chaîne logistique

Les notions de chaîne logistique « supply chain » et de gestion de la chaîne logistique « supply chain management » sont des notions flexibles (Towill, 1996) du fait qu'elles peuvent varier en fonction des extrémités de la chaîne étudiée : on parle de chaîne logistique interne lorsque le périmètre étudié est les processus internes d'une entreprise (approvisionnements, production, distribution). Lorsqu'on intègre à cette chaîne logistique interne les fournisseurs et les clients on parle de chaîne logistique intégrée et lorsqu'on intègre les fournisseurs des fournisseurs et les clients des clients dans une chaîne logistique intégrée on obtient une chaîne

logistique collaborative.

I.2.1 La chaîne logistique-le supply chain

En parcourant la littérature relative à la chaîne logistique, on trouve plusieurs définitions de la chaîne logistique qui peuvent être regroupées sous trois catégories (Figure I-1) :

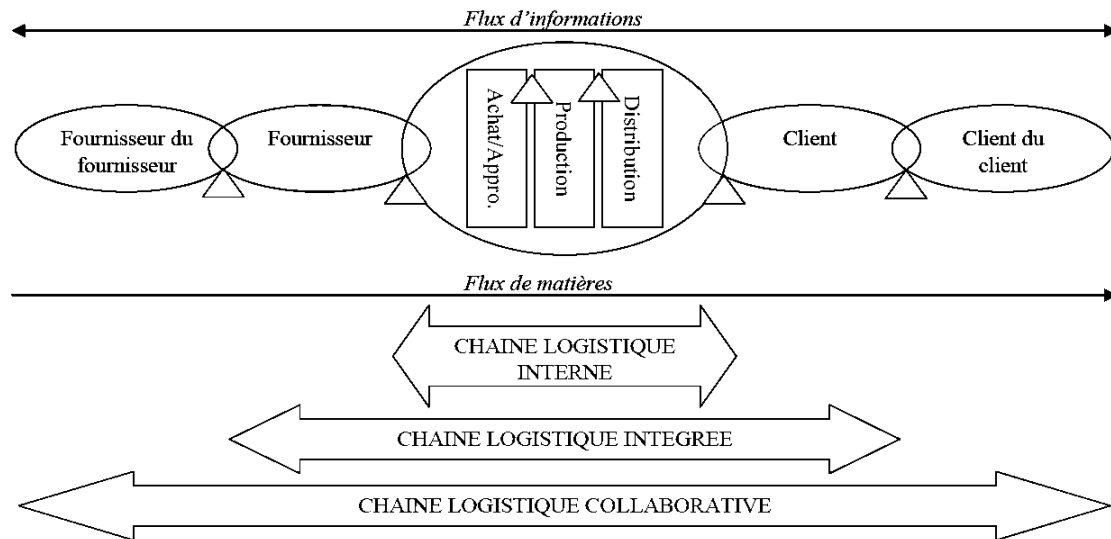


Figure I- 1 Catégories des chaînes logistiques

- La chaîne logistique interne qui est considérée comme une succession de fonctions au sein d'une entreprise visant à transformer des matières premières/composants en produits finis et les transmettre aux clients, ainsi pour (Poirier et Reiter, 2001) « Une chaîne logistique est le système grâce auquel les entreprises amènent leurs produits et leurs services jusqu'à leurs clients » et selon (Beamon, 1998) « À son plus haut niveau, une chaîne logistique comprend deux processus intégrés de base : (1) le processus de planification de la production et de contrôle des stocks, et (2) le processus de distribution et de logistique».
- La chaîne logistique intégrée : étalée du fournisseur au client, (Lee et Billington, 1995) définissent la chaîne logistique en tant que « réseau d'installations qui permet de s'approvisionner en matières premières, les transformer en produits intermédiaires, puis en produits finaux, et les livrer aux clients via un système de distribution ». (Beamon, 1998) définit aussi cette catégorie de chaîne logistique en tant que : « processus intégré dans lequel les matières premières sont transformées en produits finaux, puis livrées aux clients (via la distribution, la vente au détail ou les deux) ».
- La chaîne logistique collaborative qui étend les limites de la chaîne logistique au-delà des frontières de l'entreprise en allant des fournisseurs des fournisseurs jusqu'aux clients des

clients. Selon (Lauras, 2004), « Une chaîne logistique est formée de l'ensemble du cheminement des flux physiques, financiers et informationnels, du premier des fournisseurs jusqu'aux clients ultimes, les consommateurs ». De la même manière (Tayur et Ganeshan, 1999) définissent la chaîne logistique en tant que : « Système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'informations dans les deux sens ».

Indépendamment de la catégorie de chaîne logistique considérée, le principal objectif du concept de la chaîne logistique est d'avoir une vision globale et une optimisation transverse impactant l'ensemble des maillons de la chaîne et non pas des optimisations locales et indépendantes.

1.2.2 La gestion de la chaîne logistique- le Supply chain Management

Le concept de management de la chaîne logistique diffère du concept de chaîne logistique qui constitue uniquement l'environnement industriel regroupant différents acteurs, tandis que le management de la chaîne logistique nécessite un effort volontaire de ces acteurs pour la création de valeur. La gestion de la chaîne logistique peut être ainsi définie en tant que coordination systémique et stratégique entre les fonctions internes d'une ou plusieurs entreprises dans l'objectif d'améliorer la performance globale et individuelle (Mentzer et al., 2001).

On retrouve dans la littérature plusieurs définitions de la gestion de la chaîne logistique, ces définitions peuvent eux aussi être regroupées sous trois catégories, à l'instar des définitions fournies pour la chaîne logistique, en fonction du périmètre concerné par la chaîne étudiée.

L'AFNOR (Norme FD X50-604) définit la gestion des chaînes logistiques internes en tant que « Fonction dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleurs conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoir-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et d'informations ».

(La Londe, 1994) définit la gestion de la chaîne logistique intégrée en tant que : « la création de

valeur économique et produits client grâce à une gestion synchronisée du flux des biens physiques et des informations associées, à partir de l'approvisionnement jusqu'à la consommation ». Cette gestion concerne toutes les fonctions/sites de l'entreprise et intègre les fournisseurs et les clients directs.

Quant à la gestion de la chaîne logistique collaborative, (Bowersox, 1997) la définit en tant que « stratégie basée sur la collaboration pour relier les opérations commerciales interentreprises afin de parvenir à une vision commune des opportunités du marché. Il s'agit d'un accord complet qui s'étend de l'approvisionnement en matières premières à la vente au client final ». Selon (Morgan, 1997) La gestion de la chaîne logistique collaborative est un alignement d'acheteurs, de fournisseurs et de clients ainsi que leurs processus pour atteindre une forme avancée d'avantage compétitif.

I.3 Les stratégies de gestion des chaînes logistiques

I.3.1 Les stratégies de la chaîne logistique

Actuellement les entreprises devront faire face à plusieurs défis tels que la réduction du cycle de vie des produits, la personnalisation des produits, les exigences accrues en termes de coût, qualité et délais et l'augmentation de l'incertitude au niveau des deux extrémités de la chaîne logistique : d'une part la difficulté d'avoir les besoins nécessaires en quantité exacte et en temps opportun en amont de la chaîne et d'autre part la difficulté de prévoir la demande en aval de la chaîne. Plusieurs stratégies ont émergé pour faire face à ces défis.

Les paramètres qui contribuent à la définition d'une stratégie pertinente au niveau d'une chaîne logistique sont le niveau de prédictibilité de la demande client, la fiabilité des fournisseurs, les délais de réapprovisionnement et la personnalisation de la demande. Le Tableau-I.1 récapitule les différentes stratégies de la chaîne logistique, chacune de ces stratégies est appropriée à une situation qui est décrite essentiellement par le degré d'incertitude au niveau des deux extrémités de la chaîne logistique.

La notion de « Market Winner (MW) » est le critère qui permet à l'entreprise de gagner les parts de marché, tandis que les « Market Qualifier (MQ) » sont les critères pour lesquels l'entreprise doit assurer un certain niveau pour rester compétitive (Özkar et Demirel, 2011), par exemple si le prix de vente est l'élément essentiel au niveau d'un marché, l'objectif doit être la réduction des coûts, sans pour autant réduire la qualité, le niveau de service et sans impacter

les délais de livraison, pour ce cas de figure le lean supply chain s'avère la stratégie la plus adéquate (Özgir et Demirel, 2011). Chacune des stratégies de la chaîne logistique est caractérisée par un ou plusieurs « MW » et un ou plusieurs « MQ ».

	Demande prévisible	Demande imprévisible
Réapprovisionnement Certain (quantité nécessaire au moment opportun et qualité requise)	Lean Supply chain <u>MW</u> : Coûts MQ : qualité, délais et niveau de service	Responsive Supply chain <u>MW</u> : niveau de service MQ : cout, qualité et délai
Réapprovisionnement Incertain	Risk-hedging Supply chain <u>MW</u> : Coûts et niveau de service MQ : qualité, délais	Délai réapprovisionnement ↑ Leagile Supply chain <u>MW</u> : Coûts et niveau de service MQ : qualité, délais Agile Supply chain <u>MW</u> : niveau de service MQ : couts, qualité, délais

Tableau-I.1 Stratégies de la chaîne logistique en fonction du niveau d'incertitude en amont et en aval

La Responsive supply chain est la stratégie la plus appropriée dans le cas d'un marché caractérisé par une demande imprévisible et un réapprovisionnement certain (quantité voulue à qualité requise et au moment opportun). Pour assurer un niveau de réactivité élevé, les couts seront impactés d'une part par l'augmentation des niveaux de stocks des produits finis ou semi-finis afin d'assurer une meilleure flexibilité face à la variabilité des demandes clients et d'autre part par l'investissement dans l'amélioration des délais de livraison afin d'améliorer la réactivité (Birhanu et al., 2014). Le MW qui permettra de se positionner dans un tel marché est le niveau de service.

Le Lean supply chain est la stratégie généralement adoptée dans le cadre d'une demande prévisible et d'un approvisionnement maîtrisé, l'objectif principale de l'approche lean est l'élimination du gaspillage, le lean c'est produire plus avec moins de ressources (Agarwal et al., 2006). Le MW qui permettra de se positionner dans un tel marché est la réduction des coûts.

L'Agile supply chain est la stratégie adoptée dans le cadre d'une demande imprévisible et un réapprovisionnement incertain, l'agilité est définie en tant que la capacité à satisfaire

rapidement les changements de la demande client en termes de volume et de diversité (Agarwal et al., 2006). Pour faire face à ce type de marché les entreprises font appel à la mutualisation des fournisseurs et à la différenciation retardée pour couvrir le risque de l'imprévisibilité. Le MW qui permettra de se positionner dans un tel marché est le niveau de service.

Le Leagile supply chain est la stratégie adoptée dans le cadre d'une demande imprévisible et un réapprovisionnement incertain avec des délais de réapprovisionnement longs, cette stratégie est la combinaison du lean supply chain appliquée en amont du point de découplage et de l'agile supply chain appliquée en aval du point de découplage (Agarwal et al., 2006). Les MW qui permettront de se positionner dans un tel marché sont la réduction des coûts et le niveau de service.

La Risk-hedging supply chain quant à elle, est appliquée dans le cas d'une demande prévisible et d'un réapprovisionnement incertain : risque de perturbation du réapprovisionnement. Pour faire face à ce risque les entreprises mettent en place des contrats dans lesquels elles verrouillent des facteurs clés comme le prix et les délais de livraison, elles mutualisent la gestion des stocks et des ressources de ses fournisseurs (VMI) (Birhanu et al., 2014). Les MW qui permettront de se positionner dans un tel marché sont la réduction des coûts et le niveau de service.

En 1997, Fisher explique la non-atteinte des résultats escomptés en ce qui concerne l'amélioration de la performance de la chaîne logistique par le non alignement de la stratégie adoptée avec le type du produit. Fisher distingue entre deux catégories de produits, d'une part les produits fonctionnels (produit alimentaire) pour lesquels il faut adopter la stratégie lean/efficient supply chain et d'autre part les produits innovants (High technologie et cosmétique) pour lesquels il faudra adopter la responsive supply chain (Fisher, 1997). Les critères de sélection de Fisher qui sont les types de produits peuvent être ramenés aux critères précédemment cités dans le tableau 1, Les produits fonctionnels ont généralement un long cycle de vie et par conséquent la demande est stable et prévisible quant aux produits innovants, le cycle de vie est généralement court et la demande est imprévisible et volatile.

La différence entre les stratégies de la supply chain se manifeste dans les différents objectifs de chacune ainsi que dans la structure et l'exécution des différents processus formant la chaîne logistique, par exemple en ce qui concerne le lean supply chain l'objectif principale est fournir un produit à moindre cout, ce qui se traduit dans les critères de sélection des fournisseurs

(processus achats & approvisionnement) qui seront principalement les coûts et la qualité, la réduction des coûts se traduit aussi pour le processus production par une utilisation efficace et efficiente des ressources. En ce qui concerne la responsive supply chain, l'objectif est de satisfaire rapidement la demande, les critères de sélection des fournisseurs seront la rapidité, la flexibilité et la fiabilité de ces derniers (processus achats et approvisionnement) et pour le processus de production, la flexibilité de la capacité de production est nécessaire (Alomar et Pasek, 2014).

La responsive supply chain est en quelque sorte une forme particulière de l'agile supply chain, les deux stratégies sont adaptées aux situations où la demande est imprévisible et le facteur clé de compétitivité est le niveau de service. En ce qui concerne la stratégie Risk-hedging supply chain, elle est implicitement incluse dans toutes les autres stratégies, vu que chacune de ces stratégies est adaptée à un contexte spécifique caractérisé par un ensemble de risques couverts par la stratégie en question.

Dans ce qui suit la stratégie adaptée au contexte de la chaîne logistique serait l'une des trois variantes : lean supply chain, agile supply chain et Leagile supply chain

I.3.2 Le lien entre la stratégie et la mesure de la performance

Dans un environnement compétitif, la stratégie est l'élément qui fait la différence entre les concurrents, elle permet de déterminer la meilleure façon d'organiser les ressources pour atteindre des résultats souhaités (Parmenter, 2015). Pour soutenir sa stratégie et pouvoir agir au moment opportun, l'entreprise/la chaîne logistique doit alors chercher à identifier les objectifs opérationnels, les facteurs clés de succès, les indicateurs de performance et mettre en place un système de mesure. La Figure I-2 décrit le processus de mise en œuvre d'une nouvelle stratégie, ce processus se base sur la notion du tableau de bord prospectif de Kaplan et Norton (Kaplan et Norton, 2001). En utilisant cette méthodologie tous les indicateurs sont choisis en fonction des objectifs stratégiques selon les quatre perspectives préconisées par le tableau de bord prospectif.

Le Tableau de bord prospectif est organisé autour de quatre axes principaux. Le premier axe est l'axe « financier » qui se focalise sur les indicateurs de performance financière, il représente généralement la viabilité de la structure à long terme. Le deuxième axe est l'axe « client » qui représente des indicateurs qui évaluent la fidélité actuelle et future des clients, l'accroissement de la clientèle et l'accroissement de la rentabilité par client. Cet axe permet de mesurer la

capabilité à fournir des biens et des services de qualité, à l'efficacité de leur livraison ainsi que de leur retour en cas de services après-vente, il reflète la satisfaction client dans sa globalité. Le troisième axe est l'axe des « processus internes » qui identifie les processus internes clés de la réussite, cet axe permet d'évaluer la performance des processus permettant d'assurer la satisfaction client et de générer des gains financiers. Enfin L'axe de « l'apprentissage organisationnel » qui décrit le capital humain et les actifs matériels et immatériels nécessaires pour aboutir à la réalisation de la stratégie (Naciri et al., 2015b).

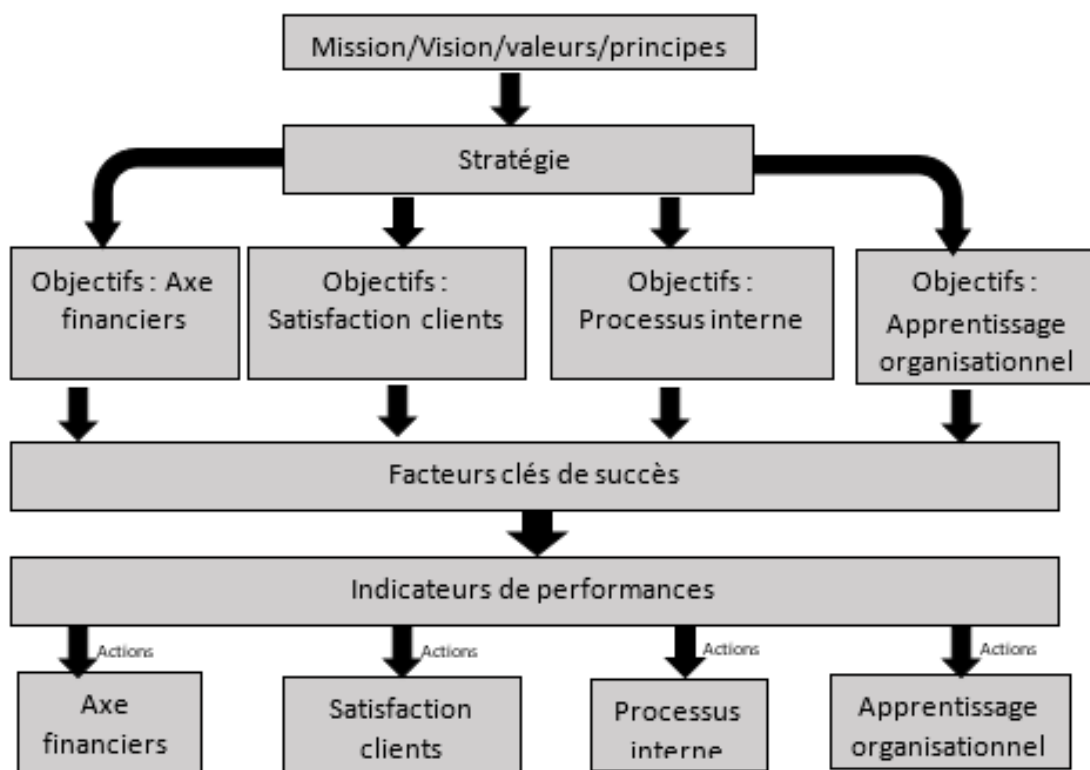


Figure I-2 Lien entre la stratégie et les indicateurs de performance

Pour être efficace et atteindre les objectifs stratégiques, il est nécessaire d'évaluer les performances quantitativement et qualitativement. Ainsi les indicateurs de performance ont deux vocations. La première raison d'être de ces indicateurs est de fournir certaines informations afin de prendre des décisions de management au sein d'une entreprise ou au sein d'une chaîne logistique. La deuxième raison d'être de ces indicateurs est piloter la performance à l'intérieur de certaines limites de contrôles permettant d'atteindre les objectifs stratégiques et opérationnels, un plan d'action doit être dressé et mis en œuvre pour redresser les contreperformances. D'une manière générale un indicateur de performance est associé à un objectif et à des variables d'action, Figure I.3 « triangle d'or » (Lorino, 1997).

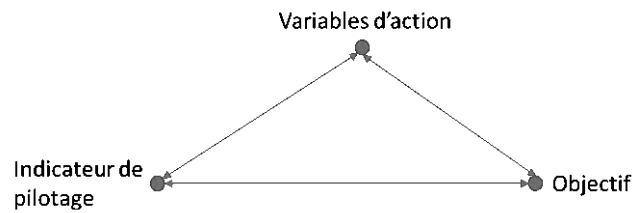


Figure I- 3 Triangle d'or du pilotage

I.4 Pilotage de la performance des chaînes logistiques

I.4.1 La performance des différents maillons de la chaîne logistique

La mesure de la performance permet d'avoir un feedback concernant la conformité des activités et des produits avec les attentes clients et avec les objectifs stratégiques. Elle permet de déterminer les besoins en amélioration dans les domaines à faible performance (Bhagwat et Sharma, 2007).

La performance au niveau de la partie aval de la chaîne logistique peut être décrite principalement par la performance de la gestion des commandes (Bhagwat et Sharma, 2007), cette dernière est caractérisée par :

- L'efficacité de la prise des commandes : la capacité de fournir au bon moment et avec précision les données relatives aux exigences clients.
- Délai de livraison des commandes : est le temps écoulé entre la réception de la commande client et la livraison de cette dernière, il est composé du délai de prise de commande, délai de planification et de conception de commande, délais d'approvisionnement, de production, d'assemblage et des délais de livraison.
- L'efficacité de traitement des commandes : le traitement des commandes peut être amélioré en éliminant les activités à non-valeur ajoutée et en optimisant les temps de traitement tout au long du chemin parcouru par la commande depuis son enregistrement jusqu'à sa livraison.

La performance au niveau de la partie amont de la chaîne logistique peut être décrite principalement par la performance des approvisionnements (Gruat La Forme et al., 2007), cette dernière est caractérisée par :

- La qualité, les coûts et les délais de livraison des produits ou composants par les fournisseurs.
- La réactivité et la flexibilité des fournisseurs.

La performance relative à la satisfaction et au service client peut être décrite principalement

par :

- La flexibilité qui reflète la capacité d'une entreprise à s'adapter face aux changements relatifs aux exigences clients, aux volumes et à la vitesse de traitement des commandes (Agarwal et al., 2006).
- Délais de réponse aux demandes d'information, pour des besoins de planifications les clients peuvent exprimer des demandes d'informations relatives au statut d'une commande, à un éventuel problème de disponibilité ou de livraison (Bhagwat et Sharma, 2007).
- L'efficacité et la réactivité du service après-vente.

La performance du processus de production est caractérisée par :

- Le ratio d'utilisation de la capacité est la production actuelle par rapport à la production maximale possible, ce ratio impacte directement le degré de flexibilité et les délais de livraison.
- L'exactitude de la planification de la production qui est un élément essentiel de la maîtrise de la chaîne logistique.
- La variété des produits est une information qui impacte le choix de la stratégie de la chaîne logistique selon Fisher (Fisher, 1997), pour améliorer la performance il faudra opter pour la stratégie la plus adaptée au type et variété du produit.

La performance du processus livraison est caractérisée selon (Bhagwat et Sharma, 2007) par :

- Le choix convenable du mode et des canaux de distribution par l'implantation d'un réseau de distribution optimal : détermination de l'emplacement des dépôts et optimisation des tournées de distribution.
- La réduction des délais de distribution, afin de respecter les engagements en termes de délai et améliorer le niveau de service.
- La flexibilité du système de distribution permettant de satisfaire les besoins particuliers des clients.

Finalement, la performance financière et la maîtrise des coûts peuvent être reflétés par :

- La vitesse d'amortissement des actifs et les retours sur investissements dans les outils de production, de distribution ou les technologies d'information et de communication.
- La maîtrise des coûts relatifs à la gestion des stocks et ceux relatifs à la distribution.
- La précision des prévisions qui a un impact direct sur les coûts de stocks, les délais de livraison et le niveau de service.

I.4.2 Les systèmes de mesure de performance de la chaîne logistique

Plusieurs recherches scientifiques ont été intéressées par la mise en œuvre de système de mesure de la performance de la chaîne logistique. La plupart de ces systèmes proposés sont des cadres conceptuels permettant de relier les objectifs stratégiques aux différentes activités opérationnelles et tactiques qui les affectent (Berrah et al., 2007). Nous citons ci-dessous les principaux systèmes de pilotage de la performance de la chaîne logistique suivant la chronologie de leur apparition.

- **Strategic Measurement Analysis and Reporting Technique (SMART)** : proposé par (Cross et Lynch, 1989) dans le but de fournir un cadre conceptuel permettant de lier les performances opérationnelles aux objectifs stratégiques, ce modèle intègre les rapports financiers et non financiers en mettant l'accent sur la satisfaction client et les objectifs financiers de l'entreprise. SMART décline les objectifs stratégiques sur quatre niveaux organisationnels : les centres de travail, les département (business operating system et les business units). L'implémentation de ce modèle consiste d'abord à définir la vision en spécifiant les marchés cibles ainsi que les produits et services fournis, ensuite à déduire les objectifs stratégiques et les objectifs financiers, puis à décliner ces objectifs en objectifs opérationnels en termes de satisfaction client, flexibilité et productivité et en fin à déterminer les exigences à mettre en œuvre au niveau des centres de travail et des département en termes de qualité, temps d'exécution et de distribution et gestion des rebus.
- **Activity Based Costing/Activity Based Management (ABC/ABM)**: Est une méthode de mesure de la performance introduite par (Cooper et Kaplan, 1991). Cette méthode cherche à identifier les activités génératrices de valeurs, ensuite repérer les dysfonctionnements entre les différentes activités puis calculer le coût de revient du produit fini et ses composants tout en mettant en place un contrôle budgétaire global et détaillé et enfin déterminer des étapes nécessaires afin d'atteindre la rentabilité escomptée. L'implémentation de cette méthode consiste en cinq étapes (Lauras, 2004) : la cartographie des processus, en premier lieu, permettant de déterminer les activités et les entrées/sorties des processus, ensuite l'imputation des temps de travail et des charges aux différentes activités, puis la mise en place de système de mesure de la performance mesurant l'efficacité des activités génératrices de coûts et les quantités des ressources consommées ainsi que les coûts associés et finalement le calculer les coûts de revient du produit fini par

activité.

- ECOGRAI est une méthode proposée par (Bitton, 1990) qui se base sur les grilles GRAI (Graphes à Résultats et activités Interreliés : outil graphique de modélisation d'entreprises) qui consiste à une analyse descendante de l'organisation (structurée à l'avance en centre de décision) afin de décliner les objectifs stratégiques en objectifs tactiques et opérationnelles en utilisant une démarche participative. Cette méthode se base sur le triplet {objectifs, variables de décision, indicateurs de performance} pour mettre en place un système de mesure de la performance, axé sur l'évaluation économique et la stratégie, au niveau de tous les centres de décision.
- Balanced Score Card (BSC) est fondé par (Kaplan et Norton, 1992) afin de remettre en cause les systèmes de mesure de la performance axés sur les indicateurs financiers. Selon le point de vue de ces auteurs, les indicateurs financiers sont des indicateurs retardés (a posteriori) du fait qu'ils mesurent les effets des actions déjà entreprises d'où la nécessité de mettre en place d'autres indicateurs non financiers permettant de mieux anticiper la performance future des entreprises. Comme on l'a déjà cité dans un paragraphe précédent, le BSC est organisé selon quatre axes d'analyse : l'axe client, l'axe financier, l'axe apprentissage organisationnel et l'axe processus interne. La figure I-2 décrit les étapes de mise en place des BSC, il s'agit de décliner la stratégie selon les différents axes du BSC puis les décliner en objectifs et en actions concrètes, ensuite au niveau de chaque axe définir les indicateurs qui permettent de mesurer l'atteinte des objectifs, les variables d'actions agissant sur la performance ainsi que les actions à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs fixés (Magali, 2007).
- Le modèle SCOR est une référence pour la gestion des opérations de la chaîne logistique, développé par le Supply Chain Council (SCC) en se basant sur l'analyse des meilleures pratiques observées dans l'industrie, sur les études de benchmarking ainsi que sur les différentes solutions informatiques existantes. SCOR subdivise toute chaîne logistique en cinq types de processus : Planification, approvisionnement, fabrication, livraison, retours (Figure I-4). Ces processus sont adaptés selon le type de production utilisé : la fabrication à la commande (Make to Order), la fabrication sur stock (Make to Stock) et la conception sur commande (Design to Order). Ce modèle offre également une panoplie d'indicateurs permettant de piloter la chaîne logistique (détaillés dans le paragraphe suivant). SCOR est utilisé largement par les entreprises du fait qu'il permet, d'un côté, de fournir un cadre

cohérent et uniforme à la mesure de la performance et d'un autre côté, il permet de soutenir les décisions stratégiques et contribuer aux opérations d'intégration interne et externe (Paul et Laville, 2007). La mise en place du modèle se fait selon quatre niveaux (SCOR, 2012) :

- Le niveau 1 (stratégique) qui définit la chaîne logistique selon cinq processus génériques sur lesquels sont déclinés les objectifs stratégiques
 - Le niveau 2 (tactique) : le modèle fourni à ce niveau une table de configuration composée de 30 sous processus afin de permettre de configurer/reconfigurer la chaîne logistique en question.
 - Le niveau 3 (opérationnel) qui permet de guider les entreprises dans la définition des éléments des processus (input, output, indicateurs de performance et meilleures pratiques)
 - Le niveau 4 est laissé aux entreprises pour que chacune définisse la manière avec laquelle les tâches élémentaires des processus seront exécutées.
- ASLOG : est un référentiel logistique conçu par l'Association Française pour la Logistique en 1997 en se basant sur le référentiel logistique de VOLVO. Son objectif est d'aider les entreprises à mieux maîtriser leurs performances logistiques en fournissant un recueil de bonnes pratiques logistiques. Ce modèle s'organise autour de dix chapitres : management (stratégie et planification), conception et projets, approvisionnement, production, livraison, stockage, ventes, retours et après-vente, indicateurs de pilotage de la performance et démarche de progrès permanent (ASLOG, <http://www.aslog.org>). Le modèle permet à chaque entreprise de s'autoévaluer, il constitue un référentiel d'audit logistique permettant d'évaluer la situation actuelle de l'entreprise ainsi que sa performance logistique et de formuler par la suite des pistes d'améliorations.
 - EVALOG est un référentiel standard pour l'évaluation logistique dans le secteur de l'automobile, ce référentiel permet de s'autoévaluer et d'auditer les sites partenaires, notamment les fournisseurs, en utilisant un questionnaire donnant ainsi un score suite à l'audit. Le questionnaire est composé de six parties : Stratégie et amélioration, organisation du travail, capacité et planning de production, interface clients, maîtrise produit /process et interface fournisseurs. Le questionnaire est doté d'un système de pondération permettant de mettre en exergue les aspects les plus critiques : rupture des opérations clients, apparition des coûts additionnels, l'insatisfaction client et la perte des facteurs clés de compétitivité (Jawab et Bouami, 2007).

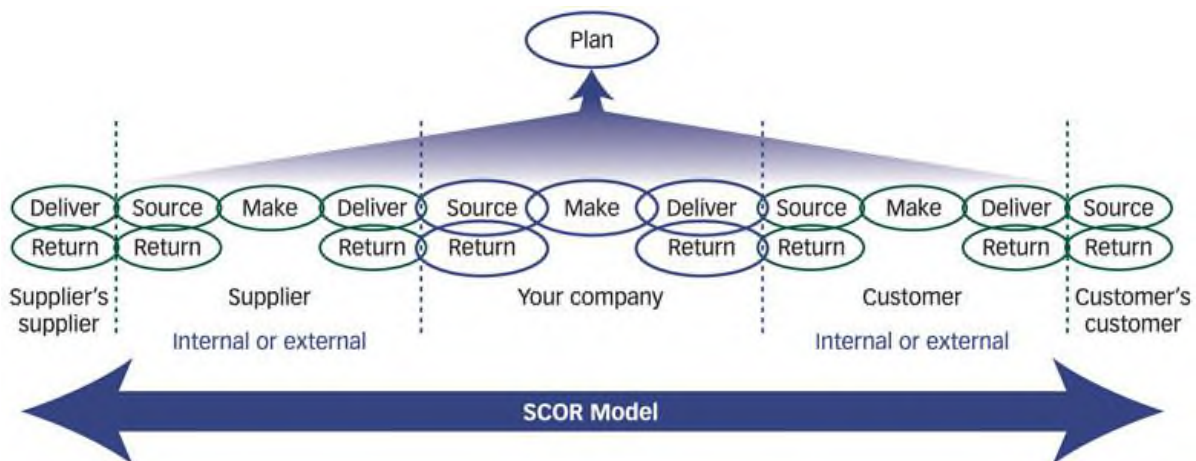


Figure I- 4 Les processus du modèle SCOR

I.4.3 Les indicateurs de performance de la chaîne logistique

Nous présentons dans ce paragraphe une panoplie d'indicateurs de mesure de la performance de la chaîne logistique, une partie est issue du modèle SCOR et l'autre partie est issue d'une enquête effectuée au sein du laboratoire des techniques industrielles de la faculté des sciences et techniques de Fès visant à sélectionner les indicateurs les plus adaptées aux petites et moyennes industries marocaines.

Pour ce qui est des indicateurs de performance du modèle SCOR, ce dernier propose un grand nombre d'indicateurs qui sont regroupés sous cinq critères : la fiabilité (mesurée entre autres par le pourcentage de marchandises en rayon, l'exactitude du réapprovisionnement, la performance de livraison à la date d'échéance, l'exécution « parfaite » des commandes, etc.), la réactivité (appréciée au travers du délai de réapprovisionnement, du délai de livraison, etc.), la flexibilité (temps de réaction, flexibilité de la production, etc.), le coût (coût total des opérations, productivité à valeur ajoutée, coûts de garantie, etc.) ainsi que le niveau des stocks (nombre de jours de stock en magasin, etc.) (Naciri et al., 2015b).

Chaque critère de performance est composé d'un ou plusieurs indicateurs de niveau-1, et chaque indicateurs niveau-1 est décomposé en un ensemble d'indicateurs niveau-2 et niveau-3 (Tableau-I.2) permettant d'analyser et d'améliorer le critère de performance en question. Le modèle fourni aussi pour chaque critère de performance l'ensemble des activités en relation avec ce dernier ainsi qu'une panoplie de bonnes pratiques qui peuvent l'améliorer (SCOR, 2012).

Pour les indicateurs, de la chaîne logistique, élaborés au sein du laboratoire des techniques industrielles de la Faculté des sciences et Techniques de Fès, (Naciri et al., 2015a) ont effectué

une enquête visant à sélectionner les indicateurs les plus adaptées aux petites et moyennes industries marocaines, le résultat de cette enquête est listé dans le Tableau-I.3.

	Axe de performance	Mesures Niveau 1	Calcul	Mesures Niveau 2
Axe client	Fiabilité	Pourcentage des commandes parfaites.	[nombre des commandes réalisées qui respectent les exigences en termes de délais, spécifications, précision de la documentation...] / [nombre des	% des commandes livrées complètement % des commandes livrées à temps précision de la documentation
	Réactivité	Délai d'exécution des commandes	[Somme des délais des commandes livrés]/[nombre des commandes livrées]	Délai d'approvisionnement Délai de production Délai de livraison
	Agilité	Flexibilité	Temps minimum requis pour réaliser et maintenir une augmentation de capacité non planifiée.	Flexibilité d'approvisionnement Flexibilité de production Flexibilité de livraison Flexibilité des retours d'approvisionnement
		Adaptabilité (+)	L'augmentation maximale des quantités livrées que l'organisme/processus peut effectuer en 30 jours	Adaptabilité (+) approvisionnement Adaptabilité (+) production Adaptabilité (+) livraison
		Adaptabilité (-)	Diminution des quantités commandées 30 jour avant la livraison qui n'impacte pas les stocks et n'engendre pas de pénalités	Adaptabilité (-) approvisionnement Adaptabilité (-) production Adaptabilité (-) livraison
		Valeur exposée au risque	VAR \$ (Planification) + VAR \$ (approvisionnement) + VAR \$ (production) + VAR \$ (livraison) +VAR \$ (Retours). VAR: Probabilité d'occurrence du risque (P) x impact financier de l'occurrence du	Value at Risk (Planification) Value at Risk (approvisionnement) Value at Risk (production) Value at Risk (livraison) Value at Risk (Retours)
Axe interne	Maitrise des Coûts	Cout Total d'exécution	Somme des coûts de planifications, d'approvisionnement, de production, de distribution, de gestion des commandes et du service après vente.	Coûts de planification Cout d'approvisionnement Cout de production Cout de distribution Cout de gestion des commandes Cout du service après vente
	Gestion des actifs	Durée du cycle de fond de roulement	[La valeur des stocks exprimée en jours de chiffre d'affaires] + [durée entre la vente et la récupération des fonds] - [durée entre l'achat des matériel/service	- La valeur des stocks exprimé en jours de chiffre d'affaires. - Durée entre la vente et la récupération des fonds.
		Rendement des immobilisations	[(Supply Chain Revenue) – (Cout total)] / [immobilisations]	Immobilisations
		Rendement sur fond de roulement	[(Supply Chain Revenue) – (Cout total)] / [(valeur des stocks) +[Comptes débiteurs] – [Créances]]	Créances Comptes débiteurs Valeur des stocks

Tableau-I.2 Indicateurs du Model SCOR

	Axe Financier	Axe client	Axe Process Interne	l'apprentissage organisationnel
Approvisionnement	Réduction du prix d'achat (par rapport à l'ancien prix) Cout du service approvisionnement / achats gérés par le service Cout du service approvisionnement / économies générées par le service Cout moyen d'une commande Augmentation des délais de paiement des fournisseurs Valeur moyenne d'une commande Montant d'achat annuel par fournisseur	Niveau de satisfaction Nombre de jours de retard accumulés / nombre de livraisons en retard Actions impactant les parts de marché Actions impactant la fidélisation des clients	Délai moyen de traitement d'une demande d'achat Nb. lots non conformes / nb. lots reçus Nombre de changement classé par cause Nb. des fournisseurs actifs La rotation des stocks par type de produit Taux de rejet en raison de défauts de qualité	Chiffre d'affaire achat gérés par le service approvisionnement / chiffre d'affaire des achats Taux d'absentéisme Nombre d'heures de formation CA achat / effectif Evolution des salaires
Production	Couts de production / an dernier/budget Couts de production/ couts de la vente Cout associé à l'arrêt de machines Cout total de production/nombre des unités produites Cout des produits défectueux à cause de la qualité des matières premières Cout des produits défectueux à cause des erreurs humaines	Niveau de satisfaction Nombre des commandes par jour Nombre de minutes travaillées par jour	Nombre de défauts du produit en raison de la qualité des matières premières / nombre total de défauts Taux de production réelle/ taux de production cible Temps de cycle réel ÷ temps de cycle standard temps de cycle réel / temps de cycle idéal (temps de cycle minimum) (Production réelle - Production rejetée) / production réelle Temps d'arrêt pour la maintenance corrective Perte de temps pour revenir à la productivité de la production x Prix Nombre de défauts ÷ Taille du produit Nombre de défauts ÷ nombre d'unités produites Nombre de produits réalisés en retard ÷ Total des ordres de fabrication Taux de disponibilité x performance taux de qualité	Arrêts de production en raison d'un manque de formation du personnel / Total des arrêts de production Nb. abonnements à des revues techniques / bases de données Valeur totale produite par employés Consommation mensuelle d'énergie Quantité de déchets recyclés
Distribution	Couts des transport/ cout des ventes Couts des ventes Cout des transport soustraites / cout total des transports Coût de location ou amortissement des camions Coût de port coût total du transport	Nombre de commandes des clients livrés par jour par ETP	Capacité utilisé (m3) / capacité disponible durant la même période Ecart Livraisons Délai d'exécution des commandes Livraisons à temps / nombre total des livraisons % des commandes expédiée en totalité Temps moyen associé à l'expédition des produits	Montant des salaires des conducteurs Nombre des conducteurs Taux d'absentéisme

Tableau-I.3 Banque d'indicateurs de la chaîne logistique

I.4.3 Discussion

Le pilotage de la chaîne logistique ne peut se faire indépendamment de la stratégie, qui dépend elle aussi de plusieurs facteurs notamment le niveau de certitude en amont et en aval de la chaîne, le contexte global des entreprises formant la chaîne logistique (forces, faiblesses,

menaces et les opportunités). Chacune des stratégies décrite dans le deuxième paragraphe a ses propres objectifs stratégiques et ses propres facteurs clés de performance et a ainsi son propre système de pilotage, la différence réside dans la priorisation des indicateurs clés de performance et par la suite dans les actions à entreprendre en cas de contreperformance.

I.5 Gestion des risques liés à la chaîne logistique

I.5.1 La gestion des risques

L'environnement économique actuel fait face à de nombreux facteurs qui se traduisent par un risque très élevé d'autant plus qu'aucune autre période passée. Dans un tel contexte, la gestion des risques au sein des organismes s'avère une nécessité.

Selon la norme (ISO 31000, 2009), le management des risques est « l'ensemble des activités coordonnées dans le but de diriger et de piloter un organisme vis-à-vis du risque ».

Dans le but de réduire la vulnérabilité et d'assurer la durabilité, plusieurs Framework de gestion des risques sont apparus au cours des dernières décennies, ci-dessous les principaux :

- Committee of Sponsoring Organizations Enterprise Risk Management Framework (COSO ERM): Ce Framework est composé de huit éléments qui sont nécessaires pour aider une entreprise à atteindre ses objectifs à chaque niveau de l'organisation: stratégique, opérationnel, et tactique. Les neuf composantes du COSO sont, la détermination de l'environnement interne, la fixation des objectifs, l'identification des risques, l'évaluation des risques, le traitement des risques, les activités de contrôle et les systèmes d'information de communication (Curkovic et al, 2016)
- Gouvernance, risque et conformité (GRC), ce Framework est composé de trois principes de base, le premier est la gouvernance (politiques, procédures, contrôles) qui est nécessaire à la prise de décision et la gestion de l'entreprise. Le second est le management des risques qui est un ensemble de processus par lesquels on identifie, on analyse et on traite les risques qui pourraient avoir un impact sur la réalisation des objectifs. Le troisième principe est la conformité par rapport aux exigences (internes, des contrats, de la réglementation et des politiques) (Schlegel et al, 2015).
- ISO 31000 : afin de fournir un référentiel de mise en œuvre pour la gestion des risques d'entreprise, l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), a publié (ISO 31000, 2009). Selon cette norme, le processus de gestion des risques consiste : à établir le contexte, à l'identification des risques, à l'analyse des risques, à l'évaluation des risques, au traitement

des risques et au suivi et revu des risques.

Tous les Framework décrits ci-dessus sont basés sur l'analyse du contexte de l'organisme, l'identification, l'évaluation, le traitement et la surveillance des risques, la Figure I-5 schématise les différentes activités de la gestion des risques.

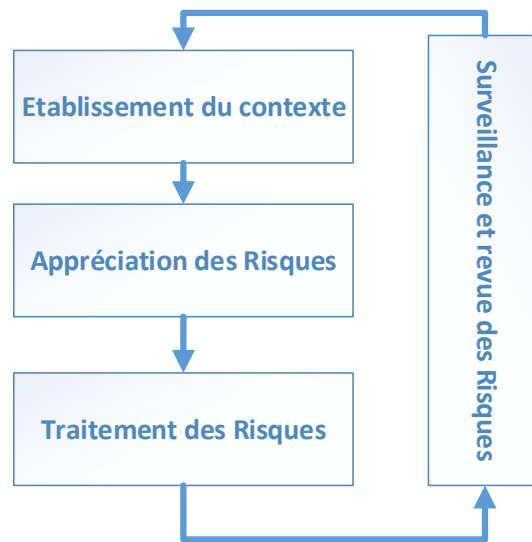


Figure I- 5 Les activités de la gestion des risques

I.5.2 La gestion des risques liés à la chaîne logistique

La gestion des risques de la chaîne logistique est la mise en œuvre d'un ensemble d'activités coordonnées pour gérer les risques tout au long de la chaîne grâce à l'identification efficace des risques, l'évaluation et la gestion de tous les risques importants en ayant comme objectif la réduction de la vulnérabilité, l'assurance de la continuité de l'activité (Schlegel et al, 2015) et l'amélioration de la performance. A l'instar de la gestion des risques d'entreprise, la gestion des risques de la chaîne logistique se compose de quatre étapes, d'abord, l'identification des risques, ensuite l'analyse et l'évaluation de ces risques, puis le traitement et la gestion des incidents à travers la communication et la coordination et finalement la surveillance et la revue des risques (Sodhi et Tang, 2012).

Selon le contexte de la chaîne logistique et la gravité de l'impact du risque, plusieurs approches de traitement sont possibles :

- Mitigation de risque qui signifie la prise des mesures nécessaires pour réduire à la fois la probabilité d'occurrence et l'impact d'un risque.
- Prévention de risque : signifie prendre des mesures pour réduire la probabilité d'occurrence

d'un risque.

- Eviter un risque consiste à éviter les activités qui augmentent la probabilité d'occurrence d'un risque.
- Acceptation d'un risque : dans ce cas on ne fait aucune action, car l'impact du risque est soit négligeable ou bien l'analyse des coûts/avantages révèle que le coût du traitement du risque dépasse l'impact de ce dernier.
- Partage du risque : consiste à transférer la gestion du risque à une tierce partie, l'achat d'assurance est une méthode de partage des risques.

1.5.2.1 L'identification et la catégorisation des risques

Après l'étude et l'analyse du contexte global, la première étape de toutes les approches du management des risques est l'identification, il existe plusieurs façons d'identifier et de classer les risques, nous classons les risques en vue de nous aider à distinguer entre ces risques et d'établir des priorités pour effectuer le traitement des risques (Sodhi et Tang, 2012).

Plusieurs méthodes de catégorisation des risques sont proposées ces dernières décennies. Parmi ces méthodes on cite celle qui prend en considération deux types de risques de la chaîne logistique, les retards dans les flux de matières qui sont généralement prévisibles et les perturbations de flux de matières partout dans la chaîne qui sont généralement imprévisibles et qui causent des dommages considérables (Sodhi et Tang, 2012).

Une deuxième méthode implique deux autres types de risque de la chaîne, les risques internes (portant sur des questions telles que la capacité, les règlements, le rendement de fabrication, les coûts, les retards) et les risques externes (prix du marché, les actions des concurrents, la qualité des fournisseurs, l'environnement socio-politiques) (Olson, 2014).

La troisième méthode est une démarche qui consiste à considérer quatre catégories de risques, les risques stratégiques qui influent sur la capacité d'exécuter la stratégie d'entreprise et de préserver les actifs et l'image de marque, les risques aléatoires imprévus (perturbations aléatoires, dont certains impliquent des catastrophes naturelles), les risques financiers et les risques opérationnels (Schlegel et al, 2015). La dernière méthode est une méthode qui se base sur l'organisation de la chaîne logistique, on catégorise les risques selon les principaux processus de chaque chaîne logistique.

Nous avons proposé dans (El Khayyam et Herrou, 2017) une démarche de gestion des risques

liés à la chaîne logistique. Pour chaque processus on distingue une catégorie de risque : risques liés aux approvisionnements, risques liés à la production et risques liés à la livraison. Le tableau I.4 résume quelques risques de la chaîne logistique en fonction de ses principaux processus.

		Risques
En amont de la chaîne logistique	R1	Retard de livraison des matières premières/composants
	R2	Matières premières/composants de mauvaise qualité
	R3	Retard de transport
	R4	Indisponibilité du sous-traitant
	R5	Augmentation des prix par les fournisseurs
	R6	Perturbation/interruption chez fournisseurs
	R7	Retard d'importation
	R8	Insolvabilité des fournisseurs
	R9	Fraude/corruption
	R10	Matériel de contrefaçon
Production	R11	Dégradation du rendement de la production
	R12	Capacité insuffisante
	R13	Retard de transmission des ordres de fabrication
	R14	Indisponibilité de la production
	R15	Arrêt non planifié de la production
	R16	Endommagement des stocks
	R17	Obsolescence des stocks
	R18	Divulgaration des propriétés intellectuelles
	R19	Erreurs humaines
	R20	Non respect de la planification
	R21	Produit non conforme/mauvaise qualité
	R22	Panne de matériel
	R23	Accident de travail
	R24	Vols
En aval de la chaîne logistique	R25	Erreur de prévision
	R26	Retard de livraison des commandes
	R27	Changement des exigences clients
	R28	Réduction du prix de vente
	R29	Faillite client
	R30	Non prise en compte des promotions
	R31	Produit non conforme/mauvaise qualité
	R32	Perte des parts de marché
	R33	Introduction d'un nouveau produit

Tableau-I. 4 Risques liés à la chaîne logistique

I.5.2.2 L'analyse et l'évaluation des risques

Pour évaluer les risques, les entreprises emploient des méthodes différentes en s'appuyant sur des modèles quantitatifs ou bien sur des méthodes qualitatives. L'analyse des risques nécessite généralement deux paramètres, la probabilité ou la fréquence du risque et l'impact des conséquences qui en découlent, la combinaison de ces deux paramètres forme l'intensité du risque (Sodhi et Tang, 2012).

Dans la pratique, l'évaluation des paramètres consiste à attribuer une valeur à l'aide d'une échelle de 1 à 4, l'intensité d'un risque peut être calculée selon la formule suivante.

Intensité du Risque (IR) = Impact x Fréquence x Détectabilité, impact et fréquence sont compris entre 1 et 4. Dans ce qui suit nous considérons que tous les risques aient le même niveau de détectabilité (égale à 1). Le risque est considéré :

- Faible, Si $0 < IR \leq 4$
- Moyen, Si $4 < IR \leq 8$
- Fort, Si $8 < IR \leq 12$
- Bloquant, Si $12 < IR \leq 16$

Dans la littérature plusieurs méthodes d'analyse des risques sont définies, ci-dessous une sélection de méthodes qui peuvent être utilisées lors de l'analyse des risques (Aven, 2008) :

- Coarse risk analysis : est une méthode permettant d'établir une image du risque brut à un instant t, effectuée par la subdivision du système en sous-éléments, puis la détermination des événements déclencheurs de risques et l'analyse des causes et des conséquences pour chacun de ces sous-éléments.
- Failure modes and effects analysis (FMEA) (AMDEC en Français) : implique le recensement de toutes les défaillances possibles ainsi que les effets de ces défaillances sur le système dans son ensemble. Un formulaire spécifique est utilisé pour effectuer l'analyse, pour chaque composante du système nous spécifions : l'identifiant, la fonction, les modes de défaillance, l'effet sur d'autres unités dans le système, l'effet sur le système, les mesures correctives, la fréquence de défaillance et le classement de l'effet de la défaillance.
- Structured What-If Technique (SWIFT): dans cette méthode on utilise systématiquement la question fondamentale « qu'est ce qui se passe si » afin d'identifier les écarts par rapport à des conditions normales. Les problèmes possibles et les combinaisons qui pourraient être problématiques sont analysés et les traitements possibles sont identifiés.
- Event tree analysis: cette méthode fournit un ensemble de scénarios possibles, elle essaye de répondre à la question: quel type de conséquences pourraient être générées par l'évènement déclencheur, cette méthode peut être considérée en tant que méthode qualitative ou bien quantitative selon son utilisation.

1.5.2.3 Le traitement des risques

Les entreprises trouvent généralement qu'il est difficile de justifier la mise en œuvre de stratégies-coûteuses pour l'atténuation des risques, en particulier dans le cas des risques éventuels qui se sont produits rarement dans le passé et qui ne pourraient pas se manifester

dans l'avenir. Donc il est nécessaire que le traitement des risques devrait permettre d'un côté de gérer efficacement la chaîne logistique et de l'autre côté, il doit la rendre plus résistante aux perturbations. Généralement, Il y a trois principales stratégies de traitement des risques de la chaîne logistique (Sodhi et Tang, 2012) :

- L'alignement de la récompense tout au long de la chaîne pour réduire les risques du comportement.
- La flexibilité pour réduire à la fois les risques d'approvisionnement, les risques de production et les risques liés à la fluctuation de la demande.
- Les réserves : la construction des réserves pour assurer la redondance qui est nécessaire pour réduire l'impact des perturbations ou des retards.

Un ensemble de stratégies peuvent être déployées au sein de la chaîne logistique pour faire face à un ensemble de risques (tableau I.5), ci-dessous quelques stratégies fournies par (Sodhi et Tang, 2012) :

- La différenciation retardée (postponement) se base sur des concepts relatifs à la conception du produit (standardisation, utilisation de plusieurs composants communs, conception modulaire) pour pousser le point de différenciation du produit, le maximum possible, vers l'aval de la chaîne logistique. Cette démarche permet de produire un produit générique en se basant sur les prévisions agrégées d'un ensemble de produits faisant partie à une même famille puis personnaliser le produit une fois la demande d'un produit spécifique est bien connue. Ce type de stratégie permet de reconfigurer le produit avec un moindre coût et moindre délai pour faire face aux perturbations de la chaîne logistique.
- Le stock stratégique consiste à assurer un stock de sécurité uniquement au niveau de certains emplacements stratégiques où ce dernier peut être utilisé par plusieurs acteurs de la chaîne logistique (détaillants, centres de réparation, centre de distribution). En cas de perturbations au niveau de la chaîne logistique, ce stock permettra de couvrir le besoin au niveau des zones impactées.
- Construire une base de fournisseurs flexible est l'une des stratégies permettant de faire face aux problèmes de perturbations de la chaîne logistique et à la fluctuation de la demande. Cette stratégie permet de maintenir la continuité de l'activité relative aux

approvisionnements en matières premières et composants en cas de défaillance d'un fournisseur donné.

- Produire et acheter : cette stratégie consiste à combiner entre la production de certains produits et l'achat d'autres produits, elle permet d'assurer une certaine flexibilité en cas de perturbations de la chaîne logistique en ayant plusieurs sources de fourniture des produits finis (unités de production et fournisseurs) qui permettront d'assurer les backups nécessaires à la continuité de l'activité.
- La récompense des fournisseurs : généralement une entreprise n'a pas toujours la possibilité de changer rapidement des fournisseurs à cause du nombre limité des fournisseurs au niveau de son panel. Pour avoir la flexibilité en termes de changement de fournisseurs, l'entreprise doit fournir des avantages, généralement des récompenses, à ces fournisseurs afin d'enrichir son panel de fournisseurs
- Flexibilité des moyens de transport : les perturbations au niveau des moyens de transport peuvent paralyser toute la chaîne logistique d'où la nécessité d'assurer un certain niveau de flexibilité concernant les moyens de transport mis en place. Cette flexibilité peut être assurée en utilisant plusieurs modes de transport (aérien, naval et routier), ou bien plusieurs fournisseurs de service du transport.
- Planification de la gamme dynamique est une stratégie visant à influencer le choix des consommateurs et par la suite maîtriser la variabilité de la demande clients en reconfigurant la disposition des produits (quantités mise à disposition et répartition spatiale) dans les grandes surfaces. Cette technique permet d'orienter le choix des consommateurs vers des produits de substitution disponibles lorsque certains produits sont en rupture.
- Contrats à quantité flexible (Tsay et Lovejoy, 1999) : généralement les entreprises ne peuvent pas modifier les quantités de produits commandées une fois les commandes sont soumises. Ce type de contrats permet aux commanditaires de modifier la quantité de sa commande soit en plus ou en moins dans la limite d'un certain pourcentage permettant ainsi de mieux faire face à la variabilité de la demande.
- Processus de production flexible : l'objectif étant de réaliser plusieurs opérations hétérogènes à partir d'un nombre limité de ressources et par la suite augmenter la

capacité du processus de production à s'adapter aux divers changements de son environnement, sans qu'il y ait besoin d'engendrer de nouveaux investissements, ou de perdre beaucoup de temps en reconfiguration. L'objectif de cette flexibilité est d'avoir plusieurs ressources qui peuvent assurer la production de plusieurs gammes de produits, chacune de ces ressources pourra remplacer une autre ressource défaillante et assurer la continuité de sa production.

Stratégie	Objectif principale	Avantages en cas de perturbation
La différenciation retardée (Postponement)	Améliorer la flexibilité et augmenter la variabilité des	Changement de la configuration de plusieurs produit rapidement
Le stock stratégique	Augmenter la disponibilité des produits	Répondre à la demande du marché rapidement en cas de perturbation
Base de fournisseurs flexible	Augmenter la flexibilité des approvisionnements	Transférer les demandes d'approvisionnement entre fournisseurs rapidement
Produire et acheter (Make-and-Buy)	Augmenter la flexibilité des approvisionnements	Produire en interne en cas d'un problème de fournisseurs
Récompense des fournisseurs	Augmenter la disponibilité des approvisionnements	Ajuster les quantités commandées rapidement
Distribution flexible	Augmenter la flexibilité de distribution	Changement du mode de distribution rapidement
Planification de la gamme dynamique	Améliorer la maîtrise de la demande	S'adapter à la variation d'une demande d'un produit rapidement
Contrats d'approvisionnement	Augmenter la flexibilité des réapprovisionnements	Modifier les quantités commandées en fonction des périodes
Processus de production flexible	Augmenter la flexibilité des machines pour produire plusieurs types de produits	Transférer la production vers d'autres ressources (machines ou usines)
Centraliser/décentraliser la gestion des stocks	Augmenter la disponibilité des produits et réduire les couts	Décentraliser pour les produits de faible valeur et une demande stable Centraliser pour les produits grande valeur et demande incertaine

Tableau-I. 5 Stratégies de traitement des risques liés à la chaîne logistique

I.6 Conclusion

Nous avons introduit dans ce chapitre les différentes notions relatives à la chaîne logistique, à la gestion de la chaîne logistique et aux risques liés à la chaîne logistique. Nous avons présenté également, les différents cadres conceptuels proposés dans la littérature en vue de piloter la chaîne logistique du point de vue gestion de la performance et du point de vue gestion des risques. L'ensemble de ces cadres conceptuels relatifs à la gestion de la performance ou des risques traitent séparément les deux notions fondamentales de management, les risques et la performance, or ces deux notions sont fortement liées ce qui impliquera la nécessité de mettre en place un cadre conceptuel de gestion intégrée de la performance et des risques.

La liaison entre ces deux notions et le cadre conceptuel de management intégrée des risques et de la performance seront abordés dans les chapitres suivant.

Chapitre II : Proposition d'une méthode collaborative d'analyse multicritère : CCAHP

II.1 Introduction

Les responsables industriels sont souvent confrontés à des situations dans lesquels ils doivent faire le choix entre plusieurs alternatives en prenant en considération un ensemble de critères et généralement le choix (la décision) se fait en commission composée de plusieurs décideurs. Ces situations peuvent être modélisée sous format de problèmes d'analyse multicritères dans un environnement de prise de décision en groupe.

L'objectif de ce chapitre est d'introduire une méthode collaborative d'analyse multicritère (CCAHP) en tant que méthode d'analyse multi critères, multi acteurs intégrant également un processus d'élaboration de consensus.

Nous commençons le chapitre par introduire les différentes notions qui seront utilisées par la méthode proposée qui sont le processus d'analyse hiérarchique (AHP), la prise de décision en groupe, le processus d'élaboration de consensus et la méthode de classification des centres mobiles qui sera utilisée dans l'élaboration du consensus. Nous présentons ensuite la méthode proposée et nous terminons le chapitre par une étude de cas relative à la réévaluation en groupe des fournisseurs d'une entreprise marocaine.

II.2 Les méthodes de prise de décision multicritère et le processus d'analyse hiérarchique (AHP)

II.2.1 Les méthodes de prise de décision multicritère

Les méthodes de prise de décision multicritère constituent une branche de recherche opérationnelle faisant partie des outils d'aide à la décision, ces méthodes sont fréquemment utilisées pour la prise de décision dans des problématiques réelles ayant plusieurs critères et/ou plusieurs objectifs qu'ils soient compatibles et/ou incompatibles. La prise de décision multicritère se fait selon un processus bien défini (Figure II-1), ce processus consiste d'abord à identifier le problème ainsi que les différentes solutions alternatives en se basant sur des règles de décision et en respectant les contraintes du problème. Ensuite le problème est subdivisé en sous problèmes pour permettre de récolter les données et les jugements relatifs à chaque sous problème, cette étape permet de construire ce qu'on appelle la matrice de décision qui permet d'évaluer les différentes alternatives en fonctions des différents

critères et finalement appliquer un modèle analytique permettant de regrouper le problème subdivisé et fournir des recommandations (Mourits et al., 2006)

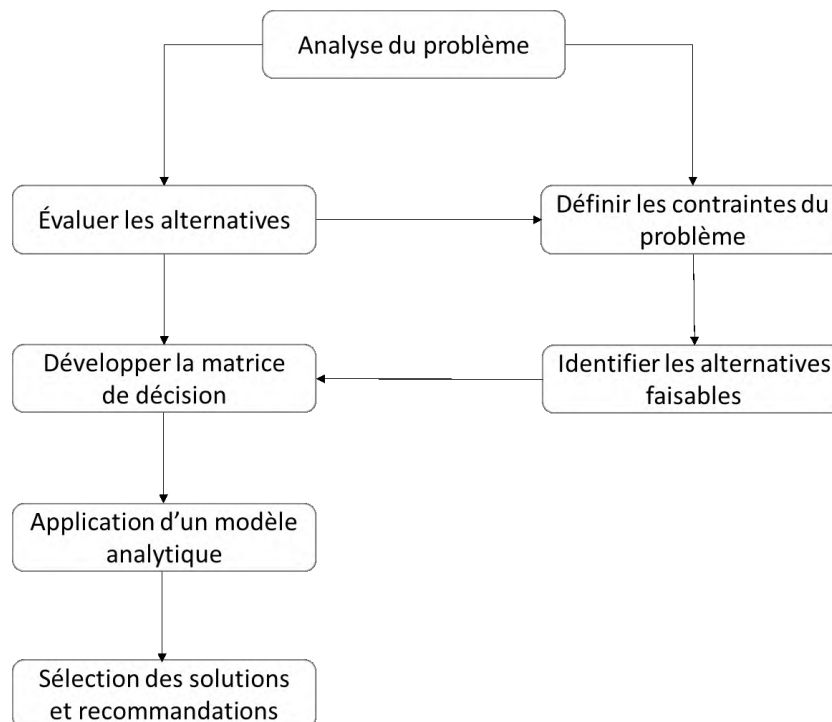


Figure II- 1 Processus de prise de décision multicritère

Les méthodes d'analyse multicritères sont classées sous deux catégories : les méthodes de prise de décision multi-attributs (MADM) et les méthodes de prise de décision multi-objectifs (MODM), la différence principale entre les deux catégories réside dans le fait que le MADM permet d'évaluer des solutions alternatives faisant partie d'un espace de décision discret, tandis que le MODM se focalise sur la prise de décision sous contraintes dans un espace de solutions continu. Les méthodes MADM consistent à identifier d'abord les différentes alternatives puis à déterminer le choix de chaque alternative par rapport à une autre en prenant en considération les différents critères, un par un, et finalement évaluer chaque alternative par rapport à l'ensemble des critères. Le MODM requiert généralement la formulation d'un modèle décisionnel en se basant sur la relation entre les critères évalués et les objectifs cibles. Le Tableau II-1 regroupe les différentes caractéristiques des deux approches (Bernroider et Stix, 2007).

Caractéristique	MADM	MODM
Critères définis par	Attribut/critère	Objectif
Modèle basé sur	Identification et évaluation des alternatives	Formulation d'un modèle basé sur la relation entre les critères d'évaluation et les objectifs cibles
Objectifs	Implicites	Explicites
Alternatives	Nombre limité	Nombre illimité
Espace de décision	Discret	Continu
paradigme de prise de décision	Orienté résultat	Orienté processus
Applicabilité	sélection/Evaluation	Conception/Recherche

Tableau II- 1 les différences entre MADM et MODM

A chacune des catégories citées ci-dessus appartient un ensemble de méthodes, chacune à ses propres caractéristiques et peuvent être utilisée, selon le besoin, dans des environnement différents (déterministes, probabilistes, flous) et par un seul acteur ou plusieurs décideurs dans le cas de prise de décision en groupe (Pohekar et Ramachandran, 2004).

Les principales méthodes MODM sont la programmation linéaire, le Goal programming et le lexicographique max-min. Les méthodes MADM, quant à elles, peuvent être catégorisées en trois classes, les méthodes élémentaires, les approches de synthèse unidimensionnelle et les approches de sur-classement (Figure II-2) :

- Les méthodes élémentaires sont des méthodes simples qui peuvent être utilisées sans faire appel à un programme informatique, il s'agit d'attribuer un score à chaque alternative en fonction de son évaluation par rapport aux différents critères. Il s'agit d'effectuer une somme ordinaire, ou bien une somme ou produit pondérés pour calculer le score des différentes alternatives (Linkov, 2004).
- Les méthodes de synthèse unidimensionnelle se basent sur un seul axe (point de référence, point idéal ou point anti-idéale) pour exprimer les préférences entre les différentes alternatives, parmi ces méthodes on cite TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) et GRA (Grey Relational Analysis) (Chen et Tzeng, 2004).
- Les méthodes de sur-classement se basent sur la comparaison deux à deux des différentes alternatives selon les différents critères afin de construire une relation de sur-classement entre les différentes alternatives et pour déterminer par la suite le degré de préférence d'une alternative par rapport à l'autre (Martel et Matarazzo, 2005). Parmi les méthodes de sur-classement les plus populaires, on

cite PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), ELECTRE (ELimination and Et Choice Translating REALity), ORESTE (Organisation Rangement Et Synthèse De Données Relationnelles) et AHP (Analytic Hierarchy Process) qu'on va utiliser dans le cadre de cette thèse du fait de sa popularité due à sa simplicité, à son impartialité et la logique offerte par son système de classement et aussi à sa flexibilité d'intégration avec d'autres techniques.

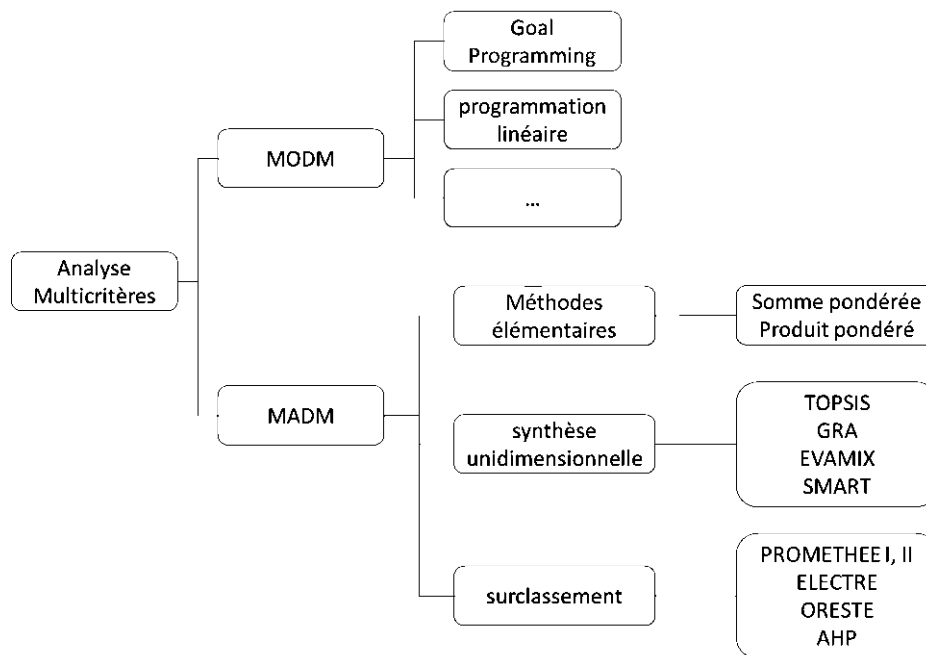


Figure II- 2 Les méthodes d'analyse multicritères

II.2.2 Le processus d'analyse hiérarchique (AHP)

Le processus d'analyse hiérarchique (AHP : Analytic Hierarchy Process) introduit par Saaty (Saaty, 1980) est actuellement la technique la plus utilisée pour la prise de décision multi-attributs. Cette technique tient sa popularité grâce premièrement à sa simplicité puis à l'impartialité et la logique offerte par son système de classement et aussi à sa flexibilité d'intégration avec d'autres techniques : programmation linéaire, la logique floue, la décision en groupe...) (Kubler et al., 2016). Cette technique peut être déclinée en six étapes (Vaidya et Kumar, 2006) :

1. Déterminer la problématique, ses objectifs, ses acteurs et les résultats attendus.
2. Déterminer les critères qui influencent les résultats attendus.

3. Structurer le problème selon une hiérarchie de plusieurs niveaux (objectif, critères, sous critères et les alternatives) Figure II-3.
4. Comparer deux à deux les éléments de chaque niveau, on procède à $n(n-1)/2$ comparaisons pour construire la matrice des comparaisons (1).
5. Effectuer les calculs nécessaires pour avoir le vecteur propre de la matrice, la valeur propre maximale, l'indice de consistance et le ratio de consistance.
6. Si la consistance est acceptable, on prend en compte le vecteur propre normalisé en tant que vecteur des priorités, sinon on réitère depuis l'étape 4.

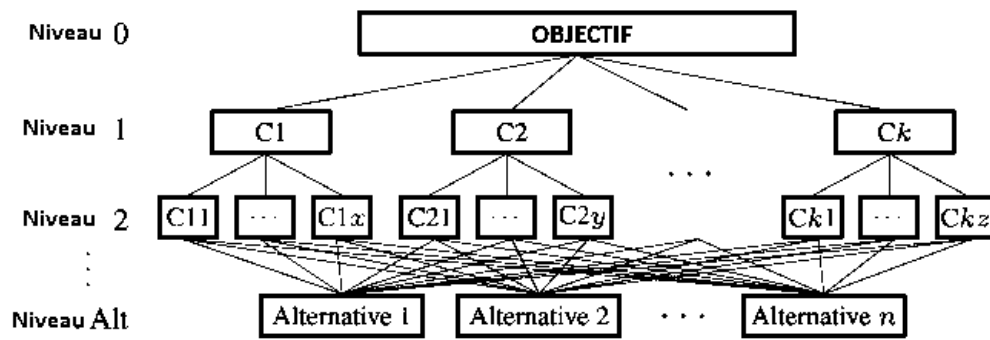


Figure II- 3 Structure générique du processus d'analyse hiérarchique

Si A est la matrice des comparaisons par paires (1), dans laquelle a_{ij} ($i, j \in N$) reflète le degré d'importance du critère i par rapport au critère j.

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matrice des comparaisons doit satisfaire les règles suivantes :

- Homogénéité : les éléments doivent être comparables.
- Réciprocité : $a_{ij} = a_{ji}^{-1}, \forall i, j \in N$ (2)
- Transitivité : $a_{ik} = a_{ij} * a_{jk} \forall i, k \in N, j \neq i \text{ et } j \neq k$ (3)

Le respect des règles (2) et (3) joue un rôle essentiel dans l'analyse AHP, ces deux règles servent à garantir la consistance des jugements d'un expert) (Kubler et al., 2016). La règle (2) vient du fait que la comparaison entre l'attribut i et l'attribut j doit être égale à l'inverse de la comparaison entre l'attribut j et l'attribut i, de ce fait on se contente seulement sur la comparaison de a_{ij} et on déduit a_{ji} , la matrice des comparaisons est sous la forme (4).

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

La règle (3) signifie que chaque comparaison directe a_{ik} doit être confirmée par les comparaisons indirectes $a_{ij} \cdot a_{jk} \forall j$. autrement dit un expert doit être capable d'effectuer des comparaisons par paires sans se contredire (Brunelli, 2015).

Saaty a démontré (Saaty, 1977) qu'une matrice des comparaisons de dimension n est consistante si et seulement si le vecteur propre maximal $\lambda_{\max}$ est égale à n , il propose l'indice de consistance (5) et le ratio de consistance (6) pour la prise en considération de la dimension des matrices lors du calcul de la consistance.

$$CI(A) = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR(A) = \frac{CI(A)}{RI_n} \quad (6)$$

RI_n est un indice aléatoire qui représente une estimation de la consistance moyenne d'un nombre suffisant de matrices de dimension n générées aléatoirement, le tableau II-2 présente un ensemble d'indices aléatoires en fonction de la dimension. Selon Saaty (Saaty, 1980), en pratique le seuil d'acceptation d'une matrice des comparaisons est de 0.1.

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI_n	0.5247	0.8816	1.1086	1.2479	1.3417	1.4057	1.4499	1.4854

Tableau II- 2 Valeurs de l'indice aléatoire RI_n

II.3 La prise de décision en groupe et le processus d'élaboration du consensus

II.3.1 La prise de décision en groupe

La prise de décision en groupe occupe une position centrale dans l'univers économique et managérial, d'un point de vue macro le vote est une forme de prise de décision en groupe dans les nations démocratiques, la définition des mécanismes du marché nécessitent eux aussi une prise de décision en groupe pour résoudre des

problématiques économiques. D'un point de vue micro ils existent plusieurs problématiques de prise de décision en groupe dans lesquelles les individus sont amenés à travailler et décider en groupe (Dong et Xu, 2016).

La prise de décision en groupe est une tâche qui nous permet de trouver une solution collective à un problème décisionnel dans une situation dans laquelle un groupe d'experts expriment leurs jugements vis-à-vis de plusieurs alternatives (Dong et Xu, 2016). La prise de décision en groupe peut être modélisée de la manière suivante (Dong et Xu, 2016):

- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ ($m \geq 2$) un ensemble d'alternatives.
- $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ ($n \geq 2$) un groupe d'expert.
- OP^k ($k = 1, 2, \dots, n$) est le jugement fourni par l'expert E_k sur l'ensemble d'alternatives X .

L'objectif de la prise de décision en groupe est de combiner les préférences individuelles (F : fonction d'agrégation) afin d'obtenir une préférence collective

$$F(OP^1, OP^2, \dots, OP^n) = OP^c \quad (7)$$

Dans l'équation (7), deux notions relatives à la prise de décision en groupe surgissent, ce sont la structure de représentation de préférence et la fonction d'agrégation.

Concernant la structure de représentation de préférence des différents experts, plusieurs structures de préférence sont utilisées dans la prise de décision en groupe parmi lesquelles on cite la structure de préférence par ordre où chacun des experts exprime son jugement en ordonnant les différentes alternatives. On cite aussi la structure de préférence par relation où l'expert exprime son jugement à travers l'attribution d'un poids aux différentes alternatives.

La fonction d'agrégation joue un rôle important dans la prise de décision en groupe, plusieurs fonctions d'agrégations sont proposées dans la littérature, on cite les deux fonctions basiques proposées par Yager (Yager, 1988) : l'opérateur de moyenne pondérée F^{WA} (poids attribué au experts, équation 8) et l'opérateur de moyenne pondérée ordonnée F^{OWA} (poids attribué à l'ordre des alternatives, équation 9).

$$F^{WA}(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot y_i) \quad (8)$$

$$F^{OWA}(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot y(i)) \quad (9)$$

II.3.2 Le processus d'élaboration du consensus

La prise de décision en groupe telle que définie ne garantit pas l'obtention d'une solution collective admise par tous ou la majorité des experts d'où la nécessité d'intégrer un processus d'élaboration de consensus. L'intégration d'un processus d'élaboration de consensus dans la prise de décision en groupe permettra de rendre l'implémentation de la solution choisie plus effective du fait que la majorité participera activement à l'implémentation de la solution communément choisie. L'intégration de ce processus permettra aussi de promouvoir la communication entre les membres de l'équipe et par la suite créer une synergie au sein du groupe.

Le processus d'élaboration de consensus, Figure II-4, consiste en trois phases (Dong et Xu, 2016) :

1. Utiliser la fonction d'agrégation pour obtenir une préférence collective à partir des préférences individuelles.
2. Utiliser une méthode de mesure de consensus permettant de mesurer le degré de consensus entre les experts, généralement on essaye de minimiser la distance entre les préférences individuelles et la préférence collective.
3. Utiliser un mécanisme de feed-back permettant d'aider les experts à modifier leurs préférences afin d'améliorer le degré de consensus.

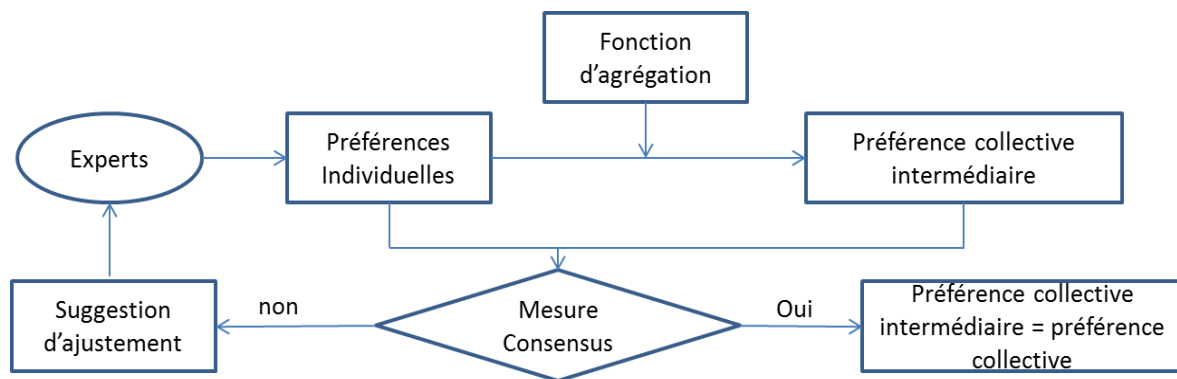


Figure II- 4 Processus d'élaboration de consensus

Le partitionnement des préférences des différents experts en différentes classes pourra aider dans la mesure de consensus et dans le mécanisme de feed-back, le paragraphe suivant introduit d'une manière générale les méthodes de regroupement et d'une manière spécifique la méthode des centres mobiles.

II.4 Les méthodes de classification/regroupement

II.4.1 Les méthodes de classification

Dans ces dernières décennies, les méthodes de classification/regroupement ont joué un rôle important dans plusieurs domaines que ce soit dans les sciences sociales, l'analyse des marchés, le marketing, les finances, la biologie...

L'objectif des méthodes de classification est de regrouper en classes homogènes un ensemble d'individus en se basant sur un critère de classification (similarité ou dissimilarité). On distingue plusieurs catégories d'algorithmes de classification (Wu, 2012) :

- Algorithmes basés sur la densité sont des algorithmes qui constituent des groupes en déterminant des zones selon la répartition de la densité des points étudiés, ces méthodes sont utilisées généralement lorsque les regroupements sont irréguliers ou chevauchés. Parmi ces algorithmes on cite DBSCAN qui constitue les différentes classes en se basant sur la densité euclidienne et classifie les différents points en points centraux, points frontaliers et bruits (Ester et al., 1996). Une autre méthode qui se base sur la densité est DENCLUE qui définit une fonction de densité de probabilité rendant compte de l'influence des différents points en tout point de l'espace, les maxima locaux de cette fonction constituent un ensemble de points « density attractors » autour desquels les classes sont construites (Hinneburg et Keim, 1998).
- Algorithmes basés sur la définition des prototypes : ces algorithmes déterminent en premier lieu un prototype de chaque classe ensuite forment les différentes classes autour de chaque prototype. Parmi ces algorithmes, nous citons l'algorithme K-means (MacQueen, 1967), l'algorithme fuzzy c-means (Bezdek, 1981), l'algorithme SOM « Self-Organizing Map » (Kohonen, 2000) et l'algorithme MM « Mixture Model » (McLachlan, 2000).
- Algorithmes basés sur les graphes : dans cette catégorie d'algorithmes, chaque

point est considéré comme un sommet du graphe, les distances entre les points sont les poids des différents arcs, ainsi l'ensemble des points analysé est représenté sous format de graphe et les classes sont des sous graphes. Parmi ces méthodes on cite la méthode AHC « Agglomerative Hierarchical Clustering » (Tan et Steinbach, 2005) qui consiste à regrouper à chaque fois les deux sommets les plus proches jusqu'à ce que tous les sommets soient connectés. Nous citons également les méthodes NC « Normalized Cuts » (Shi et Malik, 2000) et MinMaxCut (Ding et al., 2001) comme des méthodes de classification basées sur les graphes.

- Algorithmes de classification hybrides : ces algorithmes sont utilisés pour pallier aux limites de certains algorithmes de classification, ils consistent à combiner deux ou plusieurs algorithmes de même catégorie ou de catégories différentes afin d'améliorer les résultats de classification.

II.4.2 La méthode des centres mobiles

Nous nous intéressons dans notre étude à la méthode des centres mobiles du fait qu'elle s'agit, d'une part, de l'une des plus ancienne et des plus utilisées des méthodes de classification, et de l'autre part, du fait de sa simplicité et de l'abondance des outils informatiques qui implémentent son algorithme. Cette méthode s'applique lorsqu'on sait à l'avance combien de classe on veut obtenir, Appelons k ce nombre de classes L'algorithme est le suivant :

- Etape 0 : Pour initialiser l'algorithme, on tire au hasard k individus appartenant à la population, ce sont les k centres initiaux. On va ensuite répéter plusieurs fois les deux étapes suivantes :
- Etape 1 : Constitution de classes : On répartit l'ensemble des individus en k classes en regroupant autour de chaque centre l'ensemble des individus qui sont plus proches du centre que des autres centres.
- Etape 2 : Calcul des nouveaux centres : On détermine les centres de gravité des k classes ainsi obtenues et on désigne ces points comme les nouveaux centres.
- Répétition des étapes 1 et 2 : on répète ces deux étapes jusqu'à la stabilisation de l'algorithme, c'est-à-dire jusqu'à ce que le découpage en classes obtenu ne soit (presque) plus modifié par une itération supplémentaire.

Pour évaluer la classification obtenue, les indexes de Davies-Bouldin (DB) et Dunn peuvent être utilisés (Soares et Souza 2017), DB index prend en considération les centres des groupes pour calculer les distances inter et intra groupes

$$DB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{j \neq i} \left(\frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)} \right) \quad (10)$$

n étant le nombre de groupe, c_i est le centre du groupe i, σ_i est la distance moyenne entre les éléments du groupe i et $d(c_i, c_j)$ est la distance entre le groupe i et le groupe j. la qualité du groupement est meilleure lorsque l'index DB est petit. Cet index n'est pas valable lorsque les données sont très denses ou très éparpillées. Cette limitation peut être évitée en utilisant l'index de Dunn :

$$D = \frac{\min_{1 \leq i < j \leq n} d(i, j)}{\max_{1 \leq k \leq n} d'(k)} \quad (11)$$

$d(i, j)$ est la distance entre le groupe i et le groupe j et $d'(k)$ est la distance entre les éléments du groupe k. Pour un groupement efficace, la distance intragroupe doit être la plus petite possible tandis que la distance intergroupe doit être la plus grande possible. La qualité du groupement est meilleure lorsque l'index D est grand.

II.5 La méthode collaborative d'analyse multicritère proposée : CCAHP

La méthode CCAHP (Collaborative and Clustering Analytic Hierarchy Process) est une méthode de prise de décision en groupe que nous avons proposé dans le cadre des travaux publiés en (El Khayyam et Herrou, 2018 a). Il s'agit d'une méthode d'analyse multicritères et multi-acteurs, la structure de préférence des problématiques qui rentrent dans le périmètre étudié est par relation : les différents acteurs (experts) attribuent un poids aux différentes alternatives en utilisant le processus d'analyse hiérarchique (AHP). Nous utilisons le regroupement des différents jugements en utilisant la méthode des centres mobiles puis nous utilisons l'opérateur de moyenne pondérée en tant que fonction d'agrégation dans le processus itératif d'élaboration de consensus. La convergence vers le consensus sera mesurée par la dispersion entre les jugements des experts, cette dispersion est inversement corrélée avec la convergence vers le consensus (Lorsqu'on réduit la dispersion la

convergence vers le consensus est dans la bonne voie).

La démarche proposée consiste à (Figure II-5) :

1. Déterminer le degré d'importance (poids) de chacun des experts faisant partie du groupe.
2. Chacun des experts effectue les comparaisons nécessaires entre les différentes alternatives puis on détermine le vecteur de priorité et le ratio de consistance relatifs à la matrice des comparaisons exprimée par l'expert.
3. Si le ratio de consistance est insatisfaisant, on invite l'expert à réajuster ses jugements afin de réduire l'inconsistance jusqu'à atteindre un seuil bien déterminé.
4. Calculer les nouveaux poids associés aux différents experts : en fonction du ratio de consistance (équation 12).
5. Calculer la dispersion initiale entre les jugements des différents experts
6. Classer les jugements des experts en deux classes en utilisant la méthode des centres mobiles. Si une des classes est majoritaire et plus dense on passe à l'étape suivante, sinon on regroupe les jugements en $k+1$ groupe (initialement $k=2$) jusqu'à l'obtention d'une classe majoritaire et plus dense ou l'atteinte du k limite. Si aucune des classes obtenues n'est majoritaire et plus dense, on considère la classe la plus dense en tant que classe majoritaire.
7. Agréger les vecteurs de priorité des experts faisant partie de la classe majoritaire, en utilisant l'opérateur d'agrégation des moyennes pondérées.
8. Suggérer aux experts appartenant à la classe de moindre cardinale (moins dense) de modifier leurs jugements en leur exposant le vecteur de priorité précédemment calculé.
9. S'il y a des modifications, vérifier le ratio de consistance et inviter l'expert à ajuster ses jugements afin de réduire l'inconsistance jusqu'à atteindre un seuil bien déterminé.
10. Calculer les nouveaux poids associés aux différents experts : en fonction du ratio de consistance (équation 12).
11. Répéter les étapes 6-10 jusqu'à la condition d'arrêt (Nombre d'itérations ou bien Taux de réduction de dispersion cible).
12. Agréger les vecteurs de priorité en un seul en utilisant les nouveaux poids

calculés en fonction de la consistance de chaque expert.

Nous calculons les nouveaux poids associés aux différents experts en fonction de l'inconsistance de chacun, le poids d'un expert est sujet à diminution si les propos de ce dernier sont inconsistants. La valeur maximale du poids est le poids initial p_0 , et la valeur minimale est 0 si le jugement est complètement inconsistent.

Nous avons choisi de faire diminuer le poids exponentiellement suite à l'augmentation de l'inconsistance et rendre le poids nul si le ratio de consistance est supérieur ou égale à 1 (le fait que $CR=1$ est interprété selon (Saaty, 1980) par le fait que tous les jugements relatifs à une matrice des comparaisons sont donnés aléatoirement). Les trois conditions ci-dessous nous permettent de formuler la relation entre la consistance et le poids révisé d'un expert selon l'équation (12) :

- Diminution exponentielle en fonction CR ($CR=1/2$, $Pr= P_0/8$)
- P_0 est la valeur maximale atteinte lorsque $CR=0$
- Poids nul à partir de $CR=1$

$$P_{réduit}(CR) = P_0 e^{-2 \cdot \ln(8) \cdot CR} \text{ et } P_{réduit}(CR) = 0 \forall CR \geq 1 \quad (12)$$

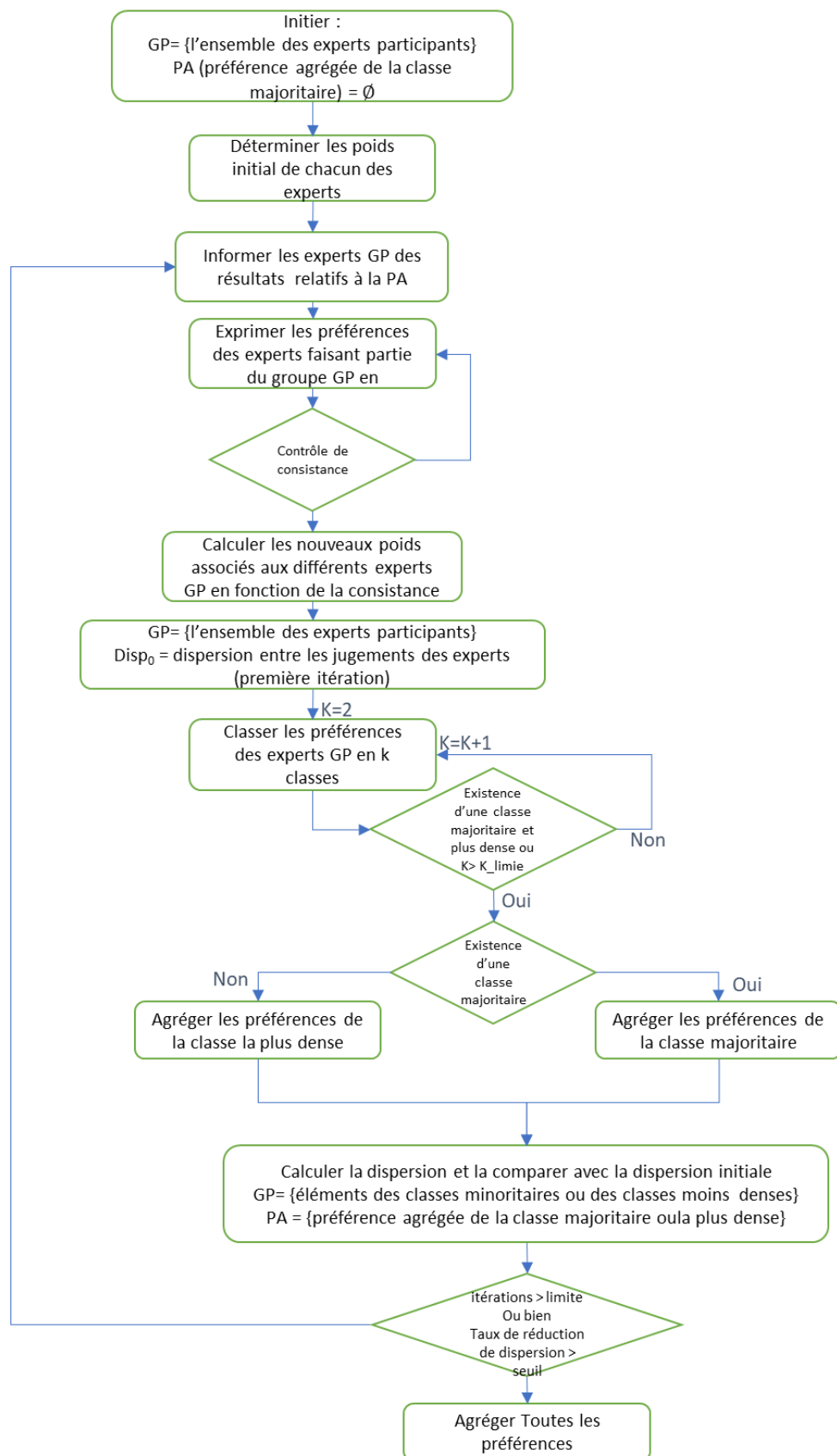


Figure II- 5 Logigramme de la méthode CCAHP

II.6 Etude de cas : la réévaluation des fournisseurs en groupe

II.6.1 La mise en situation

L'étude de cas proposée dans ce paragraphe concerne le département administratif et financier (et plus précisément le service achats) d'une entreprise marocaine (TSP) spécialisée dans la fourniture des services télécoms au niveau de la région Fès-Meknès et Deraa-Tafilalt. L'organigramme de ladite entreprise est présenté dans la Figure II-6, cette entreprise est constituée des entités supports (RH, Administratif, pilotage commercial et pilotage technique) localisées au niveau du siège et des entités opérationnelles réparties sur le territoire couvert par l'entreprise.

Cette entreprise opte pour la sous-traitance des opérations techniques au niveau des différentes délégations (travaux de génie civil, travaux de câblage, relève de dérangement, etc). L'attribution des prestations aux différents sous-traitant se fait (par le service achat) à travers le lancement des appels d'offres et la contractualisation avec chaque prestataire, alors que le pilotage et le suivi de l'exécution des travaux sont assurés par les différents services techniques des délégations.

La consultation d'un prestataire pour un nouveau contrat se fait en se référant à un panel fournisseurs propre à l'entreprise, ce panel est mis à jour régulièrement d'un côté, par le recrutement de nouveau fournisseurs (sur étude de dossiers) et de l'autre côté par la réévaluation annuelle des fournisseurs faisant partie du panel. La réévaluation annuelle permet d'effectuer une classification des prestataires en prestataires excellents, bon, moyens et mauvais, les prestataires moyens et mauvais ne seront pas consultés jusqu'à ce qu'ils présentent un plan d'action au service achats et assurent sa mise en œuvre. Le service achats, en coordination avec les services utilisateurs, s'assurent de la mise en œuvre du plan d'action présenté en exigeant des preuves de résultats aux fournisseurs concernés.

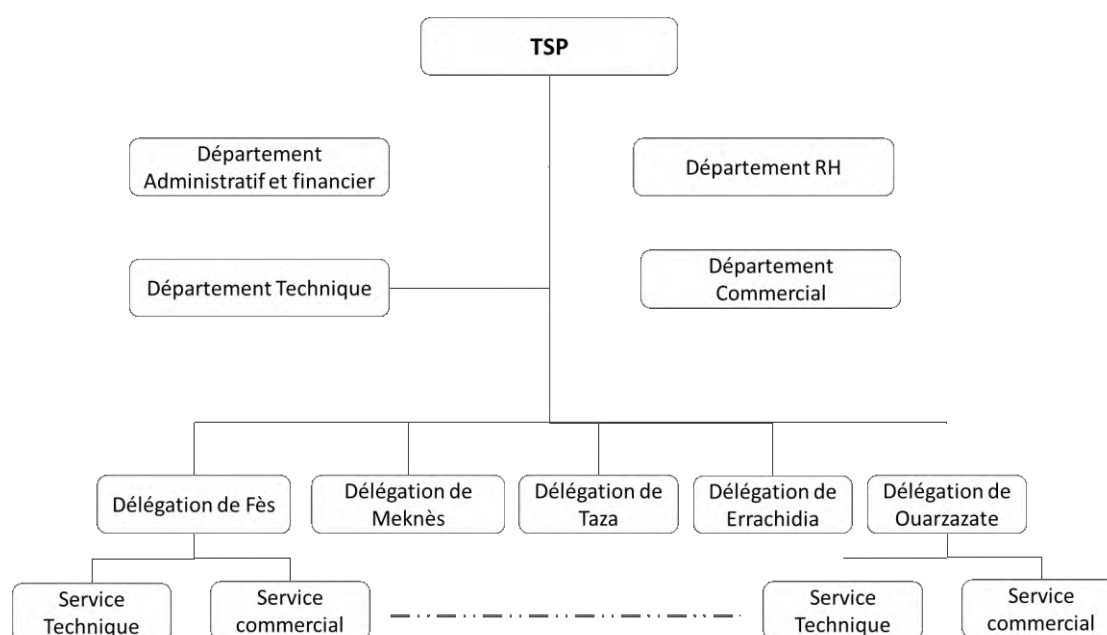


Figure II- 6 Organigramme de l'entreprise TSP

II.6.2 La problématique

La réévaluation des fournisseurs est une activité essentielle pour la gestion du panel fournisseurs, un système de réévaluation des fournisseurs est déjà mis en place au niveau du service achat. Le service achat de l'entreprise étudiée procède chaque année à une réévaluation de ces principaux fournisseurs en fonction d'un ensemble de critères prédéfinies (Tableau II-3) et à l'aide des différents services utilisateurs.

Chaque fournisseur aura une appréciation globale et sera classé selon 4 catégories, la catégorie A (Excellent), la catégorie B (Bon), la catégorie C (Moyen) et la catégorie D (Faible).

- Si le fournisseur est dans la catégorie A, l'acheteur l'informe par courrier des résultats de la réévaluation. Le fournisseur sera invité à veiller au maintien de cet acquis.
- Si le fournisseur est dans la catégorie B, l'acheteur l'informe par courrier des résultats de la réévaluation, et l'informe des points sur lesquels il peut s'améliorer : il ne lui sera pas demandé de plan d'action.
- Si le fournisseur est dans la catégorie C ou D, l'acheteur organise avec lui une rencontre en présence des autres membres de la commission de réévaluation afin de l'informer des résultats de la réévaluation en lui communiquant un rapport

clair et détaillé sur ses résultats et de lui demander de mettre en place un plan d'action avec planning précis en vue de s'améliorer dans un délai maximum d'un mois. L'acheteur et le service utilisateur s'assurent de l'exécution dudit plan d'action.

- Si le fournisseur est défaillant (n'a pas mis en place un plan d'action pour s'améliorer, n'a pas respecté le plan d'action ou n'a pas respecté le délai), le service achats entame la procédure de sa mise en liste des fournisseurs défaillants.

	Critère de réévaluation
C1	Solidité de la situation financière (CA annuel, Fond de roulement, Taux d'endettement ...).
C2	Souplesse en termes de négociation (délai, conditions de paiement, etc.)
C3	Respect du délai contractuel et ponctualité des prestations
C4	Respect des spécifications techniques et adéquation des prestations au besoin exprimé
C5	Constance de la qualité du produit et de la prestation fournis

Tableau II- 3 Critères de réévaluation des fournisseurs

Suite aux différents audits et contrôles des fournisseurs effectués sur le terrain, par le département technique, il s'est avéré qu'il y a une incohérence entre la note globale attribuée lors de la réévaluation et la prestation sur le terrain, ce qui met en question la crédibilité du système de réévaluation actuel.

Suite aux discussions entamées avec les différents responsables des services utilisateurs ainsi que du service achat, il s'est avéré que :

- Les critères de réévaluation ne sont pas pondérés.
- Absence d'une méthode d'agrégation permettant de déduire la notation globale d'un fournisseur à partir de la notation des différents critères.
- Les services utilisateurs ne sont pas toujours intégrés dans la réévaluation surtout lorsqu'il s'agit d'un prestataire qui agit sur le périmètre de plusieurs délégations.

II.6.3 La mise en application du modèle proposé et la résolution de la problématique

Pour la priorisation des critères de réévaluation, nous avons proposés de faire participer tous les services utilisateurs en attribuant à chacun d'eux un poids en

fonction de son interaction avec le fournisseur puis demander à chacun d'eux de fournir les comparaisons nécessaires (priorisation des critères en groupe en utilisant la démarche CCAHP). Pour faciliter cette tâche nous avons mis en place une application web permettant de faciliter le calcul des vecteurs de priorité et les ratios de consistance des différents intervenants comme précisé dans la Figure II-7.

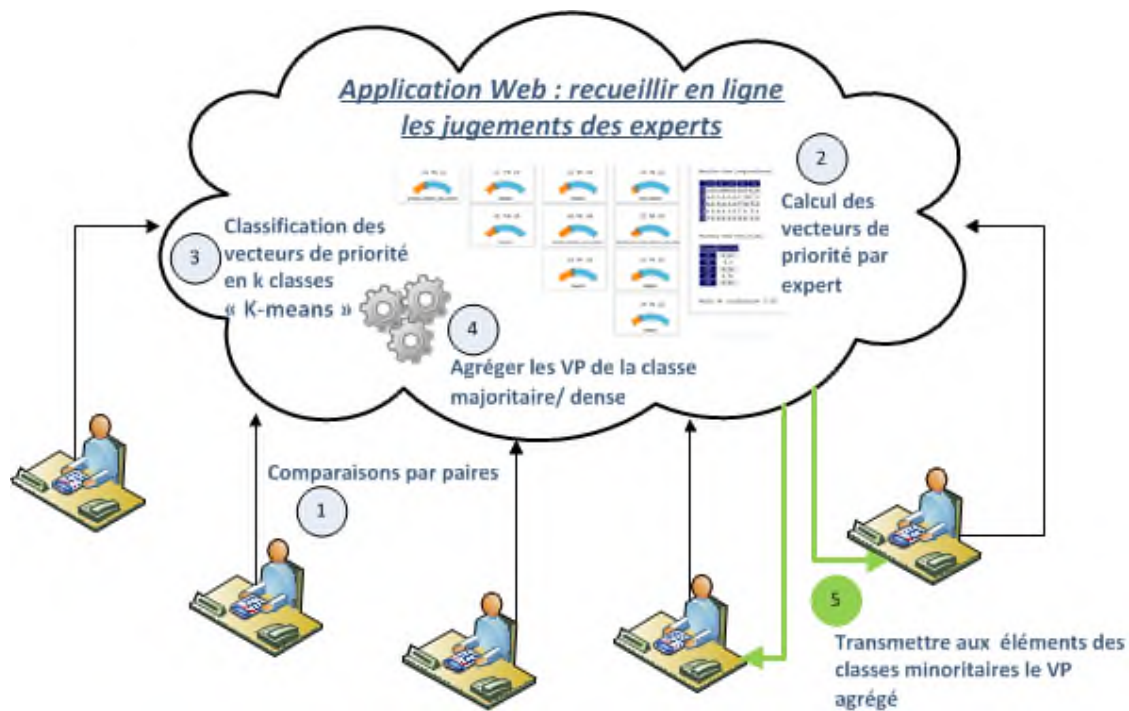


Figure II- 7 Schéma Synoptique de l'application de recueil des jugements en ligne

Une fois les critères priorisés en utilisant la méthode CCAHP, on demande à chacun des utilisateurs d'attribuer une note aux différents critères pour un fournisseur donné, chaque utilisateur fournira un vecteur dont les composantes sont les valeurs A, B, C, D attribuées aux différents critères.

Nous avons proposé de représenter chaque valeur A, B, C, D par un intervalle comme suit :

- $A = [90, 100]$
- $B = [70, 90[$
- $C = [50, 70[$
- $D = [0, 50[$

La formule d'agrégation des différentes notations attribuées par les utilisateurs est calculée selon l'équation (13) :

$$\begin{bmatrix} \text{note } C1 \\ \text{note } C2 \\ \vdots \\ \text{note } Ck \end{bmatrix} = \frac{\sum_u \left(\begin{bmatrix} \text{note } C1_u \\ \text{note } C2_u \\ \vdots \\ \text{note } Ck_u \end{bmatrix} * \text{poid}_u \right)}{\sum_u \text{poid}_u} \quad (13)$$

La note globale attribuée à un fournisseur est calculée ensuite selon la pondération de chaque critère et en fonction du vecteur d'évaluation agrégé des différents utilisateurs, équation (14) :

$$\text{Note}_F = \sum_k \text{poid}_{c_k} * \text{note } C_k \quad (14)$$

Ainsi la réévaluation d'un fournisseur se fait en deux phases, la première est la priorisation des critères en groupe en faisant appel à la méthode CCAHP et la deuxième est l'attribution des notes par tous les services utilisateurs concernées et l'agrégation des résultats obtenus en utilisant les équations (13) et (14).

Pour mettre en application le nouveau système de réévaluation proposé, nous avons entamé la réévaluation d'un prestataire F1 qui assurent une prestation couvrant l'ensemble des délégations de l'entreprise TSP, la Figure II-8 illustre l'interface permettant à chaque utilisateur d'effectuer les comparaisons nécessaires, de calculer le vecteur de priorisation et le ratio de consistance ainsi que le poids réduit de chaque entité.



Figure II- 8 Priorisation des critères de réévaluation par une entité

Le Tableau II-4 représente les matrices des comparaisons élaborées par les services techniques des différentes délégations et le Tableau II-5 représente les résultats de priorisation des critères. Initialement tous les utilisateurs avaient le même poids qui a subi une modification en fonction du ratio de consistance conformément à l'équation (12).

ST1	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	3.0	0.5	0.5	2.0
C2	0.33	1.0	0.33	0.33	0.25
C3	2.0	3.0	1.0	1.0	0.33
C4	2.0	3.0	1.0	1.0	3.0
C5	0.5	4.0	3.0	0.33	1.0

ST2	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	3.0	0.5	0.5	0.33
C2	0.33	1.0	0.33	0.33	0.25
C3	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0
C4	2.0	3.0	0.5	1.0	3.0
C5	3.0	4.0	1.0	0.33	1.0

ST3	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	3.0	0.2	0.17	0.17
C2	0.33	1.0	0.25	0.2	0.25
C3	5.0	4.0	1.0	3.0	0.2
C4	6.0	5.0	0.33	1.0	0.33
C5	6.0	4.0	5.0	3.0	1.0

ST4	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	3.0	0.17	0.25	0.25
C2	0.33	1.0	0.25	0.2	0.33
C3	6.0	4.0	1.0	0.2	0.2
C4	4.0	5.0	5.0	1.0	0.33
C5	4.0	3.0	5.0	3.0	1.0

ST5	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	1.0	0.25	0.33	0.33
C2	1.0	1.0	0.33	0.11	0.17
C3	4.0	3.0	1.0	1.0	1.0
C4	3.0	9.0	1.0	1.0	1.0
C5	3.0	6.0	1.0	1.0	1.0

ST6	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.0	1.0	0.25	0.33	0.33
C2	1.0	1.0	0.2	0.2	0.25
C3	4.0	5.0	1.0	0.2	0.25
C4	3.0	5.0	5.0	1.0	4.0
C5	3.0	4.0	4.0	0.25	1.0

Tableau II- 4 Les matrices des comparaisons des critères relatives aux différentes entités

Utilisateur	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6
Poids initial	1	1	1	1	1	1
C1	0,2	0,15	0,09	0,09	0,07	0,06
C2	0,06	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06
C3	0,21	0,25	0,26	0,23	0,24	0,23
C4	0,28	0,27	0,25	0,31	0,35	0,39
C5	0,25	0,26	0,37	0,32	0,28	0,26
Ratio de consistance	0,15	0,1	0,18	0,23	0,03	0,16
Poids réduit	0,54	0,66	0,47	0,38	0,88	0,51

Tableau II- 5 priorisation des critères par les différentes entités et poids réduit de chaque entité

En analysant les vecteurs de priorité des différents services techniques, il s'avère que par rapport au centre de gravité de l'ensemble la distance moyenne est de 0.29 et la distance maximale est de 0.49.

Suite à la classification des résultats (en utilisant la méthode des centres mobiles),

les services techniques ST3, ST4, ST5, ST6 forment un groupe et les service ST1 et ST2 forment un autre, nous avons envoyé aux ST1 et ST2 l'agrégation pondérée des autres entités et nous les avons sollicités de refaire l'analyse, ci-dessous les résultats de la deuxième itération.

Utilisateur	ST1	ST2
Poids initial	1	1
C1	0,11	0,15
C2	0,06	0,06
C3	0,24	0,25
C4	0,31	0,27
C5	0,28	0,26
Ratio de consistance	0,13	0,1
Poids réduit	0,58	0,66

Tableau II- 6 Priorisation des critères par ST1 et ST2 (deuxième itération)

Suite à la deuxième itération, il s'avère que par rapport au centre de gravité de l'ensemble (les six nouveaux vecteurs) la distance moyenne est de 0.23 et la distance maximale est de 0.41.

En vue d'améliorer davantage la dispersion des vecteurs de priorité nous avons effectué une deuxième fois un classement en deux groupes, ce qui produit deux ensembles de même taille (ST1, ST2, ST3) et (ST4, ST5, ST6).

Le groupe (ST4, ST5, ST6) est le plus dense des deux groupes, nous avons envoyé aux ST1 et ST2 et ST3 l'agrégation pondérée des autres entités et nous les avons sollicités de refaire l'analyse, ci-dessous les résultats de la Troisième itération

Utilisateur	ST1	ST2	ST3
Poids initial	1	1	1
C1	0,11	0,1	0,09
C2	0,06	0,06	0,07
C3	0,24	0,27	0,26
C4	0,31	0,3	0,29
C5	0,28	0,26	0,3
Ratio de consistance	0,13	0,1	0,18
Poids réduit	0,58	0,66	0,47

Tableau II- 7 Priorisation des critères par ST1, ST2 et ST3 (Troisième itération)

En analysant les vecteurs de priorité suite aux différentes itérations de comparaison par paires, la nouvelle distance moyenne est de 0,19 soit une amélioration de 33% de la dispersion entre les différents jugements des services techniques.

L'agrégation des vecteurs obtenus permet d'avoir la priorisation des critères présentée dans le Tableau II-8.

	Critère de réévaluation	Poids
C1	Situation de la solidité financière	9%
C2	Souplesse en termes de négociation (délais, conditions de paiement, etc.)	6%
C3	Respect des délais contractuels et ponctualité des prestations	25%
C4	Respect des spécifications techniques et adéquation des prestations au besoin exprimé	33%
C5	Constance de la qualité du produit et de la prestation fournie	28%

Tableau II- 8 Critères de réévaluation des fournisseurs pondérés

Une fois les critères priorisés, nous demandons aux différents services techniques de noter le Prestataire F1. Le Tableau II-9 présente les notations exprimées par les différentes entités ainsi que le calcul de la note pondérée par critère et finalement le calcul de la note globale du fournisseur F1 en utilisant les formules des équations (13) et (14).

	Utilisateur	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	Notations	Note F1
Critère	Poids	0,58	0,61	0,47	0,38	0,88	0,51	Aggrégées	
C1	0,09	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	[70, 90[	[71, 89[soit B
C2	0,06	B [70, 90[	B [70, 90[	C [50,70[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	[67, 88[	
C3	0,25	B [70, 90[	A [90, 100]	B [70, 90[	B [70, 90[	C [50,70[	C [50,70[	[65, 84[	
C4	0,33	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	[70, 90[	
C5	0,28	B [70, 90[	A [90, 100]	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	B [70, 90[	[74, 92[	

Tableau II- 9 Evaluation du fournisseur F1

II.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une nouvelle méthode d'analyse multicritères et multi-acteurs permettant de prioriser un ensemble d'alternatives par un groupe d'expert. Cette méthode intègre également un processus d'élaboration de consensus basé sur la méthode des centres mobiles. La méthode proposée se base sur la méthode AHP pour la priorisation des alternatives et sur la méthode des centres mobiles pour la classification des jugements dans la cadre d'élaboration de consensus, ces deux dernières peuvent être remplacées respectivement par une autre méthode de sur-classement (ELECTRE, PROMETHE, ...) et une autre méthode de classification « clustering » (SOM, fuzzy c-means, ...).

Pour mettre en évidence l'utilité de la méthode proposée nous avons présenté une situation réelle dans laquelle nous étions obligés d'effectuer un sur-classement par un ensemble d'expert tout en veillant d'élaborer un consensus entre ces décideurs.

Chapitre III : Conception des Tableaux de bord de pilotage intégré des performances et des risques de la chaîne logistique

III.1 Introduction

Le pilotage de la performance ne peut être effectuée indépendamment de la gestion des risques, toutefois dans le monde industriel ces deux modes de management sont pratiqués indépendamment.

Nous mettons en évidence dans ce chapitre la relation entre le risque et la performance d'une part, et de l'autre part entre le cycle de vie du management des risques et le cycle de vie de pilotage de la performance. Nous introduisons ensuite un cycle de vie intégré permettant à la fois une gestion des risques et un pilotage de la performance. Ce cycle de vie peut être appliqué pour le management des entreprises et des organisations d'une manière générale, et il peut être utilisé également pour le management des chaînes logistiques.

Nous présentons ensuite une démarche proposée pour la construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques dans laquelle nous avons intégré les deux modes de management et nous avons introduit la notion de priorisation des indicateurs et des risques en prenant en considération le contexte de la chaîne logistique (facteurs clés de compétitivité et le niveau de maîtrise des différents maillons de la chaîne logistique).

Nous terminons ce chapitre par une étude de cas industriels permettant d'appliquer la démarche proposée.

III.2 Modèle proposé pour le pilotage intégré des performances et des risques de la chaîne logistique

III.2.1 La relation entre la gestion des risques et le pilotage de la performance

Dans ce paragraphe nous mettons en exergue la relation entre le triplet : risque, processus et mesure de la performance (Figure III-1). La mesure de la performance se fait par rapport à l'atteinte des objectifs des différents processus qui constituent la chaîne logistique, la Figure III-1 présente les différentes classes de mesure (mesures liées aux coûts, à l'agilité, à la fiabilité, à la réactivité et à l'efficacité de gestion des actifs) permettant de quantifier l'atteinte des objectifs d'une chaîne logistique (axes de performance introduits par le modèle SCOR (Tableau I.2)).

La matérialisation d'un risque impacte un ou plusieurs actifs de la chaîne logistique, les processus sont eux aussi des actifs. Un risque peut être surveillé par une ou plusieurs mesures s'il est mesurable (augmentation de la devise, indisponibilité de la production...) si non on

pourra réduire le risque en mettant en œuvre un ou plusieurs contrôles (exemple : contrôle inopiné des stocks pour éviter le risque de fraude).

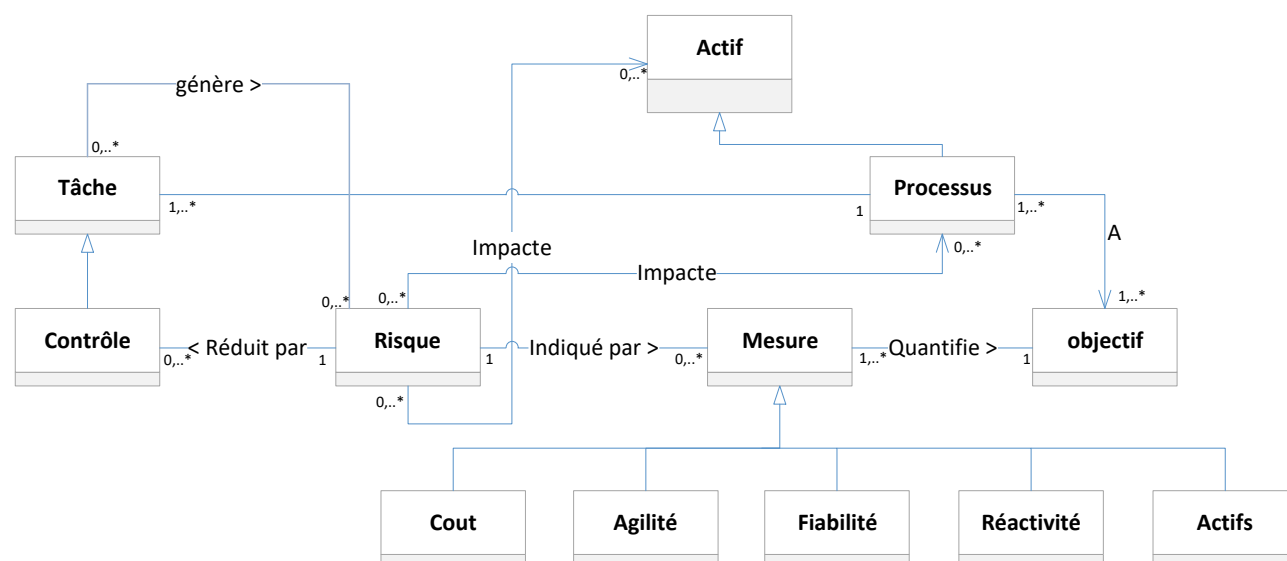


Figure III. 1 La relation entre les risques et la mesure de la performance

Le pilotage de la performance des processus et la gestion des risques s'articulent tous les deux autour de la valeur : l'un pour la créer et l'autre pour la préserver (Sienou, 2009). Ces deux approches de management semblent être indépendantes, toutefois des réflexions ont été initiées dans le domaine industriel concernant l'intégration des deux modes de pilotage en étudiant :

- Quelles sont les différentes relations entre les concepts des deux modes de gestion ?
- Quelles sont les différentes relations entre les cycles de vie des deux formes de pilotage ?

Les interactions entre la gestion des risques et le pilotage de la performance (Figure III-1) résident dans le fait que la gestion des risques influence, dans un sens, les décisions d'ingénierie et de pilotage opérationnel et dans le sens inverse, l'ingénierie des processus influence le comportement de l'entreprise vis-à-vis du risque. Autrement dit, d'un côté la gestion d'un risque (moyens et approches de traitement) et la matérialisation du risque lui-même ont une incidence sur les actifs de la chaîne logistique qu'ils soient matériels ou organisationnel (processus). Et de l'autre part, si on part du fait que le processus est un ensemble d'activités/tâches corrélées ou en interaction qui utilise des éléments d'entrée pour produire un résultat escompté (ISO 9001 V 2015) et que chacune de ces tâches pourraient avoir un impact direct sur la matérialisation d'un risque et sur la gestion de ce dernier, on peut constater l'impact

des processus et des activités sur la gestion des risques.

Les deux notions, risque et processus sont maîtrisés et suivis en utilisant des mesures, ces mesures peuvent être des mesures liées à l'atteinte des objectifs d'un processus ou bien liées à une contreperformance ou à la survenance d'un événement favorisant la matérialisation du risque.

Quant aux cycles de vie des deux modes de management qu'ils soient gestion des risques ou bien gestion de la performance, on commence dans tous les cas par une analyse du contexte de la chaîne logistique, ensuite nous effectuons le choix de la stratégie appropriée et les objectifs stratégiques puis nous faisons une analyse permettant de déterminer les éléments (comportement d'une activité : performance ou matérialisation du risque) ayant un impact considérable sur les objectifs stratégiques, après nous définissons les plans de traitement liés à la contreperformance ou aux risques et finalement nous assurons une surveillance et un suivi en tant qu'éléments essentiels, dans tout mode de management, permettant d'assurer la dynamique d'amélioration.

Du fait de la relation étroite entre les notions de risque, processus et performance ainsi qu'entre les deux modes de management, nous avons proposé dans (El Khayyam et Herrou, 2018 a) une approche de management intégrée des risques et de la performance, Figure III-2. L'analyse du contexte global est le point de départ de cette approche intégrée, on choisit ensuite la stratégie la plus appropriée à ce contexte ainsi que les objectifs stratégiques associés puis on priorise les indicateurs de pilotage selon le contexte, la stratégie et les risques les plus élevés (l'appréciation des risques au préalable est nécessaire pour la priorisation des indicateurs).

L'appréciation des risques elle aussi doit tenir en considération de la stratégie adoptée vu que l'impact d'un risque donné diffère selon le contexte de la chaîne logistique et selon la stratégie adoptée, par exemple l'impact du risque lié au changement des exigences client est élevé dans le cadre d'une lean supply chain tandis qu'il est modéré dans le cadre d'une chaîne logistique agile.

La surveillance et le pilotage de la performance et des risques est mis en place pour détecter tout besoin d'amélioration afin de faire face à une contreperformance ou à une alerte de risque (indicateur de risque qui atteint le seuil d'alerte ou un résultat de contrôle), la surveillance est également mise en place pour détecter les changements qui impactent le contexte global (Figure

III-2) et ainsi réadapter l'analyse du contexte, le choix de la stratégie, l'appréciation des risques, la priorisation des indicateurs de performance et la mise à jour des plans de traitement des risques et des contreperformances.

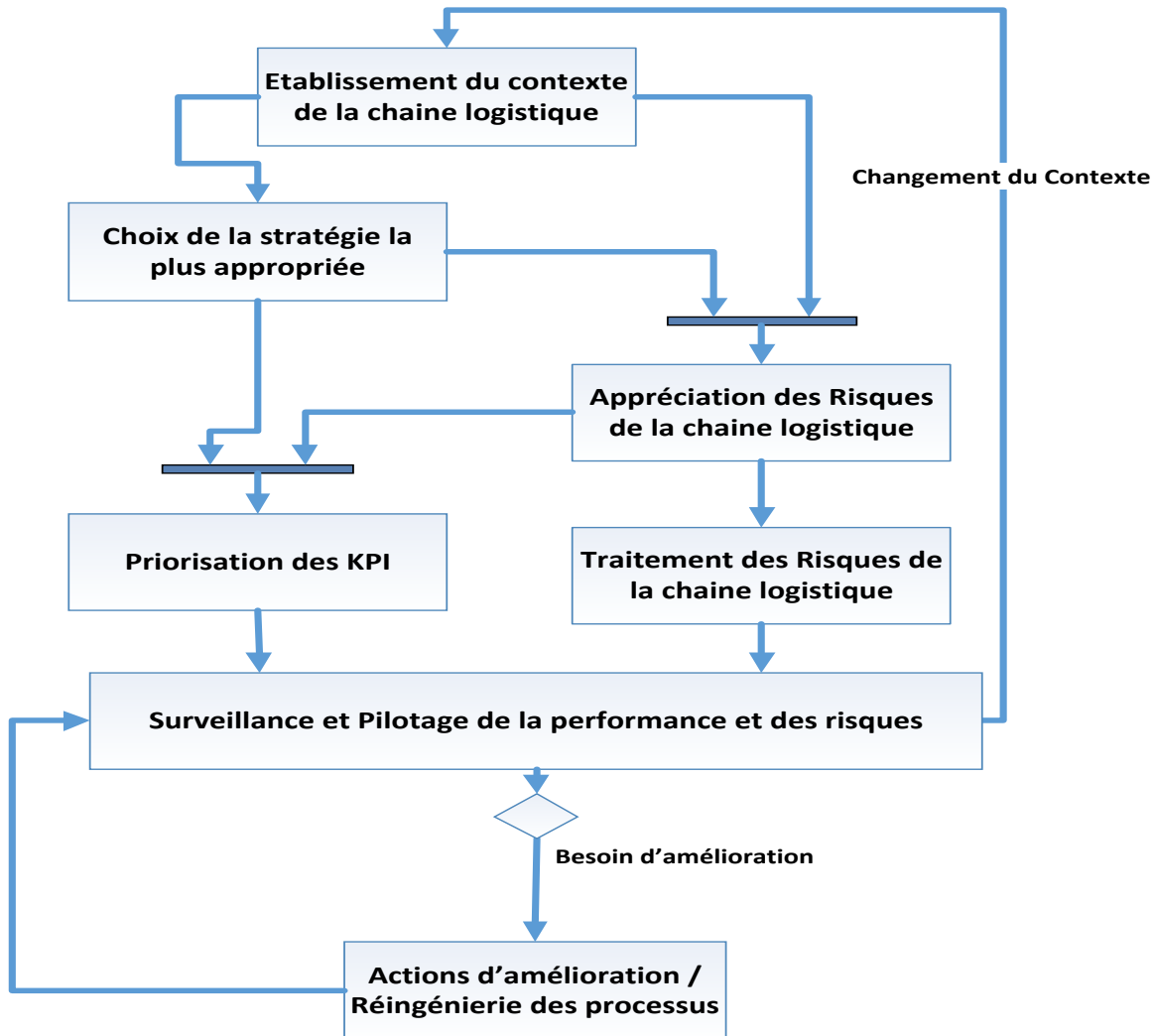


Figure III. 2 La Gestion intégrée de la Performance et des Risques

III.2.2 Démarche proposée pour la construction d'un tableau de bord de pilotage intégré de la chaîne logistique

Pour construire un tableau de bord permettant d'assurer une gestion intégrée de la chaîne logistique, nous nous sommes basés sur le cycle de vie de gestion intégrée de la performance et des risques, Figure III-2. Ainsi pour concevoir un tableau de bord d'une chaîne logistique nous effectuons une analyse hiérarchique (AHP) qui prend en considération un ensemble de critères (cout, qualité, délai et maîtrise des différents processus) en vue de prioriser les différents indicateurs et d'analyser les risques relatifs à la chaîne logistique étudiée.

La Figure III.3 représente la structure hiérarchique permettant prioriser les différents indicateurs et d'analyser les différents risques par processus de la chaîne logistique. Nous attribuons, en premier lieu, un degré d'importance aux différents facteurs clés de compétitivité (Niveau 1) en effectuant les comparaisons deux à deux de ces facteurs, dans l'étude de cas nous allons faire recours à un outil d'analyse hiérarchique permettant d'effectuer des analyses hiérarchiques à plusieurs niveaux. Les facteurs clés de compétitivité pris en considération sont les coûts, les délais et la qualité, nous n'avons pas pris en considération le niveau de service du fait que ce dernier est une combinaison des trois autres (généralement une qualité exigée ou des délais contractés à un coût fixé). La deuxième étape consiste à prioriser le niveau de maîtrise requis par processus et par facteurs clé de compétitivité (Niveau 2 de la Figure III.3). La dernière étape consiste à prioriser les indicateurs et à analyser les risques par groupe de risques et groupe d'indicateurs, les Tableaux III.1, III.2 et III.3 présentent les différents groupes d'indicateurs par processus et par facteurs clé de compétitivité issus de la consolidation des indicateurs et risques présentés dans le chapitre 1. A titre d'exemple le groupe SCI « Sourcing Cost Indicators » représente les indicateurs relatifs aux coûts du processus approvisionnement et le SCR « Sourcing Cost Risks » représente quant à lui les risques liés aux coûts du processus approvisionnement.

La priorisation des indicateurs faisant partie de chaque groupe d'indicateur prend en considération le degré d'importance du niveau de maîtrise du processus auquel le groupe d'indicateur fait partie ainsi que le degré d'importance du facteur clé de compétitivité associé à ce groupe d'indicateur.

L'analyse des risques au sein de chaque groupe de risque se fait en deux phases, la première est la priorisation des risques en termes d'impact en prenant en considération le degré d'importance du niveau de maîtrise du processus auquel le groupe de risques fait partie ainsi que le degré d'importance du facteur clé de compétitivité associé à ce groupe de risques. La deuxième phase consiste à la priorisation des risques en termes de probabilité en prenant en considération le degré d'importance du niveau de maîtrise du processus auquel le groupe de risques fait partie ainsi que le degré d'importance du facteur clé de compétitivité associé à ce groupe de risques. L'évaluation des risques est obtenue, selon la démarche détaillée dans le paragraphe I.5.2.2 du chapitre 1, en multipliant la probabilité et l'impact. Le Tableau de bord intégré est le résultat de la consolidation des résultats de l'analyse des risques et de la

priorisation des indicateurs.

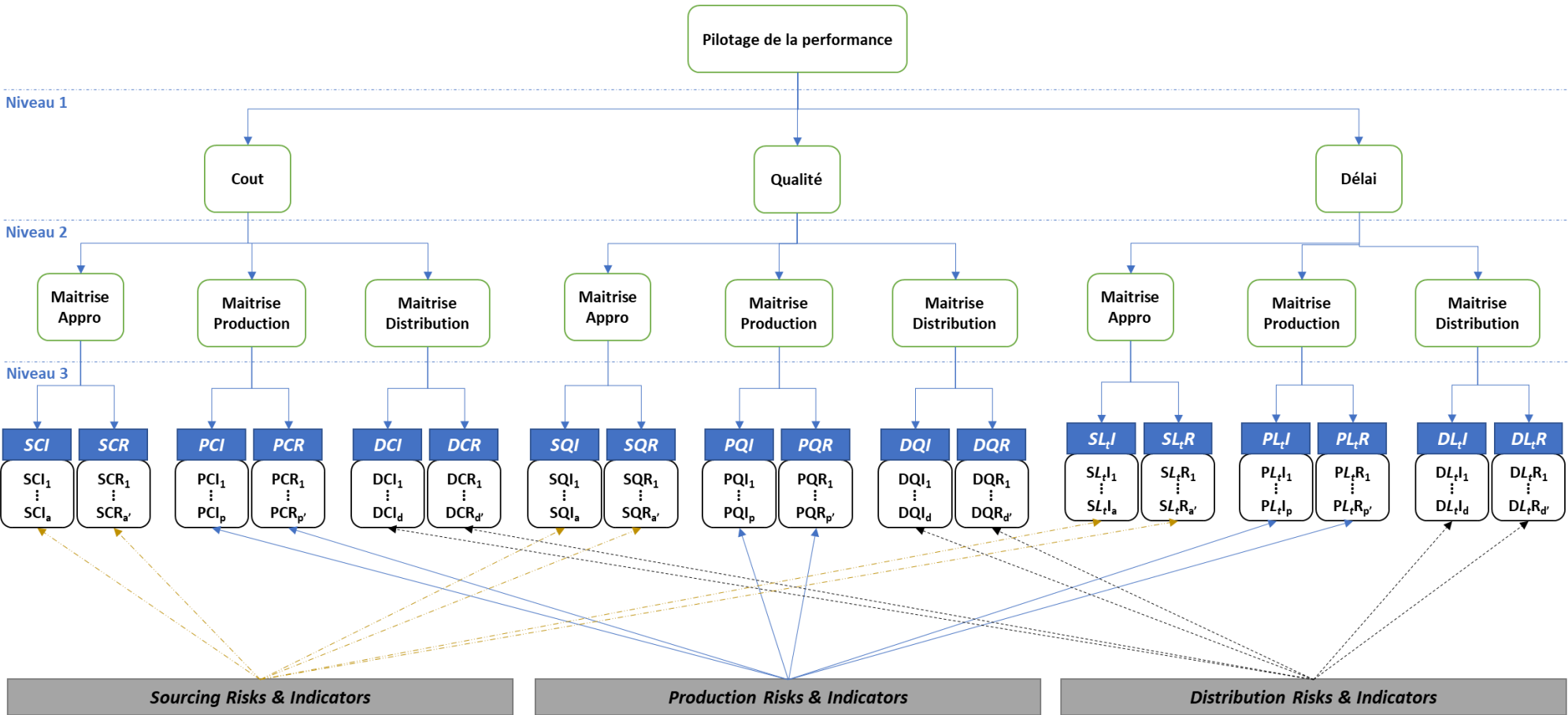


Figure III. 3 Hiérarchie de priorisation des Risques et des Indicateurs

Approvisionnement		
Cout	SCI	SCR
	- Cout moyen de passation d'une commande - Valeur moyenne d'une commande - Gain Achat (réduction du prix par rapport au prix historique) - Effort de négociation (offre initiale - offre finale) / offre initiale - Coûts d'approvisionnement / Gains Achat - Montant d'achat annuel par fournisseur	- Insolvabilité des fournisseurs - Fraude/corruption - Augmentation des prix par les fournisseurs
Délai	SL _I	SL _R
	- Délai de paiement des fournisseurs - Nombre de commandes reçues et en cours - délai moyen de traitement d'une demande d'achat - Niveau de couverture des stocks - Nombre de jours de retard cumulé / nombre de livraisons en retard	- Retard de livraison des matières premières/composants - Retard de transport relatif aux approvisionnements - Indisponibilité du sous-traitant - Perturbation/interruption chez fournisseurs - Retard d'importation
Qualité	SQI	SQR
	- Nombre de lots non conformes / Nombre de lots reçus par fournisseur (taux de rejet par fournisseur) - Nombre de fournisseurs actifs par catégories (A, B, C) - Ecart quantités reçues / quantités commandées par fournisseur	- Matières premières /composants de mauvaise qualité - Matériel de contrefaçon - Perturbation/interruption chez fournisseurs

Tableau III- 1 Risques et Indicateurs associés au processus Approvisionnements

	Production	
Cout	PCI	PCR
	- Consommation mensuelle d'énergie - Quantité des déchets recyclés - Cout associé à l'arrêt de machines - Cout total de production/nombre des unités produites - Cout des produits défectueux à cause de la qualité des matières premières - Cout des produits défectueux à cause des erreurs humaines - Cout de stockage de matière première	- Dégradation du rendement de la production - Endommagement des stocks - Obsolescence des stocks - Divulgaration des propriétés intellectuelles - Erreurs humaines - Vols
Délai	PL _{tI}	PL _{tR}
	- Capacité de production par jour - Nombre d'ordre de production finis en retard / nombre total d'ordres de production - Temps de cycle réel / temps de cycle Idéal - Cadence de production réelle / cadence de production objectif - Temps d'arrêt pour la maintenance corrective	- Capacité insuffisante - Retard de transmission des ordres de fabrication - Indisponibilité de la production - Accident de travail - Arrêt non planifié de la production - Non-respect de la planification - Panne de matériel
Qualité	PQI	PQR
	- Taux de rendement synthétique : taux de disponibilité * taux performance * taux de qualité - Nombre de défauts produit dus à la qualité des matières premières / nombre total de défauts - Nombre de défauts ÷ nombre d'unités produites	- Endommagement des stocks - Erreurs humaines - Produit non conforme/mauvaise qualité

Tableau III- 2 Risques et Indicateurs associés au processus Production

	Distribution	
Cout	<i>DCI</i>	<i>DCR</i>
	- Cout total de transport - Cout d'expédition d'un produit - Cout des transport soustraites / cout total des transports - Cout de stockage des produits finis	- Perte des parts de marché - Erreur de prévision - Changement des exigences clients - Réduction du prix de vente - Faillite client - Introduction d'un nouveau produit - Non prise en compte des promotions
Délai	<i>DL_{tI}</i>	<i>DL_{tR}</i>
	- Délais de traitement d'une commande client (réception, saisie et validation) - Délai d'exécution des commandes - Temps moyen associé à l'expédition des produits - Niveau de couverture des stocks des produits finis - Livraisons à temps / nombre total des livraisons	- Retard de livraison des commandes - Changement des exigences clients - Non prise en compte des promotions
Qualité	<i>DQI</i>	<i>DQR</i>
	- Nombre annuel de livraison - % des commandes expédiée en totalité - Ecart Livraisons - Capacité de transport utilisée (m3) / capacité disponible	- Produit non conforme/mauvaise qualité

Tableau III- 3 Risques et Indicateurs associés au processus Distribution

III.3 Etude de cas : conception d'un tableau de bord pour une industrie

III.3.1 La mise en situation

Pour appliquer la démarche proposée visant à construire un système de pilotage intégré de la chaîne logistique, nous avons réalisé plusieurs entretiens avec le directeur d'une petite industrie de semelles pour chaussures. L'entretien avait pour objectif la détermination du contexte global de l'entreprise. Les données collectées sont utilisées dans l'analyse AHP.

Nous avons utilisé l'outil super décisions pour faciliter le calcul des priorités, la Figure III.4 représente la Structure Hiérarchique utilisée sous Super Decision pour analyse du contexte : facteurs clés de compétitivité et les besoins en niveau de maîtrise par processus.

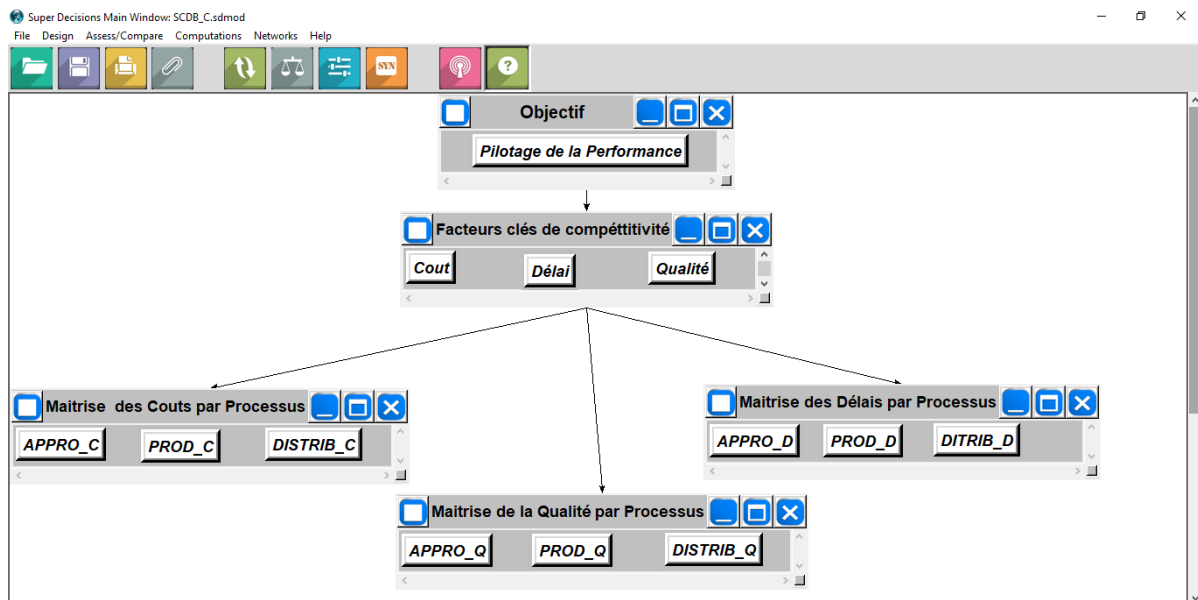


Figure III. 4 Structure Hiérarchique utilisée sous SuperDecision pour analyse du contexte

La comparaison par paire des facteurs clé de compétitivité effectuée par le directeur de l'industrie étudiée nous donne les résultats consolidés dans la figure III.5. Cette analyse permet d'attribuer au facteur « cout » un poids de 45%, au facteur « qualité » un poids de 31% et au facteur « délai » un poids de 24%, cette pondération est confirmée par le directeur et justifiée par le fait que le cout est un facteur déterminant dans le marché où opère l'industrie étudiée. Les commandes clients se font principalement en prenant en considération le prix, et après la qualité du produit et en dernier lieu les délais du fait que la majorité des acteurs de la chaîne logistique se situent dans la même zone géographique.

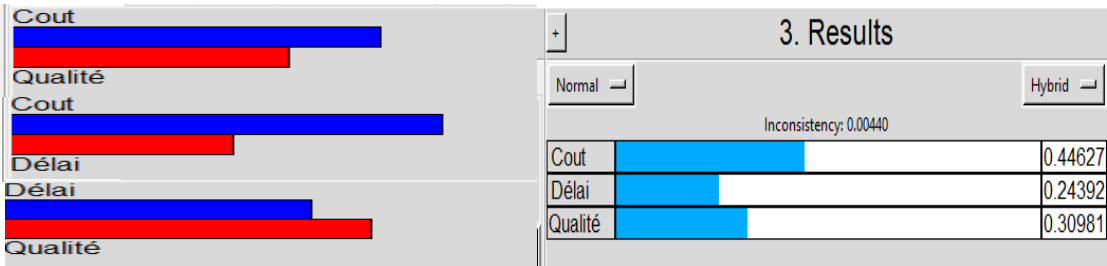


Figure III. 5 Priorisation des facteurs clés de compétitivité pour l'entreprise étudiée

La priorisation des besoins en niveau de maitrise par processus est la deuxième phase relative à l'études du contexte de l'entreprise étudiée, la comparaison par paire des différents besoins en niveau de maitrise par processus et par facteur clé de compétitivité nous fournit les résultats suivants (Figure III.6)

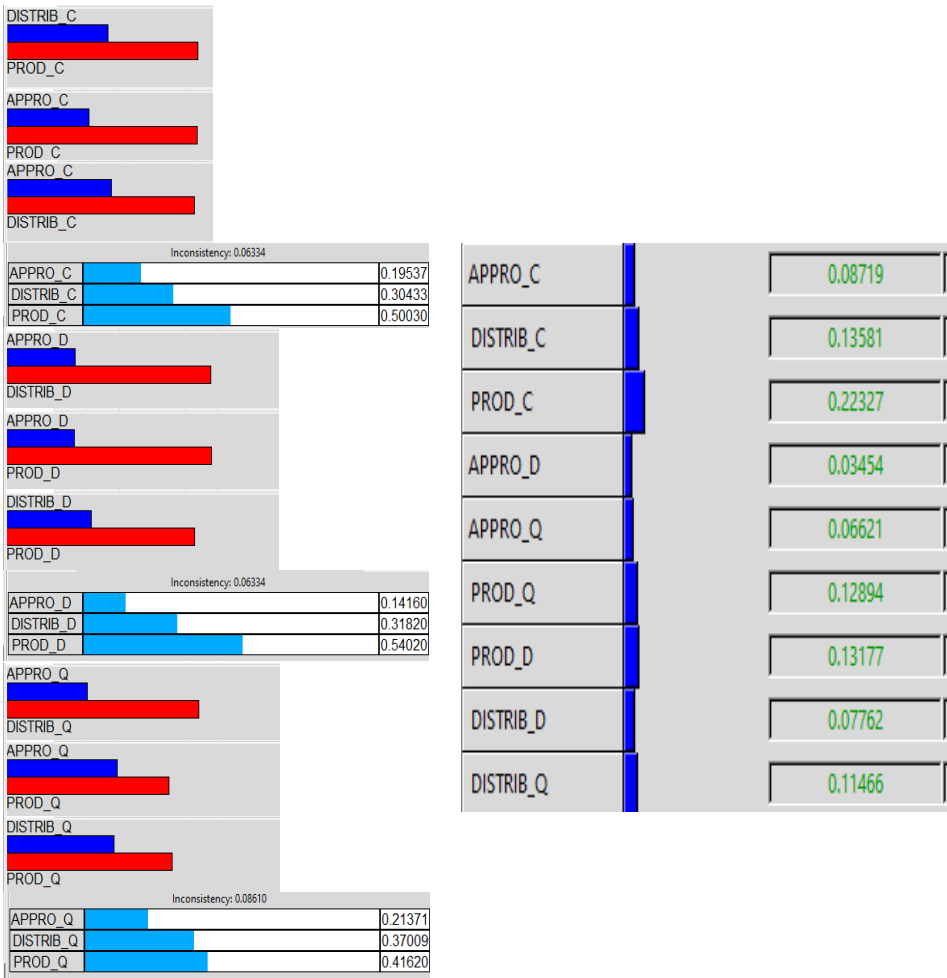


Figure III. 6 priorisation des besoins en niveau maitrise par processus et par facteur clé de compétitivité

La priorisation des besoins en niveau de maitrise affichée en dessous de chaque comparaison (tableaux à gauche) représente le poids associé au besoin en niveau de maitrise en absolu (sans

prendre en considération la priorisation associée aux facteurs clés de compétitivité). Le tableau à droite regroupe les poids associés aux différents besoins en niveau de maîtrise par processus et par facteur clé de compétitivité. Le poids le plus élevé est attribué à la maîtrise des coûts de la production (22%) puis la maîtrise des coûts de distribution (13,5%) et la maîtrise des délais de production (13,1%).

III.3.2 La mise en application de la démarche proposée pour la conception de tableau de bord

La conception du tableau de bord se fait en deux étapes, la première consiste à l'analyse et l'évaluation des risques en prenant considération des résultats obtenus lors de l'analyse du contexte. La deuxième étape consiste à prioriser les indicateurs des différents processus en prenant en considération les résultats d'analyse du contexte.

Pour analyser les risques associés à la chaîne logistique étudiée nous avons utilisé l'outil SuperDecision à deux reprises, une pour prioriser les risques en termes d'impact et l'autre pour analyser les risques en termes de probabilité d'occurrence. La figure III.7 représente les risques analysés sous l'outil SuperDecision

L'analyse des risques relatifs à l'entreprise étudiée est consolidée dans le tableau III.4, les risques fort relatifs à cette entreprise sont : l'augmentation des prix par les fournisseurs, l'acquisition des matières premières de mauvaise qualité, la dégradation du rendement de la production, la fabrication de produit fini non conforme et la livraison des commandes en retard.

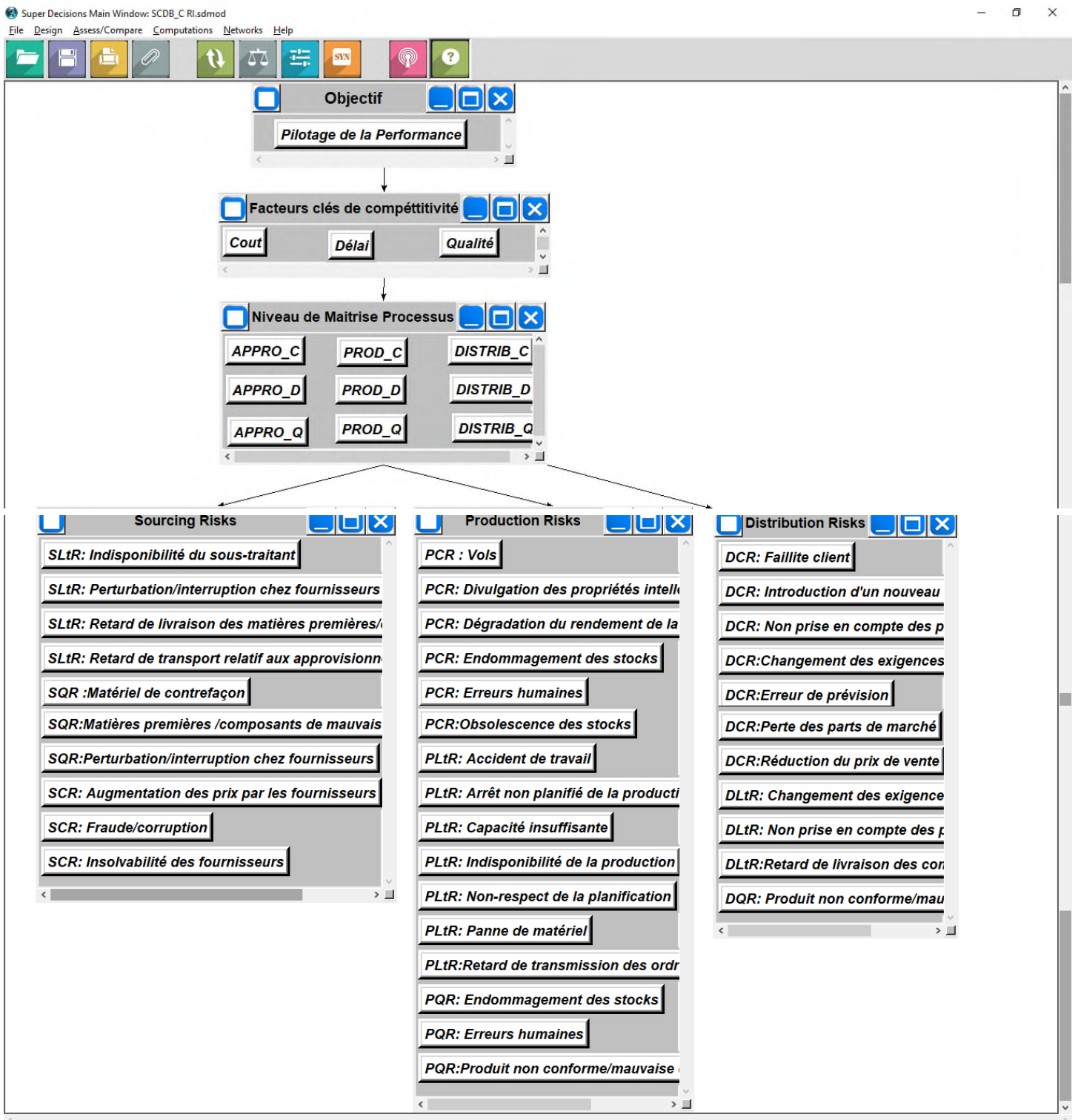


Figure III. 7 Analyse des Risques de l'entreprise étudiée

Risque	Poids en terme d'impact	Poids en terme de probabilité	Impact*Probabilité* 10 ⁴
SCR: Insolvabilité des fournisseurs	0,09	0,18	156,87
SCR: Fraude/corruption	0,14	0,11	157,82
SCR: Augmentation des prix par les fournisseurs	0,24	0,17	408,38
SLtR: Retard de livraison des matières premières/composants	0,07	0,07	52,87
SLtR: Retard de transport relatif aux approvisionnements	0,02	0,06	14,56
SLtR: Indisponibilité du sous-traitant	0,05	0,02	11,73
SLtR: Perturbation/interruption chez fournisseurs	0,03	0,03	10,14
SQR: Matières premières /composants de mauvaise qualité	0,16	0,19	300,91
SQR :Matériel de contrefaçon	0,12	0,06	72,84
SQR: Perturbation/interruption chez fournisseurs	0,07	0,10	73,06
PCR: Dégradation du rendement de la production	0,10	0,11	109,94
PCR: Endommagement des stocks	0,07	0,10	72,11
PCR: Obsolescence des stocks	0,06	0,05	29,68
PCR: Divulgence des propriétés intellectuelles	0,04	0,04	18,82
PCR: Erreurs humaines	0,05	0,10	51,83
PCR : Vols	0,13	0,06	83,00
PLtR: Capacité insuffisante	0,03	0,04	12,17
PLtR: Retard de transmission des ordres de fabrication	0,02	0,06	13,05
PLtR: Indisponibilité de la production	0,05	0,02	12,15
PLtR: Accident de travail	0,06	0,02	9,74
PLtR: Arrêt non planifié de la production	0,04	0,03	11,04
PLtR: Non-respect de la planification	0,03	0,05	13,07
PLtR: Panne de matériel	0,03	0,07	20,06
PQR: Endommagement des stocks	0,07	0,04	30,74
PQR: Erreurs humaines	0,05	0,14	64,44
PQR: Produit non conforme/mauvaise qualité	0,15	0,08	127,16
DCR: Perte des parts de marché	0,08	0,03	26,86
DCR: Erreur de prévision	0,07	0,08	56,18
DCR: Changement des exigences clients	0,06	0,10	62,05
DCR: Réduction du prix de vente	0,05	0,06	32,65
DCR: Faillite client	0,07	0,03	20,80
DCR: Introduction d'un nouveau produit	0,04	0,06	23,05
DCR: Non prise en compte des promotions	0,04	0,05	19,25
DLtR: Retard de livraison des commandes	0,12	0,12	139,32
DLtR: Changement des exigences clients	0,08	0,07	50,76
DLtR: Non prise en compte des promotions	0,04	0,05	22,03
DQR: Produit non conforme/mauvaise qualité	0,35	0,35	1 221,29

Tableau III- 4 Résultat d'analyse des risques de l'entreprise étudiée

La deuxième étape de construction du tableau de bord est la priorisation des indicateurs par processus en prenant en considération les facteurs clés de compétitivité ainsi que les besoins en niveau de maîtrise par processus. Nous utilisons l'outil d'analyse AHP « Super Decision » pour effectuer la priorisation des différents indicateurs par processus, la figure III.8 représente la hiérarchie analysée avec « SuperDecision »

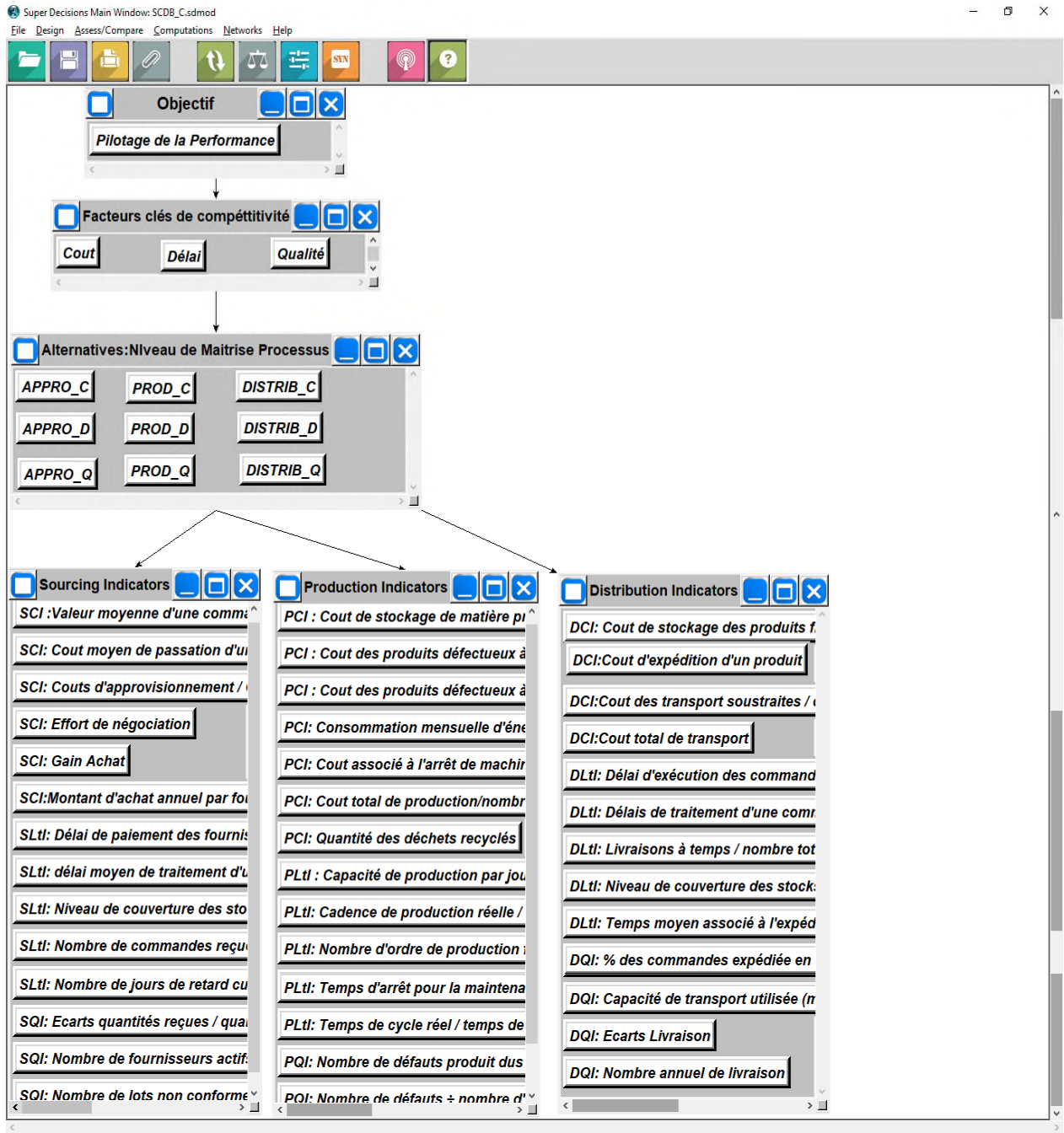


Figure III. 8 Priorisation des KPI de l'entreprise étudiée

La priorisation des indicateurs en utilisant l'outil précité nous donne les résultats consolidés

dans le tableau III.5.

	Indicateur	Poids par Importance
APPROVISIONNEMENT	SQI: Nombre de lots non conformes / Nombre de lots reçus par fournisseur (taux de rejet par fournisseur)	20,2%
	SCI: Gain Achat	13,6%
	SCI: Coûts d'approvisionnement / Gains Achat	11,9%
	SCI: Effort de négociation	8,5%
	SQI: Ecart quantités reçues / quantités commandées par fournisseur	8,4%
	SQI: Nombre de fournisseurs actifs par catégories (A, B, C)	6,7%
	SLtI: Niveau de couverture des stocks	6,4%
	SCI: Montant d'achat annuel par fournisseur	6,0%
	SLtI: Nombre de jours de retard cumulé / nombre de livraisons en retard	5,0%
	SCI: Valeur moyenne d'une commande	3,5%
	SLtI: Nombre de commandes reçues et en cours	3,2%
	SCI: Coût moyen de passation d'une commande	2,9%
	SLtI: Délai moyen de traitement d'une demande d'achat	2,2%
	SLtI: Délai de paiement des fournisseurs	1,6%
Production	PQI: Taux de rendement synthétique : taux de disponibilité * taux performance * taux de qualité	18,9%
	PCI: Coût total de production/nombre des unités produites	15,3%
	PLtI : Capacité de production par jour	8,9%
	PLtI: Nombre d'ordre de production finis en retard / nombre total d'ordres de production	8,2%
	PCI : Coût des produits défectueux à cause de la qualité des matières premières	6,0%
	PCI: Coût associé à l'arrêt de machines	5,6%
	PCI : Coût de stockage de matière première	5,1%
	PCI: Consommation mensuelle d'énergie	5,0%
	PCI: Quantité des déchets recyclés	4,7%
	PLtI: Cadence de production réelle / cadence de production objectif	4,6%
	PCI : Coût des produits défectueux à cause des erreurs humaines	4,5%
	PQI: Nombre de défauts produit dus à la qualité des matières premières / nombre total de défauts	3,9%
	PQI: Nombre de défauts ÷ nombre d'unités produites	3,8%
	PLtI: Temps d'arrêt pour la maintenance corrective	3,2%
	PLtI: Temps de cycle réel / temps de cycle idéal	2,3%
Distribution	DCI: Coût total de transport	20,9%
	DQI: Ecart Livraison	16,2%
	DQI: % des commandes expédiées en totalité	11,9%
	DCI: Coût d'expédition d'un produit	8,9%
	DLtI: Livraisons à temps / nombre total des livraisons	8,6%
	DCI: Coût de stockage des produits finis	6,7%
	DLtI: Délais de traitement d'une commande client (réception, saisie et validation)	5,4%
	DCI: Coût des transports soustraits / coût total des transports	4,9%
	DQI: Nombre annuel de livraison	4,4%
	DLtI: Délai d'exécution des commandes	3,7%
	DLtI: Temps moyen associé à l'expédition des produits	3,5%
	DQI: Capacité de transport utilisée (m3) / capacité disponible	2,5%
	DLtI: Niveau de couverture des stocks des produits finis	2,5%

Tableau III- 5 Résultats de priorisation des indicateurs de l'entreprise étudiée

En combinant les résultats d'analyse des risques et ceux de la priorisation des indicateurs nous proposons au directeur de l'entreprise étudiée le tableau de bord composé par les indicateurs listés dans le tableau III.6 ci-dessous.

	Indicateur
APPROVISIONNEMENT	SQI/SQR: Nombre de lots non conformes / Nombre de lots reçus par fournisseur (taux de rejet par fournisseur)
	SCI: Gain Achat
	SCI: Coûts d'approvisionnement / Gains Achat
	SCI: Effort de négociation
	SCR: Augmentation des prix par les fournisseurs
Production	PQI/PQR: Taux de rendement synthétique : taux de disponibilité * taux performance *
	PCI: Coût total de production/nombre des unités produites
	PLtI : Capacité de production par jour
	PLtI: Nombre d'ordre de production finis en retard / nombre total d'ordres de
	PQR:Produit non conforme/mauvaise qualité
Distribution	DCI:Coût total de transport
	DQI: Ecart Livraisons
	DQI: % des commandes expédiées en totalité
	DCI:Coût d'expédition d'un produit
	DLtI/DLtR: Livraisons à temps / nombre total des livraisons
	DQR: Produit non conforme/mauvaise qualité

Tableau III- 6 Tableau de bord proposé à l'entreprise étudiée

En Amont de la chaîne logistique étudiée, l'entreprise doit prêter plus d'attention à la qualité des composants transmis par ses fournisseurs ainsi qu'à la fluctuation du prix des matières premières. En aval de la chaîne logistique cette entreprise donnera plus d'importance aux délais de livraison, à la non détérioration du produit lors de la distribution et aux coûts liés à la distribution.

Au niveau de la production, les principaux indicateurs concernés sont la capacité de production, le volume des produits non conformes et le taux de rendement synthétique donnant une visibilité à la fois sur la performance, la disponibilité et la qualité.

III.4 Conclusion

Nous avons démontré dans ce chapitre la nécessité d'intégrer les deux modes de management, le management des risques et le management de la performance. Nous avons introduit par la suite une démarche de construction de tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques, cette démarche intègre la notion de priorisation des indicateurs qui est une notion déjà intégrée dans le cycle de gestion des risques et précisément dans la phase analyse des risques. La priorisation des indicateurs et des risques dans la démarche proposée se fait en se basant sur le contexte de la chaîne logistique à travers une analyse hiérarchique (AHP) prenant en considération les facteurs clés de compétitivité (Coût, Qualité, Délai) et le niveau de maîtrise des différents processus de la chaîne logistique.

Partie II - Planification intégrée de la Production et de la Logistique : Proposition d'un solveur industriel

Chapitre IV : Concepts généraux et état de l'art relatifs à la planification de la chaîne logistique

IV.1 Introduction

La planification industrielle a passé par plusieurs étapes, passant par une planification à base de prévisions et de gestion économique des stocks à une planification des besoins en ressources et capacités. La planification industrielle a évolué également en termes de contexte, initialement effectuée indépendamment au niveau de chaque maillon de la chaîne logistique (approvisionnements, production, distribution et ventes) pour converger actuellement à une planification globale, matrice de planification de la chaîne logistique (Rohde et al., 2000), qui prend en considération tous les maillons de la chaîne ainsi que les différents horizons de planification.

La matrice de planification de la chaîne logistique, Figure IV-1, considère que chaque chaîne logistique pourrait être scindée en plusieurs chaînes logistiques internes, chacune de ces chaînes logistiques est composée par quatre processus principaux, l'approvisionnement, la production, la distribution et la vente (Stadtler et al., 2015). Cette matrice met en évidence la nécessité de mettre en place une planification intégrée afin de maîtriser la chaîne logistique en prenant en considération tous les maillons de la chaîne, les quatre processus principaux, sur le plan stratégique, tactique et opérationnel.

De ce fait, un ensemble d'éléments doit être défini et maîtrisé sur les niveaux opérationnels, tactiques et stratégiques afin d'assurer un management efficace et efficient de la chaîne logistique. Ces éléments sont :

- Les contraintes liées à la production (la capacité de production, les délais de production, les niveaux de stocks, les lots de production, la configuration des unités de production, le temps nécessaire pour le changement des outils de production, le temps nécessaire lié à la maintenance des machines de production ...).
- La volumétrie des commandes clients sur le court terme, ainsi que les prévisions des commandes sur le moyen et le long terme.
- Les contraintes liées aux moyens de transport disponibles (la capacité de transport, les délais de transport, la répartition géographique des clients, les modes de transport, les durées de chargement et de déchargement, ...).
- Les contraintes liées aux fournisseurs (les capacités de production fournisseurs, les délais de livraison, la répartition géographique des fournisseurs, ...).

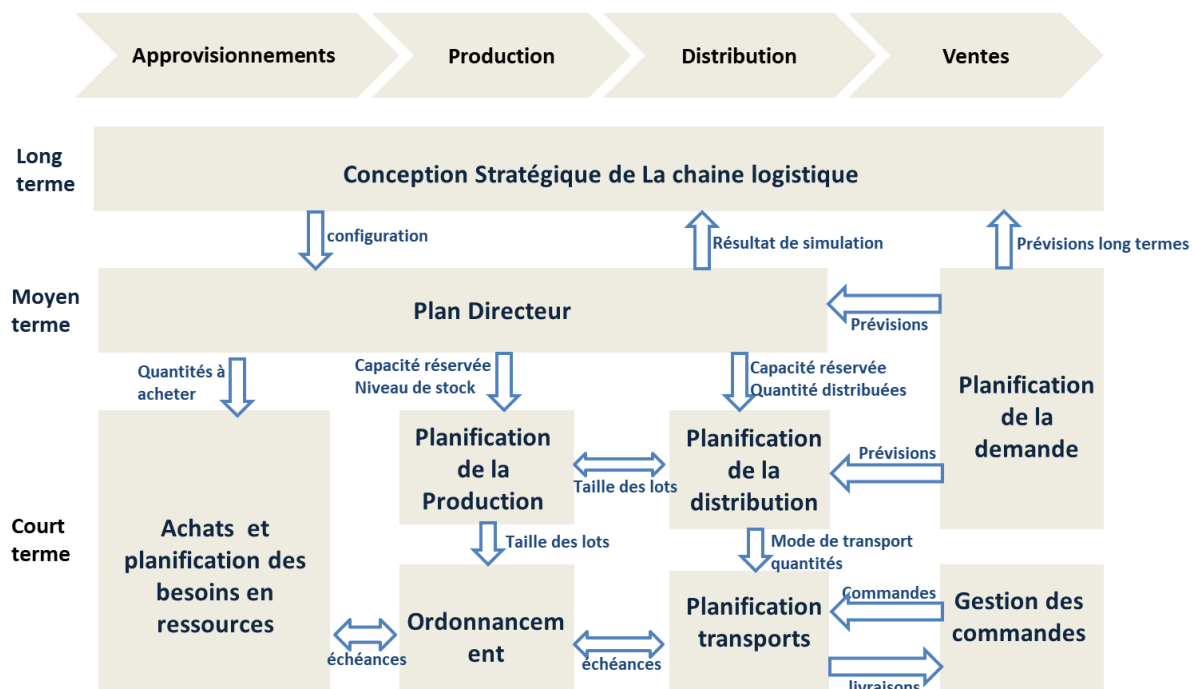


Figure IV- 1 Matrice de planification de la chaîne logistique

Nous abordons dans ce chapitre, dans un premier lieu les relations et les interactions entre les différents maillons de la chaîne logistique en fonction des différentes stratégies de production, ensuite nous examinons la planification de la production et de la distribution et plus particulièrement la planification des besoins de la production et la planification des tournées de véhicules. Nous terminons le chapitre par une discussion générale relative à la planification intégrée des besoins de la production et de la logistique visant à introduire le modèle proposé dans le chapitre suivant.

IV.2 Les interactions au sein de la chaîne logistique

Bien que les entreprises aient des raisons d'être différentes, opèrent dans des secteurs variés et diffèrent en termes de taille et de complexité, elles présentent toutes des similitudes dans la façon dont elles fonctionnent. Quel que soit leur type ou leur taille, les organisations et les industries qui réussissent utilisent des systèmes de management composés de processus qui permettent d'atteindre les objectifs tout en assurant un niveau requis d'efficacité et d'efficience. Les processus peuvent varier légèrement en fonction des caractéristiques de chaque entreprise, mais les activités de base restent toujours les mêmes (achats, production, ventes, gestion des stock, ...).

Un processus est un ensemble de tâches ou d'activités exécutées à fin d'atteindre un résultat

escompté. Chaque processus est déclenché par un événement, tels que la réception d'une commande client ou l'épuisement du stock de sécurité. Vu que les différentes étapes d'un processus peuvent être effectuées par différentes fonctions de l'entreprise, la communication et la collaboration entre ces dernières sont des conditions nécessaires pour la bonne exécution du processus et l'atteinte des objectifs attendus (Magal et al., 2012).

IV.2.1 Les modes de pilotage de la production

Ils existent plusieurs modes de pilotage de la production à adopter en fonction des différents paramètres de l'environnement industriel : variabilité de la demande, fiabilité des prévisions, délais de production par rapport aux délais requis pour la livraison au clients finaux, type de produits fabriqués (standards ou spécifiques). Le modèle SCOR (SCOR, 2012) introduit dans le chapitre I, distingue deux grandes familles des modes de pilotage de la production :

- La gestion à la commande dans laquelle les opérations liées à la réalisation du produit (approvisionnement, production et distribution) sont déclenchées suite à la réception de la commande, il s'agit de systèmes de production dits en flux tiré. Parmi les variantes des modes de pilotage à la commande :
 - La fabrication à la commande : MTO (Make To Order) : dans ce mode de production, la commande client déclenche la fabrication du produit fini. Dans ce mode de pilotage l'approvisionnement, la production et la distribution doivent être suffisamment agile pour respecter les engagements vis à vis des clients.
 - La finition à la commande : FTO (Finish To Order) ou bien l'assemblage à la commande, dans ce mode de pilotage un stock de produit standard est constitué et suite à la réception des commandes clients les différents produits sont assemblés en fonction des besoins exprimés par les clients. La gestion des flux dans ce mode de pilotage est en mode tiré en aval de la chaîne et en mode poussé en amont de la chaîne.
 - La conception à la commande : ETO (Engineer To Order), ce mode de pilotage est généralement utilisé pour produire des biens nécessitant soit un haut niveau de personnalisation, soit la production de pièces uniques, le client est partie prenante de chaque étape depuis la conception passant par la fabrication à la livraison. Le délai de livraison est calculé dès la phase de conception et se termine à la livraison du produit fini.

- La gestion sur stock dans laquelle les opérations liées à la réalisation du produit (approvisionnement, production et distribution) se font avant la réception de la commande client, il s'agit de systèmes de production dits en flux poussé. Parmi les variantes des modes de pilotage sur stock :
 - La fabrication sur stock, MTS (Make To Stock) : ce mode de pilotage consiste à lancer la production au préalable en vue de constituer un stock de marchandises pour ensuite l'écouler au fil des demandes. Cette organisation est adaptée pour des produits standardisés qui ne requièrent aucune forme de personnalisation.
 - La fabrication sur prévisions : MTF (Make To Forecast) : ce mode de pilotage consiste à lancer la production en se basant sur les prévisions de vente

La Figure IV-2 récapitule les différents modes de production ainsi que les différents paramètres permettant de choisir un mode de production selon le contexte de la chaîne logistique étudiée.

Lancement de production	Délai	Stock	Stock de sécurité	
Commande client	Délai client > délai de fabrication	Pas de stock	Pas de stock	MTO
- Commande client pour assemblage - Prévisions/ niveau de stock pour les composants standards	Délai client < délai de fabrication	Stock des composants	Selon la variabilité de la demande / fiabilité des prévisions	FTO
Commande client	Délai client = somme des délais depuis la conception à la livraison	Pas de stock	Pas de stock	ETO
Niveau de stock	Délai client < délai de fabrication	Stock cyclique	Selon la variabilité de la demande	MTS
Prévisions de vente	Délai client < délai de fabrication	Stock d'anticipation	Selon la fiabilité des prévisions	MTF

Figure IV- 2 les différents modes de pilotage de production

Nous proposons dans la deuxième partie de ce chapitre un système intégré de planification de la production et de la logistique qui pourra être appliqué aux deux familles des modes de pilotage, la gestion à la commande et la gestion sur stock. Ce système sera un outil de pilotage et de planification pour les systèmes de gestion sur stock (sert à fixer les jalons et lancer les différents ordres de d'approvisionnement, de fabrication et de transport au moments opportuns). Pour les systèmes de gestion à la commandes l'outil proposé sera plutôt un outil de planification, il sera mis en exécution une fois la commande est exprimée par le client pour déterminer les délais de livraison en fonction des délais de fabrication, des délais de livraison

des fournisseurs, de la capacité de production ainsi que de la capacité des transports disponibles.

IV.2.2 Les interactions entre processus selon le mode de production

La Figure IV-3 (Magal et al., 2012), illustre les principaux processus utilisés par les industries pour atteindre leurs objectifs, trois processus sont directement liés à création et la livraison des produits et services, ils concernent les activités d'acheter-fabriquer-vendre, en support à ces principaux processus on trouve des processus relatifs aux activités planifier, stocker et maintenir.

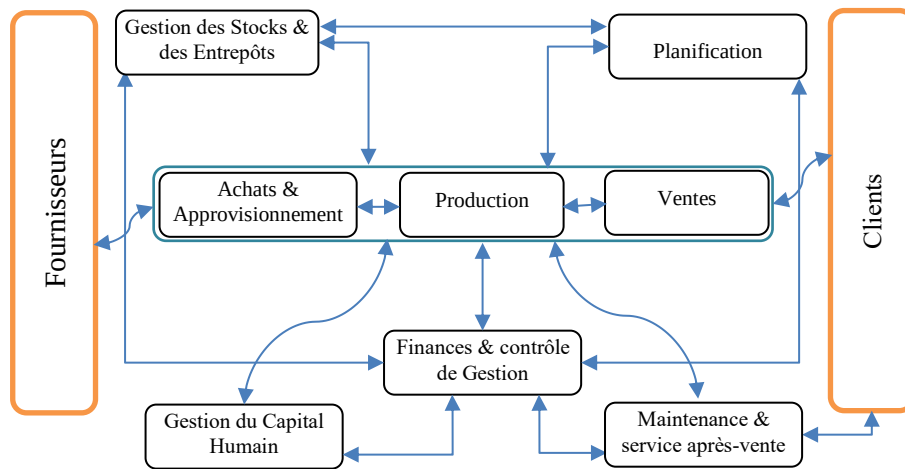


Figure IV- 3 Interactions entre les maillons de la chaîne logistique

- Le Processus Achats et approvisionnement est composé de l'ensemble des activités liées à l'achat ou l'acquisition des besoins de l'entreprise, tels que les matières premières nécessaires pour fabriquer des produits. Ce processus est déclenché par la production lorsque l'entreprise opte pour une stratégie de « procure-to-order » pour les matières premières, il peut être également déclenché par le processus des ventes lorsque l'entreprise s'inscrit dans une stratégie de « procure-to-order » et il peut être aussi déclenché par la planification si l'entreprise opte pour stratégie de « procure-to-stock » pour les matières premières ou les produits finis.
- Le Processus de production assure la création effective du produit ou service au sein de l'entreprise. Ce processus est soit déclenché par un besoin d'augmenter le stock (processus de planification) dans le cadre d'une stratégie de « make-to-stock » soit par une commande client (processus des ventes) dans le cadre d'une stratégie de « make-to-order », dans ce cas la production doit être suffisamment agile pour satisfaire les clients dans des délais

acceptables.

- Le Processus des Ventes se compose de toutes les étapes nécessaires à la vente et la livraison des produits aux clients de l'entreprise. Ce processus déclenche à la fois processus de la gestion des stocks et des entrepôts pour vérifier les produits finis disponibles et les processus de production et d'approvisionnement en cas d'indisponibilité des produits commandés.
- Le Processus de planification utilise des données historiques, des prévisions de ventes et des commandes clients pour planifier les besoins en matériels et en capacité nécessaires pour satisfaire la demande. Ce processus dépend également de la stratégie adoptée par l'entreprise « make/procure-to-stock » ou « make/procure-to-order ». En adoptant la première stratégie « make/procure-to-stock » l'entreprise déclenche les processus d'approvisionnement et de production pour maintenir un stock de produit fini ou semi fini à partir duquel elle satisfait les commandes clients, dans la deuxième stratégie les processus de production et d'approvisionnement ne sont déclenchés que suite à une commande client.
- Le Processus de gestion des stocks & des entrepôts assure le suivi des niveaux des stocks, le stockage, la manutention et le conditionnement de la matière première, des produits semi fini et des produits finis.
- Le Processus de Maintenance & service après-vente composé par des activités qui servent à maintenir les actifs internes tels que les machines, et à offrir un service après-vente tel que la réparation.

IV.3 La planification des besoins de la production

IV.3.1 Les systèmes de production de type MRP

IV.3.1.1 La genèse du MRP

Initialement développé aux USA dans les années 60 par Orlicky, le MRP « Material Requirement Planning » se base sur la distinction entre les besoins dépendants et les besoins indépendants. Le principe d'Orlicky (Orlicky, 1975) est le suivant : « Les besoins indépendants ne peuvent être qu'estimés par des prévisions et les besoins dépendants peuvent et doivent être calculés »

L'APICS (American Production and Inventory Control Society) définit le MRP en tant que : « ensemble de techniques qui utilise la nomenclature, les niveaux de stock et le plan directeur de production pour calculer les besoins en matériels »

La méthode MRP consiste à déterminer à l'avance les ordres de fabrication des composants en fonction des besoins prévisionnels des produits finis, le calcul tient compte des délais de livraison ou de fabrication pour définir d'une manière précise la date de disponibilité des composants et la date de lancement des ordres de fabrication et des ordres d'approvisionnement (Boyer, 1982), la Figure IV-4 présente l'organigramme du processus MRP (Vrat, 2014).

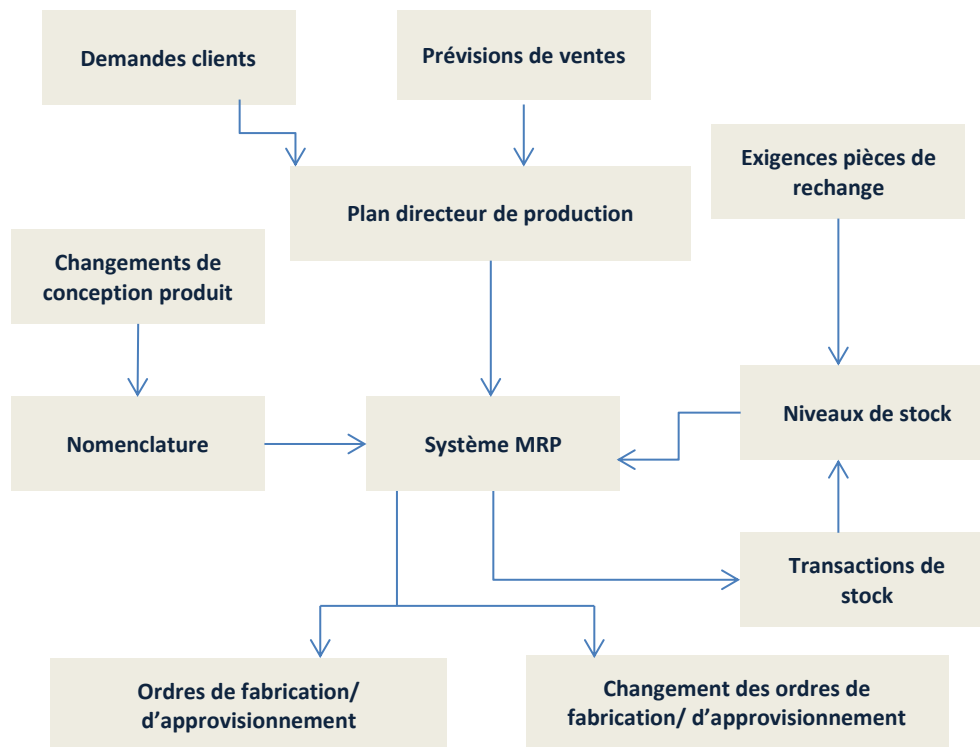


Figure IV- 4 Organigramme du processus MRP

Le calcul MRP (Boyer, 1982) se base d'abord sur la collecte des données : nomenclature, carnet de commandes et/ou plan directeur de production, quantités des articles disponibles et délais d'obtention des articles.

IV.3.1.2 La Nomenclature, élément essentiel pour le MRP

La nomenclature permet de spécifier comment un produit fini est réalisé à partir des différentes parties qui rentrent dans sa composition (Hegge et Wortmann, 1991). Elle constitue la documentation technique relative à la structure d'un produit et permet de préciser la relation entre le produit fini et ses composants ainsi que les quantités nécessaires de chaque composant pour réaliser le produit fini (Raharno et Martawirya, 2012).

La nomenclature peut être considérée comme un graphe dans lequel les nœuds sont les composants et les liens sont les relations entre chaque composant et les autres composants fils. L'élément le plus haut dans le graphe est le produit fini, les composants primaires sont des composants qui n'ont pas de composants fils.

Les liens quant à eux représentent les relations entre un composant (père) et ses composants (fils) ainsi que la quantité nécessaire de chaque composant (fils) pour réaliser le composant père, cette quantité est appelée coefficient de montage (Hegge et Wortmann, 1991).

En plus du coefficient de montage de chaque composant utilisé pour calculer les besoins nets, le MRP dans sa version initiale utilise les délais de livraison de chaque composant qu'ils soient des délais liés à la production ou des délais fournisseurs pour déterminer les dates de lancement des ordres de fabrication ou des commandes fournisseurs.

IV.3.1.3 L'algorithme MRP

A partir du niveau supérieur, pour chaque niveau de nomenclature, chaque article et à chaque période considérée p, l'algorithme MRP consiste à répéter :

- Calculer le besoin brut en début de la période p, BB_p de l'équation (IV.1), le besoin brut pour un article Y du niveau n de la nomenclature est le produit de l'ordre prévisionnel de l'article X de niveau supérieur n-1 de la nomenclature et le coefficient de montage cm(Y/X) de l'article de niveau n considéré :

$$BB_p(Y_n) = OP_p(X_{n-1}) * cm(Y_n/X) \quad (IV.1)$$

- Calculer les articles disponibles en début de période p, AD_p selon l'équation (IV.2), où SP_p est le stock prévisionnel attendu après les transactions réalisées au cours de la période. OL_p est l'ordre de fabrication en cours de production ou l'ordre d'approvisionnement en cours de livraison attendu en début de la période p.

$$AD_p = SP_{p-1} + OL_p \quad (IV.2)$$

- Calculer le besoin net en début de période p, BN_p, selon l'équation (IV.3)

$$BN_p = \text{Max}(0, BB_p - AD_p) \quad (IV.3)$$

- Définir les ordres proposés pour satisfaire le besoin net en précisant la quantité d'unités

de l'article et la date de lancement.

Calculer le stock prévisionnel en fin de période SP_p selon l'équation (IV.4) où OL_p est un ordre d'approvisionnement en cours de livraison et OP_p un ordre de production.

$$SP_p = SP_{p-1} + OL_p + OP_p - BB_p \quad (IV.4)$$

IV.3.2 Les limites et l'évolution du MRP

Le MRP est très utile pour la détermination des dates de lancement des commandes (à produire ou à s'approvisionner) ainsi que les quantités nécessaires de chaque composant, il est également utile pour ajuster les dates prévues de lancement des commandes suite aux glissements des délais de production ou d'approvisionnement. Cependant le MRP tel que proposé par Orlicky présente quelques limitations, parmi lesquelles on cite (Vrat, 2014) :

- Les délais de livraison sont considérés déterministes, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, les délais de livraison qu'ils soient de la production ou de l'approvisionnement sont sujet à être variables suite aux différents problèmes que peut rencontrer la production, les fournisseurs ou même les moyens de transport. Face à cette variabilité deux alternatives peuvent être mise en place, soit mettre en place un stock de sécurité ou bien ajouter un délai de sécurité (calculé statistiquement) au délai de livraison.
- La qualité du produit fourni par l'unité de production ou les fournisseurs est considérée parfaite (aucune non-conformité ou rebus), Ce qui n'est pas le cas dans la réalité, dans ce cas les ordres de fabrication ou d'approvisionnement doivent tenir compte de la qualité des produits fournis.
- L'application simultanée du MRP pour plusieurs produits qui comportent des composants communs, peut éventuellement poser quelques difficultés.
- Le MRP ne prend pas en considération lors de la détermination des ordres de fabrication ou d'approvisionnement les capacités des unités de production ou des fournisseurs.

Face à ces limitations, des recherches ont été initiées dans le cadre du MRP selon deux axes. Le premier axe de recherche pourrait être considéré comme un courant de recherche extensible qui a visé à étendre le modèle MRP vers un modèle qui prend en considération la capacité de production ainsi que celle des fournisseurs, ceci a donné naissance au MRP II qui fournit comme éléments de sorties non seulement les ordres de fabrication /d'approvisionnement mais aussi le plan de gestion des capacités. Ce courant de recherche à

contribuer ensuite au développement des ERP qui ont complètement révolutionné la gestion des entreprises (Vrat, 2014). L'ERP est défini par (Shankar et Jaiswal, 1999) en tant que : « une architecture logicielle qui permet de faciliter la gestion des flux d'information entre les différentes fonctions d'une entreprise, il contient un ensemble d'activités supportées par des modules applicatifs interconnectés qui permettent à l'entreprise de gérer ses activités de planification, de gestion des stocks, de suivi des commandes, de production et maintenance, de la logistique, des finances et de la gestion des ressources humaines ».

Concernant le deuxième axe de recherche, les travaux se focalisaient principalement à améliorer le concept MRP proposé par Orlicky, en traitant ses principales limitations. En ce qui concerne les limitations du modèle MRP relatives à la non prise en considération de la variabilité des délais de livraison et de la qualité des produits, la littérature fournit plusieurs approches qui traitent l'incertitude dans les systèmes MRP en se basant sur le contrôle stochastique des stocks (Barba-Gutiérrez et Adenso-Díaz, 2009), et sur la logique floue (Mula et al., 2006). Par ailleurs, les capacités de production, les contraintes des fournisseurs, la minimisation des coûts et la variabilité de la demande ont été pris en compte progressivement dans le cadre de modèles mathématiques, (Karni, 1981) fournit un modèle mathématique à base de la programmation linéaire par nombres entiers qui prend en considération l'ordonnancement des ordres de fabrication/d'approvisionnement, les capacités de production, les changement des plans de production, les conditions et les couts unitaires de stockage.

D'un autre côté, plusieurs travaux de recherches sont proposés dans la littérature pour adapter le MRP aux nouveaux environnements de production en réadaptant le concept de la nomenclature, (Jans, 2008) propose de transformer le système de production « make to stock » en un système de production « make to order » par la prise en considération de la personnalisation du produit fini en produisant une nomenclature adaptée à chaque produit personnalisé. En parallèle d'autres travaux de recherches se focalisaient sur le traitement des problématiques liées au MRP et à la gestion des transports d'une manière intégrée au lieu d'être traitée séquentiellement (l'une reçoit les outputs de l'autre en tant que inputs), (Mula et al., 2012) propose un modèle conceptuel qui intègre à la fois les aspects liés à la planification de la production et ceux liés à la gestion des transports dans un seul modèle, le MRP IV. (Díaz-Madroño, 2017) propose un modèle mathématique de programmation linéaire en se basant sur le Framework MRP IV proposé par (Mula et al., 2012).

IV.4 La planification des besoins de la logistique

Nous nous intéressons dans cette deuxième partie à la planification des besoins logistiques en amont et en aval de la chaîne logistique, en d'autres termes la planification des besoins en moyens de transport nécessaires pour la collecte des matières premières/ composants et pour la distribution des produits finis. Ce type de problématique constitue un champ important de recherche opérationnelle qui est la planification des tournées de véhicules.

IV.4.1 Le problème de tournées des véhicules

Les problèmes de tournées de véhicules sont initialement introduits par (Dantzig et Ramzer, 1959) pour résoudre le problème de livraison du carburant aux stations-services, la version basique du problème de tournée de véhicules, Figure IV-5, consiste à déterminer à partir d'un dépôt, les tournées optimales d'un ensemble de véhicules afin de servir un ensemble de clients (Adewumi et Adeleke, 2018).

La résolution des problèmes de tournées de véhicules constitue un champ important de recherche opérationnelle et de management de la logistique (Wujun et Wenshui, 2017), ces problèmes font partie de la classe des problèmes NP-hard (Lenstra et Rinnooy Kan, 1981) dont on ne peut pas résoudre en un temps polynomial (le temps de résolution n'est pas limité par une expression polynomiale en fonction de la dimension du problème).

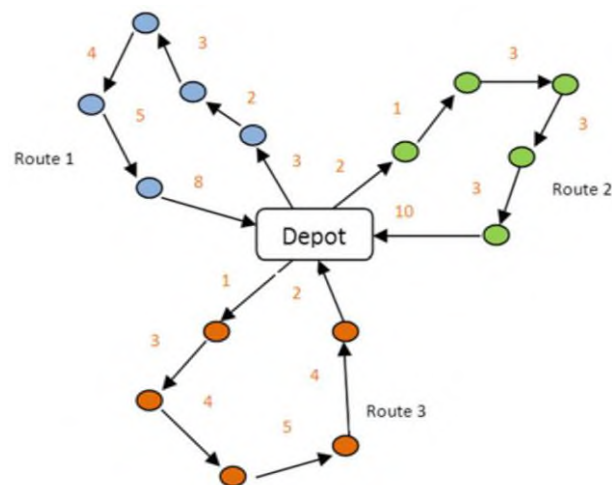


Figure IV- 5 Exemple d'une tournée de véhicules

Les problèmes de tournées de véhicules peuvent être modélisés en tant que graphe dans lequel deux nœuds quelconques sont reliés par au moins un arc, il s'agit d'un graphe complet $G(C, E)$:

- $C = \{C_0, C_1, C_2, \dots, C_n\}$ étant un ensemble de nœuds, C_0 est le dépôt et les autres C_i sont les destinations/clients à servir par une flotte de m véhicules à capacité limitée C_k ,
- $E = [\{C_i, C_j\}, (i, j) \in A = \{(i, j) : i, j = 0, 1, 2, \dots, n, i \neq j\}]$ est l'ensemble des arcs reliant les différents nœuds.

Les équations (IV.5) – (IV.9) représentent mathématiquement le problème de tournées de véhicules à capacité limitée « CVRP » (P1) :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} x_{ijk} \quad (IV.5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = \sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in \{1, 2, 3, \dots, m\} \quad (IV.6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (IV.7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_j x_{ijk} \leq C_k \quad \forall k \in \{1, 2, 3, \dots, m\} \quad (IV.8)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{(i,j) \in N \times N} x_{ijk} \leq |N| - 1 \quad \forall N \subset \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (IV.9)$$

L'équation (IV.5) représente la fonction objective visant à minimiser les couts nécessaires pour servir l'ensemble des clients à partir du dépôt. C_{ij} étant le cout nécessaire pour parcourir l'arc (i, j) , ce dernier peut être le montant du carburant consommé, le temps consommé ou bien tout simplement la distance parcourue de i à j . x_{ijk} est une variable binaire égale à 1 si le véhicule k parcourt l'arc (i, j) et 0 si non.

L'équation (IV.6) exprime le fait que chaque véhicule qui quitte le dépôt pour servir un ou un ensemble de clients doit retourner au dépôt.

L'équation (IV.7) ajoute la contrainte qui stipule que la demande au niveau d'un nœud doit être servie une seule fois, chaque nœud doit être servi par un seul véhicule.

L'équation (IV.8) permet de s'assurer que les capacités respectives de chaque véhicule ne

seront pas dépassées. L'équation (IV.9) assure l'élimination des tournées qui ne commencent pas et/ou ceux qui ne se terminent pas au dépôt.

IV.4.2 Les variantes du problème de tournées des véhicules

La version basique des problèmes de tournées de véhicules a connu plusieurs extensions en ajoutant une ou plusieurs contraintes sur les variables du problème initial, ces variables peuvent être, la capacité des véhicules, la distance parcourue, l'heure de départ ou d'arrivée, le délai nécessaire pour la livraison ou la récupération des produits depuis le dépôt ou depuis les clients, on distingue différents types de problèmes de tournées de véhicules ci-dessous quelques-uns (Dixit et al., 2019).

- MDVRP : cette variante prend en considération plusieurs dépôts qui peuvent fournir des produits au lieu d'un seul dépôt.
- VRPTW : la contrainte relative à la fourchette de temps accordée pour servir le client est ajoutée au problème classique de tournée de véhicule.
- VRPB traite deux sous-groupes de clients, les uns devront être servis depuis le dépôt et les autres transmettent des produits vers le dépôt.
- OVRP : consiste à traiter les problèmes de tournées de véhicules dans lesquels les tournées ne sont pas des circuits fermés, les véhicules ne retournent pas au dépôt.
- DVRP : sont des problèmes de tournées de véhicules dans lesquels les requêtes clients sont connues auparavant (quantités) mais peuvent être formulées au cours de l'opération du transport, ces problèmes sont considérés des problèmes de tournées dynamiques.
- Stochastique VRP (Maini et Goel, 2017) : dans cette variante du VRP, aucune information n'est disponible, avant de commencer les tournées, concernant les demandes clients. Les tournées de véhicules sont planifiées en se basant sur des distributions de probabilités des demandes clients.

VI.3.1 La résolution des problèmes de tournées des véhicules

La résolution du problème de routage des véhicules est abordée dans la littérature selon deux types de méthodes (Sahbi et al., 2011) Figure IV-6, les méthodes exactes et les méthodes approchées. Les méthodes exactes permettent de trouver la solution optimale en explorant l'ensemble des solutions possibles. Toutefois l'augmentation de la dimension du problème étudié (nombre de clients à servir et/ou nombre de moyen logistique) rend l'exploration

exhaustive de toutes les solutions quasi-impossible dans un délai suffisamment petit.

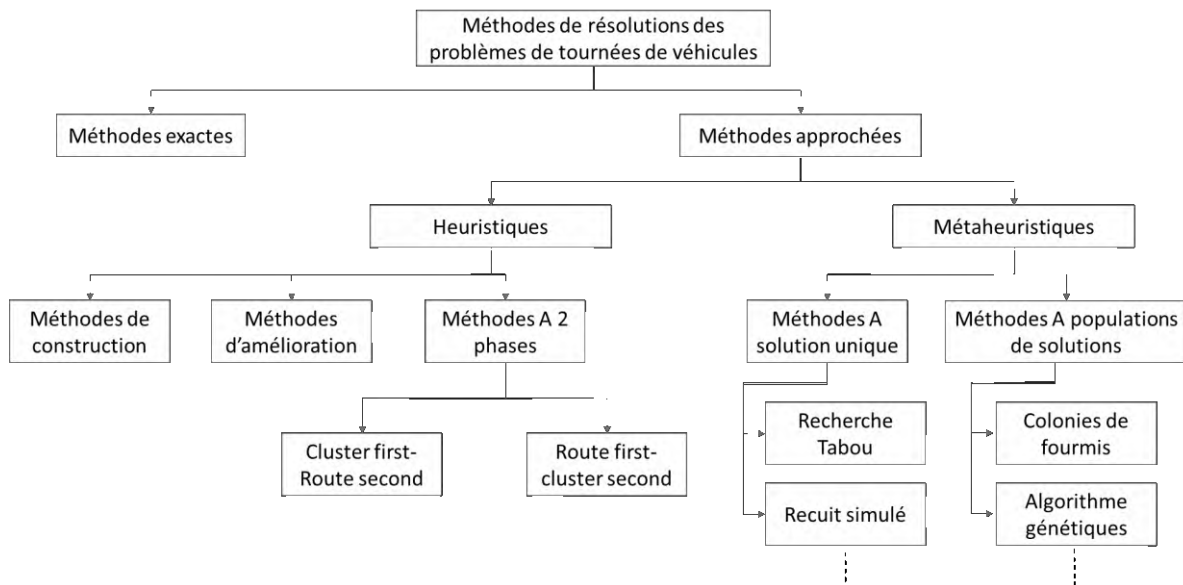


Figure IV-6 Méthodes de résolution des problèmes de tournées de véhicules

Les méthodes approchées, quant à elles, permettent de trouver des solutions acceptables mais ne garantissent pas que la solution trouvée est la solution optimale. On distingue deux types de méthodes approchées, les heuristiques et les méta-heuristiques.

Les heuristiques sont par définition une manière de guider un algorithme pour réduire la complexité du problème, elles sont spécifiques à la résolution d'un problème. On distingue trois heuristiques spécifiques aux problèmes de tournées de véhicules :

- Les heuristiques constructives sont des algorithmes itératifs dans lesquelles à chaque itération une solution partielle est complétée, l'heuristique constructive la plus populaire est l'heuristique « économies » (Clarke et Wright, 1964), elle part d'une solution initiale où chaque destination est servie par un véhicule ensuite elle essaye de fusionner les tournées en calculant pour chaque paire de clients (v_i, v_j) l'économie réalisée en allant de v_i à v_j au lieu de retourner au dépôt, les économies calculées sont ensuite ordonnées et les clients correspondants à la plus grande économie sont regroupés dans une même tournée.
- Les heuristiques d'améliorations essayent d'améliorer une solution en procédant à des échanges des clients au sein des tournées, les échanges sont effectués au sein d'une même tournée ou bien ils sont effectués entre des clients faisant partie à des tournées différentes (Crainic et Semet, 2006).
- Méthodes à deux phases consistent à décomposer le problème de tournées de véhicules en

deux sous problèmes, l'un relatif au partitionnement des clients en sous-groupes et l'autre relatif à la détermination d'une tournée optimale pour chaque sous-groupe. Selon l'ordre dans lequel les sous problèmes sont traités on distingue deux méthodes, la méthode Cluster first-Route second et la méthode Route first- Cluster second.

Les méta-heuristiques sont des heuristiques évoluées et puissantes qui peuvent être appliquées à n'importe quel problème d'optimisation, elles sont classées en deux catégories, les méta-heuristiques à solution unique ou bien de recherche locale et des méta-heuristiques à population de solutions. Parmi les méta-heuristiques proposées dans la littérature on cite ci-dessous à titre indicatif deux exemples de méta-heuristique de recherche locale, le recuit simulé et la recherche tabou, et deux autres à population de solutions, les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes des colonies de fourmis (Siarry, 2016).

- La recherche taboue : cette méthode est formalisée en 1986 par (Glover, 1986), son principe se base sur le mécanisme inspiré par la mémoire humaine, elle effectue des mises à jour à une solution initiale durant des itérations successives, durant chaque itération la méthode constitue un ensemble de voisins de la solution initiale en effectuant un seul mouvement élémentaire, ensuite elle évalue la valeur de la fonction objectif correspondante aux différents voisins obtenus et substitue la solution initiale par la meilleure solution trouvée même si cette dernière est moins bonne que la solution initiale, ceci aide à éviter les minimum locaux . Pour éviter de retourner à une solution déjà obtenue dans des itérations précédentes, cette méthode utilise une liste de mouvements tabous qu'il évite lors de la constitution du voisinage, et elle y insère le mouvement correspondant à la solution obtenue lors de chaque itération.
- Le recuit simulé : cette méthode s'inspire des techniques effectuées par les métallurgistes pour obtenir une matière ayant des molécules bien ordonnées en état solide, le recuit consiste à faire chauffer une matière jusqu'à atteindre une température très élevée et faire descendre cette température lentement. Le recuit simulé (Kirkpatrick et al., 1983) applique ce processus à la solution d'un problème d'optimisation, la fonction objectif étant assimilée à l'énergie de la matière qui est par la suite minimisée en introduisant une température fictive. Pour chaque itération on introduit une modification élémentaire de la solution, si cette modification implique une diminution de la fonction objectif ($\Delta E \leq 0$) elle est acceptée, sinon elle sera acceptée avec une probabilité de $e^{\frac{-\Delta E}{T}}$, T étant une température constante

jusqu'à l'atteinte de l'équilibre thermodynamique. Une fois l'équilibre est atteint (un nombre bien défini d'itérations) on fait diminuer cette température et on répète le processus entier jusqu'à atteindre une température réduite (système refroidi).

- Les algorithmes évolutionnaires s'inspirent de l'évolution biologique des espèces, les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989) sont les algorithmes évolutionnaires les plus populaires. Ils partent d'une population de solution initiale qu'ils essayent d'améliorer graduellement durant plusieurs générations en appliquant d'une manière répétitive les principes de sélection et de reproduction. Le principe de la sélection consiste à sélectionner les individus les plus aptes pour la survie et la reproduction (en comparant la valeur de la fonction objectif correspondante à chaque individu). Le principe de reproduction consiste à mélanger, recombinaison et changer (mutation) des caractéristiques des solutions (parents) pour former de nouvelles solutions (descendants) dotées de nouvelles potentialités.
- Les algorithmes de colonies de fourmis proposées la première fois par (Coloni et al., 1991) pour résoudre les problèmes de voyageurs de commerce en imitant la capacité collective de fourmis à trouver le chemin le plus court. Ce qui a été remarqué et modélisé sous format d'algorithme, est le fait que les fourmis suivent toutes un même chemin et que ce chemin est le chemin le plus court grâce à l'utilisation d'un mode de communication indirecte appelé en biologie « la stigmergie ». La stigmergie consiste, d'un côté, à ce que chaque fourmi de la colonie laisse une substance chimique (phéromone) tout au long de son chemin et de l'autre côté, à ce que tous les autres membres de la colonie de fourmis orientent leurs trajets de telle sorte à ce que l'odeur soit la plus forte possible. Les algorithmes de colonies de fourmis proposés sont caractérisés par plusieurs points forts, parmi lesquels le parallélisme (plusieurs agents recherchent une solution au même temps), la flexibilité (adaptation aux modifications de l'environnement), la robustesse (la colonie peut maintenir son activité même si quelques fourmis ne sont plus opérationnelles) et l'auto-organisation (une colonie peut trouver une solution qui n'est pas connue à l'avance).

Il reste à signaler qu'il existe un troisième type de méthodes de résolution approchée, en plus des heuristiques et des métaheuristiques, qui est les méthodes hybrides. Ces méthodes consistent à répéter l'application d'une heuristique constructive suivie d'une métaheuristique jusqu'à atteindre un critère d'arrêt (généralement un temps d'exécution).

IV.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents processus de la chaîne logistique ainsi que les interactions entre ces processus puis nous avons introduit les notions fondamentales relatives à la planification de la production et de la distribution. Nous avons également mis l'accent sur la nécessité d'effectuer une planification intégrée au sein de la chaîne logistique afin d'assurer la réactivité, l'agilité et la maîtrise des coûts permettant une gestion efficace et efficiente de la chaîne logistique.

Cette planification intégrée sera l'objet des chapitres suivants qui mettront en évidence l'algorithme de planification intégrée de la production et de la logistique (amont et aval) ainsi qu'un solveur industriel permettant d'exécuter cet algorithme.

Chapitre V : Modèle proposé pour la planification intégrée de la production et de la logistique - MLRP

V.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'algorithme MLRP « Manufacturing and Logistics Requirement Planning » permettant de déterminer les besoins de la production, de la logistique amont (relative aux composants et matières premières) et de la logistique aval (relative à la distribution des produits finis) en prenant en considération les demandes clients, la nomenclature restructurée (structure de composition du produit fini adaptée au MLRP), les délais de livraison (de transport et de production), les dimensions et le poids des composants, le volume et le poids maximal des moyens de transport disponibles et les coûts de transport par voyage. Le MLRP permettra ainsi de planifier simultanément les besoins de production et ceux de la logistique amont (liées aux approvisionnement) et de la logistique aval (liées à la distribution), ainsi que la planification des tournées de véhicules liées à la distribution et au réapprovisionnement tout en prenant en considération les capacités liées aux unités de production qu'elles soient internes ou chez les fournisseurs.

Nous présentons en premier lieu la nouvelle structure de la nomenclature adaptée au MLRP qui prend en considération les nouveaux paramètres à définir au niveau de chaque composant de la nomenclature. Nous détaillons ensuite les algorithmes utilisés pour l'implémentation des heuristiques utilisées pour la planification des tournées de véhicules et nous comparons les performances de ces différentes heuristiques. Nous terminons le chapitre par la présentation du modèle de planification intégrée de la production et de la logistique.

V.2 Nomenclature adaptée au MLRP

Pour pouvoir intégrer la planification des besoins logistiques simultanément avec la planification des besoins de fabrication, nous avons introduit des nouveaux paramètres à définir au niveau de chaque composant qui sont le volume et le poids pour pouvoir déterminer les moyens de transport nécessaires et nous avons également ajouté les délais de transport relatifs à chaque composant. La Figure V-1, présente un exemple de la nomenclature adaptée au MLRP d'un produit HPT00 dans laquelle :

- **cm** est le coefficient de montage associé au composant, pour mettre à disposition une quantité Q du composant père on aura besoin de $cm \cdot Q$ du composant en question
- **cap** est la capacité de production d'un composant dans une période égale à une unité de l'horizon de planification.
- **LT_p** est le délai de production ou d'approvisionnement d'un composant

- **LT_l** est le délai du transport relatif à un composant,
- **V et W** sont le volume et le poids du composant
- **SS** est le stock de sécurité associé au composant en question
- **S_{t0}** est le stock initial du composant
- **Id fournisseur** est l'identifiant du fournisseur du composant lorsque ce dernier n'est pas produit en interne

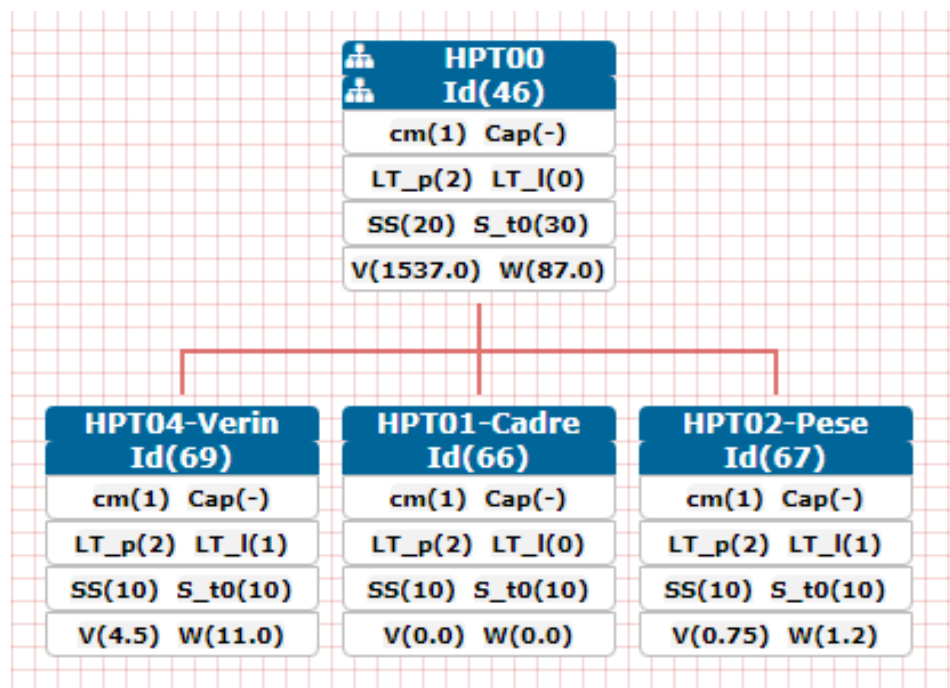


Figure V-1 Exemple de nomenclature adaptée au MLRP

Pour faciliter la création de la nomenclature d'un produit fini, nous avons mis en place un générateur de nomenclature permettant à l'utilisateur, à travers une interface web, de créer la nomenclature pas à pas depuis le niveau le plus haut (produit fini) jusqu'au niveau le plus bas des composants. L'interface web permet également de charger la nomenclature sous format XML ou JSON et la convertir en graphe tel que celui de la Figure V-1, les données XML et JSON associées sont présentées dans la Figure V-2. Les données relatives à la nomenclature sont par la suite stockées dans une base de données pour être exploitées par l'algorithme MLRP. Les spécifications et les éléments de conception du générateur de nomenclature adaptée au MLRP seront présentés en détail dans le chapitre suivant.

```

{
  "name": "HPT00",
  "cm": "1",
  "lead_time": "2",
  "security_stock": "20",
  "id": "46",
  "dispo_t0": "30",
  "lt_1": "0",
  "weight": "87.0",
  "volume": "1537.0",
  "cap": "-",
  "children": [
    {
      "name": "HPT04-Verin",
      "cm": "1",
      "lead_time": "2",
      "security_stock": "10",
      "id": "69",
      "dispo_t0": "10",
      "lt_1": "1",
      "weight": "11.0",
      "volume": "4.5",
      "cap": "-"
    },
    {
      "name": "HPT01-Cadre",
      "cm": "1",
      "lead_time": "2",
      "security_stock": "10",
      "id": "66",
      "dispo_t0": "10",
      "lt_1": "0",
      "weight": "0.0",
      "volume": "0.0",
      "cap": "-"
    },
    {
      "name": "HPT02-Pese",
      "cm": "1",
      "lead_time": "2",
      "security_stock": "10",
      "id": "67",
      "dispo_t0": "10",
      "lt_1": "1",
      "weight": "1.2",
      "volume": "0.75",
      "cap": "-"
    }
  ]
}

```

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<root>
  <name>HPT00</name>
  <cm>1</cm>
  <lead_time>2</lead_time>
  <security_stock>20</security_stock>
  <id>46</id>
  <dispo_t0>30</dispo_t0>
  <lt_1>0</lt_1>
  <weight>87.0</weight>
  <volume>1537.0</volume>
  <cap>-</cap>
  <children>
    <name>HPT04-Verin</name>
    <cm>1</cm>
    <lead_time>2</lead_time>
    <security_stock>10</security_stock>
    <id>69</id>
    <dispo_t0>10</dispo_t0>
    <lt_1>1</lt_1>
    <weight>11.0</weight>
    <volume>4.5</volume>
    <cap>-</cap>
  </children>
  <children>
    <name>HPT01-Cadre</name>
    <cm>1</cm>
    <lead_time>2</lead_time>
    <security_stock>10</security_stock>
    <id>66</id>
    <dispo_t0>10</dispo_t0>
    <lt_1>0</lt_1>
    <weight>0.0</weight>
    <volume>0.0</volume>
    <cap>-</cap>
  </children>
  <children>
    <name>HPT02-Pese</name>
    <cm>1</cm>
    <lead_time>2</lead_time>
    <security_stock>10</security_stock>
    <id>67</id>
    <dispo_t0>10</dispo_t0>
    <lt_1>1</lt_1>
    <weight>1.2</weight>
    <volume>0.75</volume>
    <cap>-</cap>
  </children>
</root>

```

Figure V- 2 Exemple des données XML et JSON fourni au générateur de nomenclature

V.3 Planification des tournées de flottes des véhicules : implémentation et comparaison des heuristiques constructives

Dans la majorité des cas industriels, les entreprises sont confrontées à des problèmes de tournées de flottes de véhicules (HFVRP) vue que les transports des marchandises se font à travers des véhicules de différents types et de différentes capacités. Parmi les facteurs qui rendent les problèmes HFVRP plus confrontés dans le monde industriel que les problèmes CVRP, nous citons (Hoff et al., 2010) :

- Les exigences spécifiques aux clients (contraintes dimensionnelles au niveau des espaces de stockage/déstockage).
- Les exigences liées aux routes empruntées (rues étroites dans les zones urbaines, Limites de poids ou de taille sur les routes dans les zones rurales...)
- Les flottes de véhicules de différentes capacités permettent généralement plus de flexibilité et des couts plus optimisés face à la variabilité à la demande.
- Les véhicules de grande capacité engendrent généralement des couts moins chers par unité transportée.

L'objectif de ce paragraphe est d'une part l'implémentation des heuristiques constructives pour la résolution des problèmes de tournées des flottes de véhicules et de l'autre part, comparer la performance de ces heuristiques en prenant en considération la dimension du problème étudié, la dispersion entre les différents clients à servir, leurs positionnements par rapport au point de départ et la variabilité de la demande de ces clients.

V.3.1 Définition et implémentation des problèmes de tournées des flottes de véhicules (HFVRP)

Ils existent plusieurs variantes relatives aux problèmes de tournées des flottes de véhicules, (Baldacci et al., 2008) distinguent 5 variantes du problème HFVRP en fonction la prise en compte ou non des couts fixes par type de véhicule, des couts dépendant des itinéraires et aussi en fonction du nombre limité ou illimité de chaque type de véhicule :

- HVRPFD dans lequel le nombre de chaque type de véhicule est limité, les couts fixes liés à chaque type de véhicules et les couts dépendants des distances parcourues sont pris en compte.
- HVRPD qui est similaire au HFVRPD concernant la limitation des nombres de véhicules et la prise en compte des couts dépendant, la seule différence réside dans la non prise en

considération des couts fixes par type de véhicules.

- FSMFD dans lequel le nombre de chaque type de véhicule est illimité, les couts fixes liés à chaque type de véhicules et les couts dépendants des distances parcourues sont pris en compte.
- FSMD dans lequel le nombre de chaque type de véhicule est illimité et les couts fixes par type de véhicules ne sont pas pris en compte.
- FSMF dans lequel le nombre de chaque type de véhicule est illimité et les couts dépendants par type de véhicules ne sont pas pris en compte, seulement les couts fixes sont considérés.

La formulation du problème des tournées des flottes de véhicules est obtenue en prenant en considération les couts fixes des différents véhicules au niveau de la fonction objective, l'équation (IV.5) au niveau du problème P1, définie dans le chapitre précédent, est substituée par l'équation (V.1). La première partie de l'équation concerne le cout fixe associé aux différents véhicules qui sont sortis du point de départ « 0 » allant vers une destination quelconque, F_k étant le cout fixe associé au véhicule k . La deuxième partie de l'équation, concerne la somme de tous les couts nécessaires pour se déplacer d'un point i quelconque vers un autre point j en utilisant le véhicule k .

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{k=1}^m F_k \sum_{j=0}^n x_{0jk} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m C_{ij} x_{ijk} \quad (V.1)$$

Dans le cas où le nombre d'un ou plusieurs types de véhicule est limitée, une autre contrainte s'ajoute aux contraintes (IV.6) -(IV.9) du problème (P1), il s'agit de la contrainte (V.2) : le nombre de véhicule de type k qui ont sortie du point de départ « 0 » vers une destination quelconque j doit être inférieur ou égale au nombre de véhicules (m_k) disponibles de type k .

$$\sum_{j=0}^n x_{0jk} \leq m_k \quad (V.2)$$

Nous nous intéressons dans ce qui suit à l'implémentation de quelques heuristiques constructives pour les problèmes de tournées de flottes de véhicules, pour se faire nous introduisons le principe utilisé par chaque heuristique pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules à capacité limitée (CVRP), ensuite nous exposons l'extension de ce principe pour

être utilisé dans le cadre des problèmes HFVRP. Les heuristiques qui rentrent dans le cadre de la présente étude sont l'algorithme des économies et les algorithmes à deux phases : « cluster first route second » et « route first cluster second ».

V.3.1.1 L'algorithme des économies pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP

L'algorithme des économies est l'un des heuristiques les plus utilisées pour les problèmes de tournées des véhicules, développé initialement dans les années soixante par (Clarke et Wright, 1964). Cet algorithme est utilisé dans les cas où le nombre de véhicules n'est pas fixé à l'avance.

L'algorithme consiste à affecter initialement un véhicule à chaque client, ensuite on calcule les économies réalisées en fusionnant deux itinéraires. Plusieurs itérations sont exécutées, pour chaque itération l'algorithme calcule les économies qui peuvent être réalisées par toutes les fusions possibles (en respectant la contrainte de la capacité du véhicule) et il fusionne les itinéraires qui fournissent la meilleure économie. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que aucune fusion ne soit possible.

Les économies réalisées à travers la fusion de deux itinéraires, Figure V-3, sont calculées selon l'équation (V.3) :

$$e_{ab} = d_{0j} + d_{0i} - d_{ij} \quad (V.3)$$

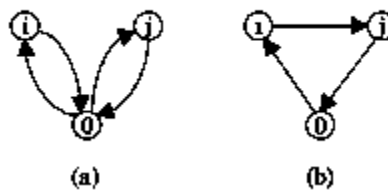


Figure V- 3 Fusion de deux itinéraires

L'algorithme des économies implémenté dans le cadre des tournées de véhicules à capacité limitée (CVRP) est présenté dans la Figure V-4.

Dans le cadre du CVRP, les distances sont utilisées pour le calcul des économies du fait qu'un seul type des moyens de transport est mis en œuvre. Toutefois dans le cadre du HFVRP, plusieurs types de véhicules sont à la disposition, chacun à ses propres couts fixes et cout par kilomètre parcouru. Les économies réalisées à travers la fusion de deux itinéraires (a) et (b) en utilisant un véhicule de type c (respectant les contraintes de capacité), sont calculées selon

l'équation (V.4).

$$e_{ab_c} = (d_{ra} * Cost_{dv_a} + d_{rb} * Cost_{dv_b} - d_{rab} * Cost_{dv_c}) + (Cost_{fv_a} + Cost_{fv_b} - Cost_{fv_c}) \quad (V.4)$$

$Cost_{dv_a}$: le cout par distance lié au véhicule V_a

$Cost_{fv_a}$: Le cout fixe associé au véhicule V_a

d_{ra} : la distance globale parcourue dans l'itinéraire (a)

d_{rab} : la distance globale parcourue dans l'itinéraire fusionné (ab)

Dans le cas du problème des tournées des flottes de véhicules, la fusion est réalisée soit en utilisant le véhicule utilisé par l'un des deux itinéraires ou bien un autre véhicule de capacité supérieure qui permettra des économies plus intéressantes. La Figure V-4 présente également l'algorithme des économies adapté pour les problèmes HFVRP. Dans chaque itération on détermine les meilleures économies qui peuvent être obtenues en fusionnant deux itinéraires et en utilisant les différents types de véhicules disponibles. A l'instar de la version de l'algorithme des économies utilisée pour le CVRP on affecte initialement des véhicules à chaque client, le véhicule affecté est celui qui engendre le moindre cout.

```

1. Savings Procedure For CVRP
2.  $V \leftarrow$  the available vehicle type with capacity:  $cap_v$ 
3.  $Custs \leftarrow$  the set of clients to serve
4. Initialize  $List\_Routes$  (set of routes, initially empty)
5. For Each  $C$  in  $Custs$ 
6.   Create New Route  $r$ 
7.   Set route sequence :  $r.sequence(0,C,0)$ 
8.   Set route vehicle :  $r.vehicle(V)$ 
9.   Add  $r$  to the Set of routes  $List\_Routes$ 
10. End-For
11.  $merge\_done \leftarrow True$ 
12. While ( $merge\_done$ )
13.    $List\_Routes\_tmp \leftarrow List\_Routes$ 
14.   While :  $List\_Routes\_tmp$  is not Empty
15.      $r1 \leftarrow$  Select a route from  $List\_Routes\_tmp$ 
16.     delete  $r1$  from  $List\_Routes\_tmp$ 
17.     if ( $List\_Routes\_tmp$  is not Empty)
18.       For Each  $r$  in  $List\_Routes\_tmp$ 
19.         if ( $r.getOrders + r1.getOrders \leq cap_v$ )
20.            $savings \leftarrow$  Distance(depot, last C in  $r.sequence$ )
21.             + Distance(depot, first C in  $r1.sequence$ )
22.             - Distance(first C in  $r.sequence$ , last C in  $r1.sequence$ )
23.           if ( $savings > savings\_max$ )
24.              $savings\_max \leftarrow savings$ 
25.              $routes\_to\_merge \leftarrow (r1, r)$ 
26.           End-if
27.         End-if
28.       End For
29.     End-if
30.   End-While
31.   if ( $savings\_max > 0$ )
32.      $R_n \leftarrow Merge\_routes(routes\_to\_merge)$ 
33.     Delete  $routes\_to\_merge$  from  $List\_Routes$ 
34.     Add  $R_n$  to  $List\_Routes$ 
35.      $merge\_done \leftarrow True$ 
36.   else
37.      $merge\_done \leftarrow False$ 
38.   End-if
39. End-While
40. End-While

```

```

1. Savings Procedure for HFVRP
2.  $List\_Vehicles \leftarrow$  the set of available vehicle types
3.  $Custs \leftarrow$  the set of clients to serve
4. Initialize  $List\_Routes$  (set of routes, initially empty)
5.  $cost\_min \leftarrow$  Very big Number
6. For Each  $C$  in  $Custs$ 
7.   Create New Route  $r$ 
8.   Set route sequence :  $r.sequence(0,C,0)$ 
9.   For Each  $veh$  in  $List\_Vehicles$ 
10.    if ( $veh.capacity > C.Order$ )
11.       $cost = veh.fixed\_cost + veh.d\_cost * Distance(depot, C)$ 
12.      if ( $cost < cost\_min$ )
13.         $cost\_min \leftarrow cost$ 
14.         $V \leftarrow veh$ 
15.      End-if
16.    End-if
17.   End-For
18.   Set route vehicle :  $r.vehicle(V)$ 
19.   Add  $r$  to the Set of routes  $List\_Routes$ 
20. End-For
21.  $merge\_done \leftarrow True$ 
22. While ( $merge\_done$ )
23.    $List\_Routes\_tmp \leftarrow List\_Routes$ 
24.   While :  $List\_Routes\_tmp$  is not Empty
25.      $r1 \leftarrow$  Select a route from  $List\_Routes\_tmp$ 
26.     delete  $r1$  from  $List\_Routes\_tmp$ 
27.     if ( $List\_Routes\_tmp$  is not Empty)
28.       For Each  $r$  in  $List\_Routes\_tmp$ 
29.         For Each  $veh$  in  $List\_Vehicles$ 
30.           if ( $r.getOrders + r1.getOrders \leq veh.capacity$ )
31.              $savings\_d \leftarrow$  Distance(depot, last C in  $r.sequence$ )
32.               + Distance(depot, first C in  $r1.sequence$ )
33.               - Distance(first C in  $r.sequence$ , last C in  $r1.sequence$ )
34.              $d\_merged\_routes \leftarrow r.distance + r1.distance - savings\_d$ 
35.              $savings \leftarrow r.distance * r.vehicle.d\_cost$ 
36.               +  $r1.distance * r1.vehicle.d\_cost - d\_merged\_routes * veh.d\_cost$ 
37.               +  $r.vehicle.fixed\_cost + r1.vehicle.fixed\_cost - veh.fixed\_cost$ 
38.             if ( $savings > savings\_max$ )
39.                $savings\_max \leftarrow savings$ 
40.                $routes\_to\_merge \leftarrow (r1, r)$ 
41.              $V \leftarrow veh$ 
42.           End-if
43.         End-if
44.       End For
45.     End For
46.   End-if
47. End-While
48.
49. if ( $savings\_max > 0$ )
50.    $R_n \leftarrow Merge\_routes(routes\_to\_merge$  using vehicle  $V$ )
51.   Delete  $routes\_to\_merge$  from  $List\_Routes$ 
52.   Add  $R_n$  to  $List\_Routes$ 
53.    $merge\_done \leftarrow True$ 
54. else
55.    $merge\_done \leftarrow False$ 
56. End-if
57.
58. End-While

```

Figure V- 4 Algorithme des économies pour les problèmes CVRP et HFVRP

V.3.1.2 L'algorithme « Cluster First Route Second » pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP

L'algorithme étudié dans ce paragraphe s'applique en deux phases, la première phase consiste à rassembler les différents clients en sous-groupes tout en respectant les contraintes imposées par le problème étudié (répartition géographique, capacité, ...). La deuxième phase

consiste à déterminer l'itinéraire optimale par sous-groupe en allant du dépôt et en retournant à ce dernier ce qui nous mène à résoudre un problème du voyageur de commerce par sous-groupe.

Nous avons choisi d'utiliser l'algorithme « Sweep » pour effectuer les regroupements imposés par la première phase. Les sous-groupes sont créés, Figure V-5, en faisant pivoter un rayon centré sur le dépôt et en ajoutant progressivement les clients au sous-groupe jusqu'au dépassement de la capacité allouée, puis on crée un autre sous-groupe (Cordeau et al., 2002). En pratique nous convertissons les coordonnées des différents clients en coordonnées polaires en prenant le dépôt comme origine du repère puis on trie la liste des clients par ordre croissant de l'angle associé à chaque client et ensuite on parcourt la liste jusqu'au dépassement de la capacité du véhicule pour créer un autre sous-groupe.

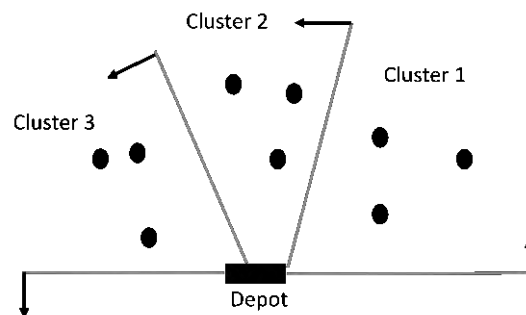


Figure V-5 L'algorithme « sweep » pour la création des sous-groupes

Pour la deuxième phase nous utilisons les algorithmes gloutons pour déterminer une solution pour chaque problème du voyageur de commerce au niveau de chaque sous-groupe. Les algorithmes gloutons ou le « Nearest Neighbor Algorithm » sont eux aussi considérés des heuristiques constructives pour les problèmes de voyageurs de commerce. Ils consistent à ce que le voyageur de commerce choisit à chaque fois le plus proche client non visité jusqu'à ce qu'il visite tous les clients puis il retourne au dépôt.

La Figure V-6 illustre les algorithmes implémentés pour résoudre les problèmes de types CVRP ainsi que les problèmes de type HFVRP en utilisant la démarche « cluster first route second ». L'adaptation instaurée pour que l'algorithme supporte le HFVRP consiste à faire un balayage des clients en prenant en considération tous les types de véhicules disponibles et on détermine pour chaque scénario le cout de transport par unité transportée. On sélectionne le sous-groupe qui nous permet un cout unitaire minimale, ensuite on effectue la même itération jusqu'à la constitution de tous les sous-groupes possibles.

<pre> 1. Cluster First Route Second Procedure For CVRP 2. $V \leftarrow$ the available vehicle type with capacity: cap_v 3. $Custs \leftarrow$ the set of clients to serve 4. $Custs_polar_ord \leftarrow$ the set of clients to serve with coordinates converted to polar coordinates and sorted ascending 5. Initialize $List_Routes$ (set of routes, initially empty) 6. Initialize $List_Custs_group$ (set of customer groups, initially empty) 7. $Cap \leftarrow 0$ 8. Initialize $Custs_group$ (set of customers, initially empty) 9. For Each C in $Custs_polar_ord$ 10. $Custs_group_closed \leftarrow False$ 11. if ($Cap+C.Order \leq cap_v$) 12. Add C to $Custs_group$ 13. $Cap \leftarrow Cap+C.Order$ 14. else 15. Add $Custs_group$ to $List_Custs_group$ 16. Re-Initialize $Custs_group$ 17. Add C to $Custs_group$ 18. $Cap \leftarrow C.Order$ 19. End-if 20. End-For 21. Add $Custs_group$ to $List_Custs_group$ 22. For Each $Custs_group$ in $List_Custs_group$ 23. Route $r \leftarrow$ GreedyTSP($Custs_group$) : generate route using greedy Algorithm for TSP 24. Add r to the Set of routes $List_Routes$ 25. End-For </pre>	<pre> 1. Cluster First Route Second Procedure For HFVRP 2. $List_Vehicles \leftarrow$ the set of available vehicle types 3. $Custs \leftarrow$ the set of clients to serve 4. $Custs_polar_ord \leftarrow$ the set of clients to serve with coordinates converted to polar coordinates and sorted ascending 5. Initialize $List_Routes$ (set of routes, initially empty) 6. Initialize $Custs_group$ (set of customers, initially empty) 7. Initialize $List_Custs_group_iter$ (set of $\langle Custs_group, Vehicle \rangle$, initially empty) 8. While : $Custs_polar_ord$ is not empty 9. For Each veh in $List_Vehicles$ 10. $Cap \leftarrow 0$ 11. Re-Initialize $Custs_group$ 12. For Each C in $Custs_polar_ord$ 13. if ($Cap+C.Order \leq veh.capacity$) 14. Add C to $Custs_group$ 15. $Cap \leftarrow Cap+C.Order$ 16. Else 17. Add $\langle Custs_group, veh \rangle$ to $List_Custs_group_iter$ 18. $Custs_group_added \leftarrow True$ 19. break For loop (line 12) 20. End-if 21. End-for 22. if (! $Custs_group_added$) 23. Add $\langle Custs_group, veh \rangle$ to $List_Custs_group_iter$ 24. $Custs_group_added \leftarrow False$ 25. End-if 26. End-for 27. For Each $\langle Custs_group, veh \rangle$ in $List_Custs_group_iter$ 28. Route $r \leftarrow$ GreedyTSP($Custs_group$) : generate route using greedy Algorithm for TSP 29. $Unit_cost \leftarrow$ Unit Cost per transported items 30. if ($Unit_cost \leq Unit_cost_min$) 31. $Unit_cost_min \leftarrow Unit_cost$ 32. $\langle Best_Custs_group, veh_b \rangle \leftarrow \langle Custs_group, veh \rangle$ 33. End-if 34. End-for 35. Route $r_b \leftarrow$ GreedyTSP($Best_Custs_group$) : generate route using greedy Algorithm for TSP 36. $r_b.vehicle \leftarrow veh_b$ 37. Add r_b to $List_Routes$ 38. $Custs_polar_ord \leftarrow Custs_polar_ord.remove(Best_Custs_group)$ 39. Re-Initialize $Best_Custs_group, veh_b$ 40. End-While </pre>
--	---

Figure V- 6 Algorithme « CFRS » pour le CVRP et le HFVRP

V.3.1.3 L'algorithme « Route First Cluster Second » pour la résolution des problèmes CVRP et HFVRP

A l'instar de L'algorithme étudié dans le paragraphe précédent, l'algorithme présenté dans ce paragraphe s'applique en deux phases, la première phase consiste à déterminer une tournée géante indépendamment des capacités ensuite on découpe cette tournée en sous tournées en prenant en considération les capacités des véhicules disponibles. La tournée géante est déterminée à l'aide de l'algorithme glouton ensuite :

- Pour les problèmes CVRP, on parcourt la tournée depuis le dépôt jusqu'au dépassement de la capacité, au point qui précède le point de dépassement on retourne au dépôt pour former une tournée et on commence une nouvelle en allant du dépôt au point de dépassement et ainsi de suite.
- Pour les problèmes HFVRP, on parcourt la tournée depuis le dépôt jusqu'au dépassement

de la capacité tout en explorant toutes les capacités disponibles et en calculant à chaque fois le cout unitaire qui sera généré par chaque découpage. Le découpage permettant de générer le cout de transport unitaire minimale est celui qui est appliqué. Cette démarche est répétée jusqu'au parcourt de la tournée géante.

La Figure V-7 illustre les algorithmes implémentés pour résoudre les problèmes de types CVRP ainsi que les problèmes de type HFVRP en utilisant la démarche « route first cluster second ».

<pre> 1. Route First Cluster Second Procedure For CVRP 2. $V \leftarrow$ the available vehicle type with capacity: cap_v 3. $Custs \leftarrow$ the set of clients to serve 4. $Global_Seq \leftarrow$ the set of customer IDs to serve (initially empty) 5. Initialize $List_Routes$ (set of routes, initially empty) 6. Route $R_g \leftarrow$ GreedyTSP($Custs$) : generate a Giant route using greedy algorithm for TSP 7. $Global_Seq \leftarrow R_g.sequence$ 8. $Seq \leftarrow$ the set of customer IDs to serve (making a route, initially empty) 9. $Cap \leftarrow 0$ 10. For Each i in $Global_Seq$ 11. if ($Cap + Custs(i).Order \leq cap_v$) 12. Add i to Seq 13. $Cap \leftarrow Cap + Custs(i).Order$ 14. else 15. Route $r \leftarrow$ Create a route using Seq 16. Add r to the Set of routes $List_Routes$ 17. $Cap \leftarrow 0$; Re-Initialize Seq 18. $Cap \leftarrow Cap + Custs(i).Order$ 19. Add i to Seq 20. End-If 21. End-For 22. Route $r \leftarrow$ Create a route using Seq 23. Add r to the Set of routes $List_Routes$ </pre>	<pre> 1. Route First Cluster Second Procedure For HFVRP 2. $List_Vehicles \leftarrow$ the set of available vehicle types 3. $Custs \leftarrow$ the set of clients to serve 4. $Global_Seq \leftarrow$ the set of customer IDs to serve (initially empty) 5. Initialize $List_Routes$ (set of routes, initially empty) 6. Route $R_g \leftarrow$ GreedyTSP($Custs$) : generate a Giant route using greedy algorithm for TSP 7. $Global_Seq \leftarrow R_g.sequence$ 8. $Seq \leftarrow$ the set of customer IDs to serve (making a route, initially empty) 9. $List_Seq_veh \leftarrow$ The set of $\langle Sequence, Veh \rangle$ (initially empty) 10. While : $Global_Seq$ is not empty 11. $Cap \leftarrow 0$ 12. For Each veh in $List_Vehicles$ 13. For Each i in $Global_Seq$ 14. if ($Cap + Custs(i).Order \leq veh.capacity$) 15. Add i to Seq 16. $Cap \leftarrow Cap + Custs(i).Order$ 17. else 18. Add $\langle Seq, veh \rangle$ to $List_Seq_veh$ 19. $Seq_added \leftarrow$ True 20. break For loop (line 12) 21. End-If 22. End-For 23. if (! Seq_added) 24. Add $\langle Seq, veh \rangle$ to $List_Seq_veh$ 25. $Seq_added \leftarrow$ False 26. End-If 27. End-For 28. For Each $\langle sequence, veh \rangle$ in $List_Seq_veh$ 29. Route $r \leftarrow$ Create a route using Seq 30. $r.Vehicle \leftarrow veh$ 31. $Unit_cost \leftarrow$ Unit Cost per transported items according to r 32. if ($Unit_cost \leq Unit_cost_min$) 33. $Unit_cost_min \leftarrow Unit_cost$ 34. $\langle Best_Seq, veh_b \rangle \leftarrow \langle sequence, veh \rangle$ 35. End-If 36. End-For 37. Route $r_b \leftarrow$ Create a route using $Best_Seq$ 38. $r_b.vehicle \leftarrow veh_b$ 39. Add r_b to $List_Routes$ 40. $Global_Seq \leftarrow Global_Seq.remove(Best_Seq)$ 41. Re-Initialize $Best_Seq, veh_b$ 42. End-While </pre>
---	---

Figure V- 7 Algorithme « RFCS » pour le CVRP et le HFVRP

V.3.2 Comparaison des performances des heuristiques constructives implémentées pour les problèmes CVRP et HFVRP

Notre objectif est de comparer les performances des différentes heuristiques présentées dans les paragraphes précédents dans le cadre des problèmes des tournées des véhicules à capacité limitée et dans le cadre des problèmes des tournées des flottes de véhicules.

Nous avons mis en place une application permettant de générer aléatoirement à la fois les

coordonnées géographiques des différents clients ainsi que la demande exprimée par chacun de ses clients. Nous avons généré des problèmes dans lesquels la répartition suit une loi normale et aussi des problèmes pour les quel la répartition suit une loi uniforme. Les paramètres d'entrées sont :

- Le nombre de clients.
- La dispersion entre les points dans le cas où la répartition des clients suit une loi Normale (points très rapprochés : petite dispersion ou bien points éloignés : grande dispersion).
- La zone radiale à laquelle appartient l'ensemble des clients par rapport au dépôt (points concentrer entre 0 et $\pi/2$ par rapport au dépôt ou bien réparti entre 0 et 2π).
- La demande des clients par rapport à la capacité disponible (la demande des clients est générée d'une manière aléatoire uniforme entre 0 et une demande maximale qu'on fait varier).

En faisant générer des problèmes ayant des dimensions qui varient entre 4 clients et 1000 clients tout en faisant varier la dispersion des clients, la zone radiale et la demande maximale qui pourrait être exprimée par un client nous avons résolu à chaque fois le problème généré par les trois méthodes et on a calculé le cout global associé à chaque solution fournie par les différentes méthodes.

Dans le cadre des problèmes CVRP, les algorithmes des économies sont plus performants que les algorithmes CFRS et RFCS indépendamment de tous les paramètres mis en jeu, les résultats sont présentés dans les Figures 8-15, l'axe des abscisses représente la dimension d'un problème généré et l'axe des ordonnées représente le cout correspondant aux solutions fournies pour le même problème par les différentes méthodes exécutées.

Dans le cadre des problèmes HFVRP les performances des différentes méthodes ne dépendent pas visiblement de la dispersion des clients ni de la répartition géographique autour du dépôt mais la performance varie en fonction de la demande maximale exprimée par les différents clients. Les Figures 16-23 présentent les différents cas simulés.

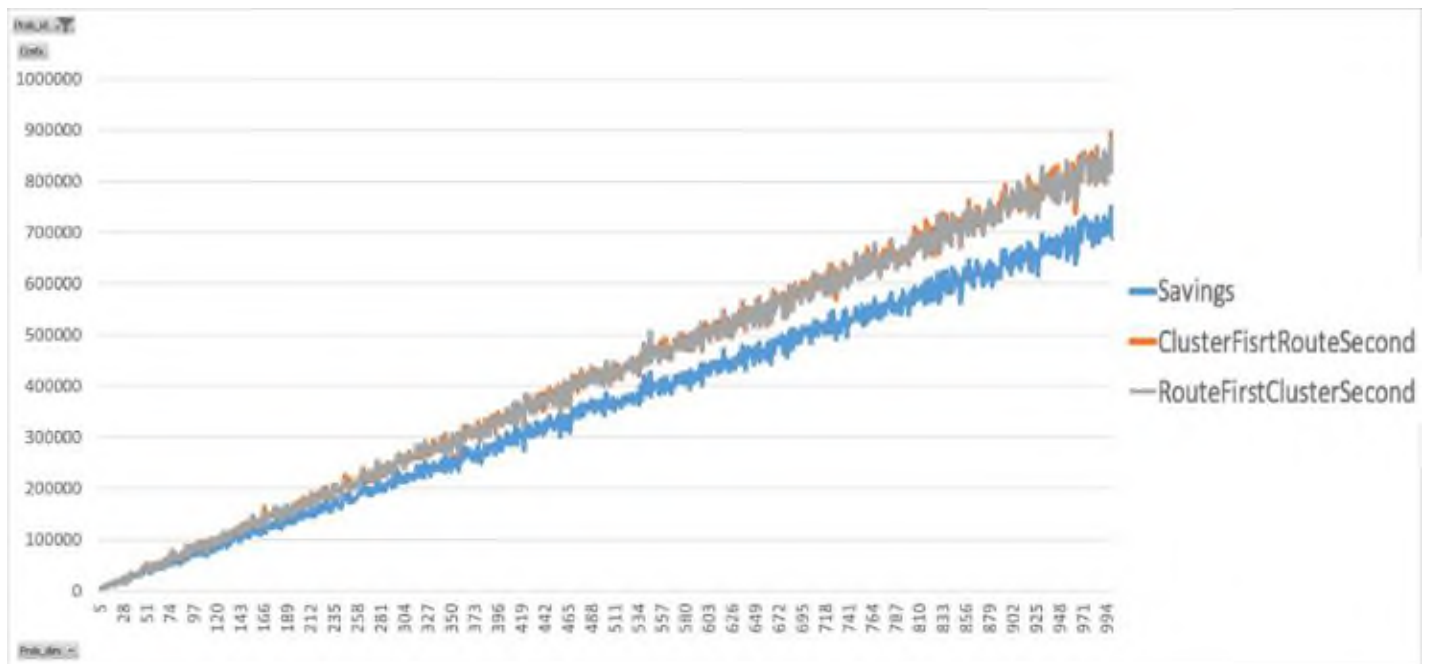


Figure V- 8 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap max disponible et Petite Dispersion, Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

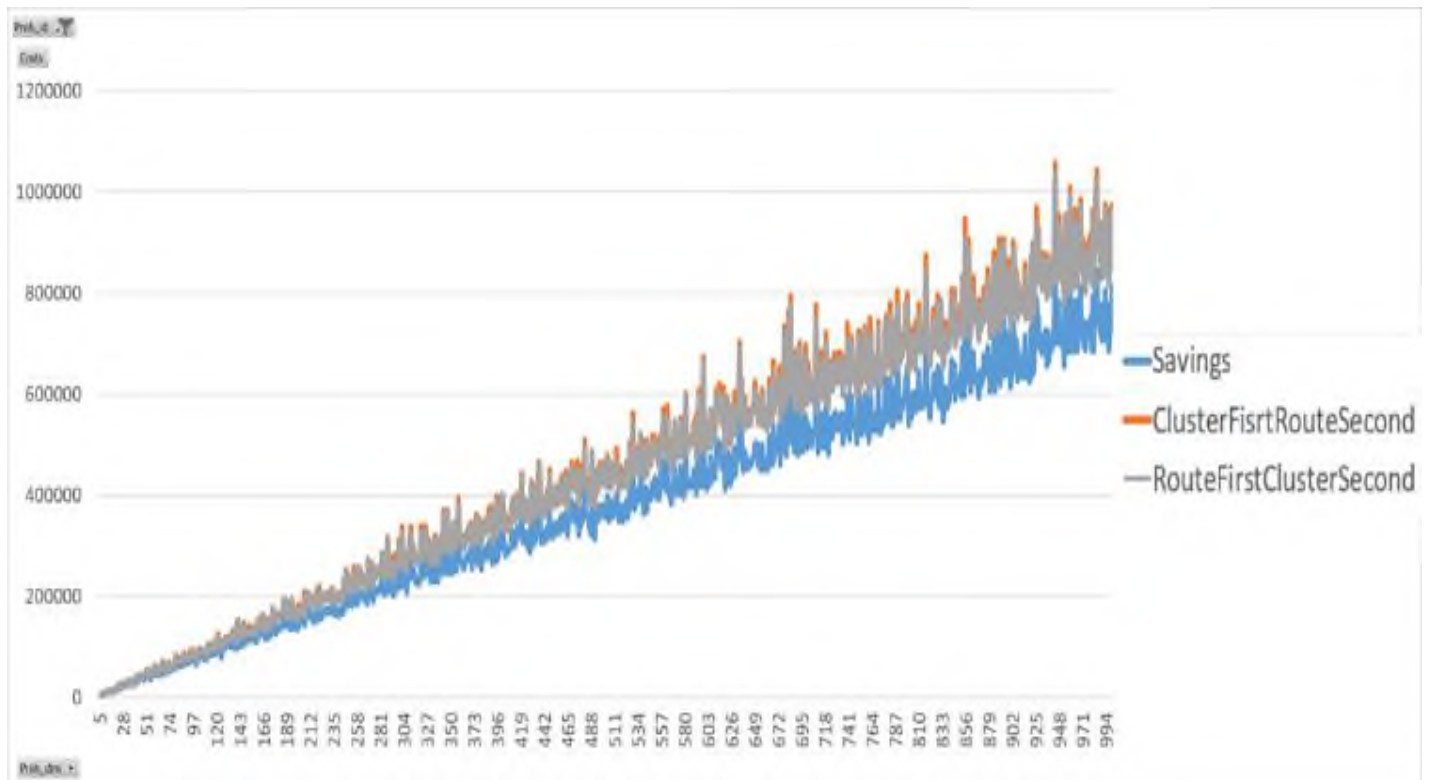


Figure V- 9 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Max disponible et Grande Dispersion, Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

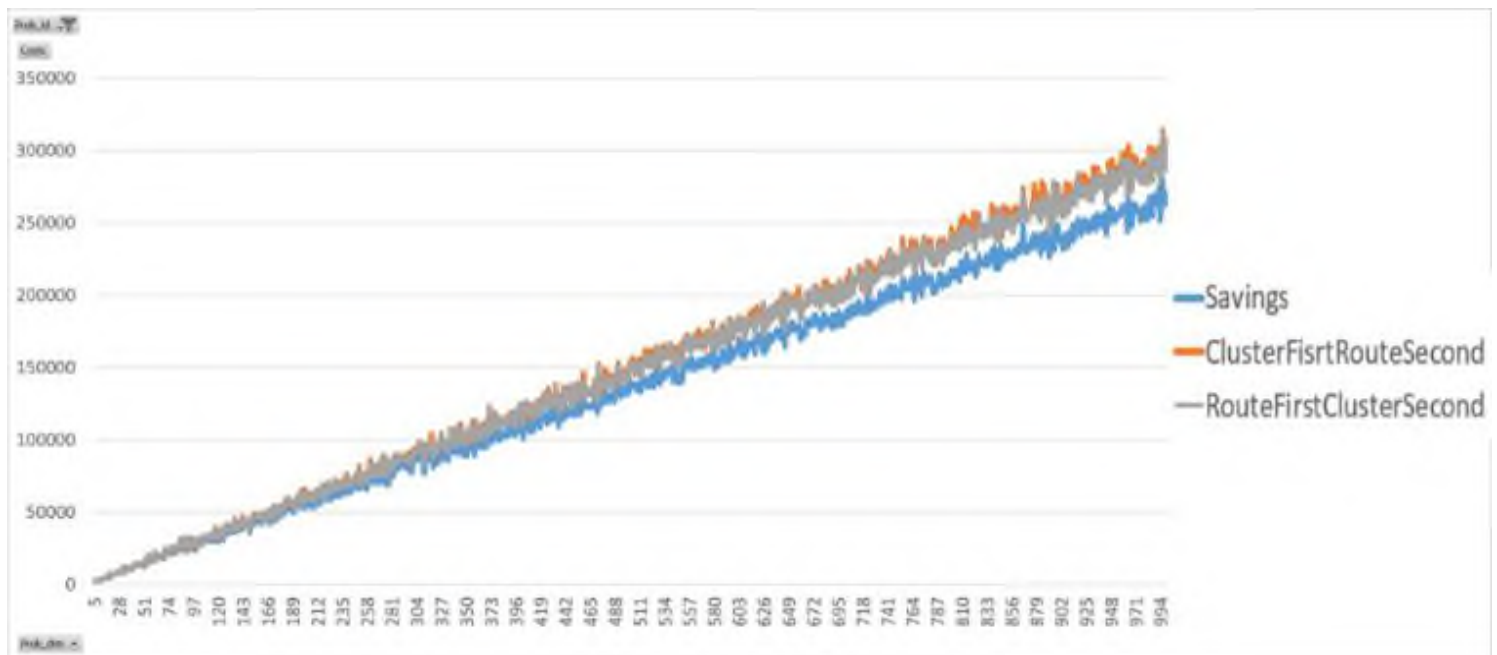


Figure V- 10 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Petite Dispersion, Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

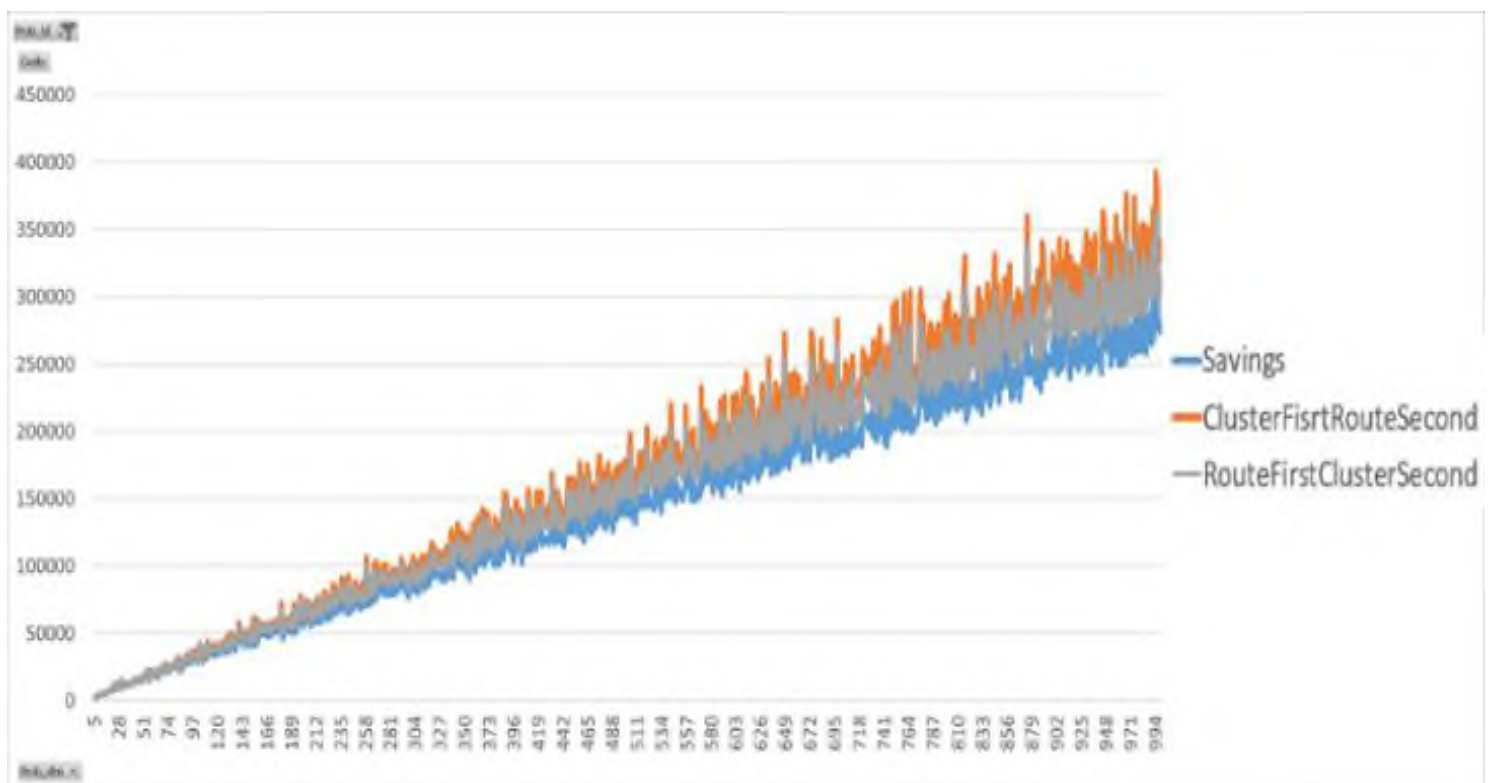


Figure V- 11 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Grande Dispersion, Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

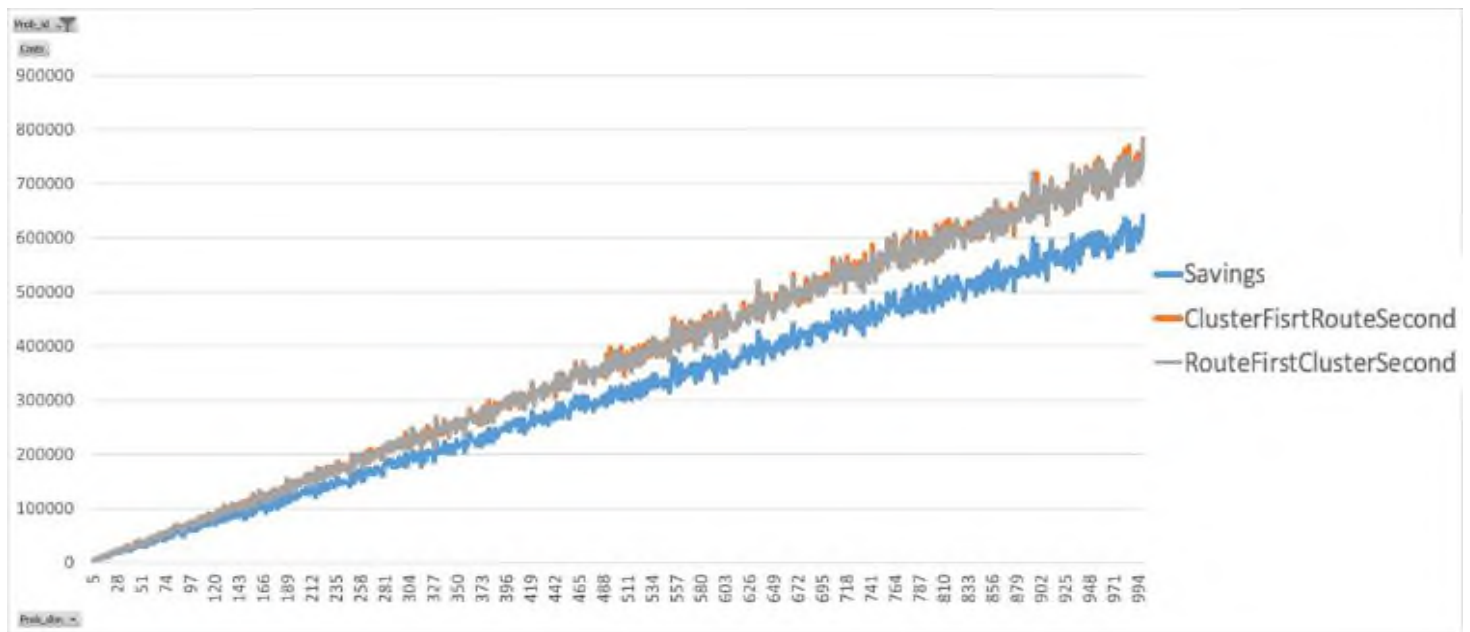


Figure V- 12 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Max disponible, Petite Dispersion
Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

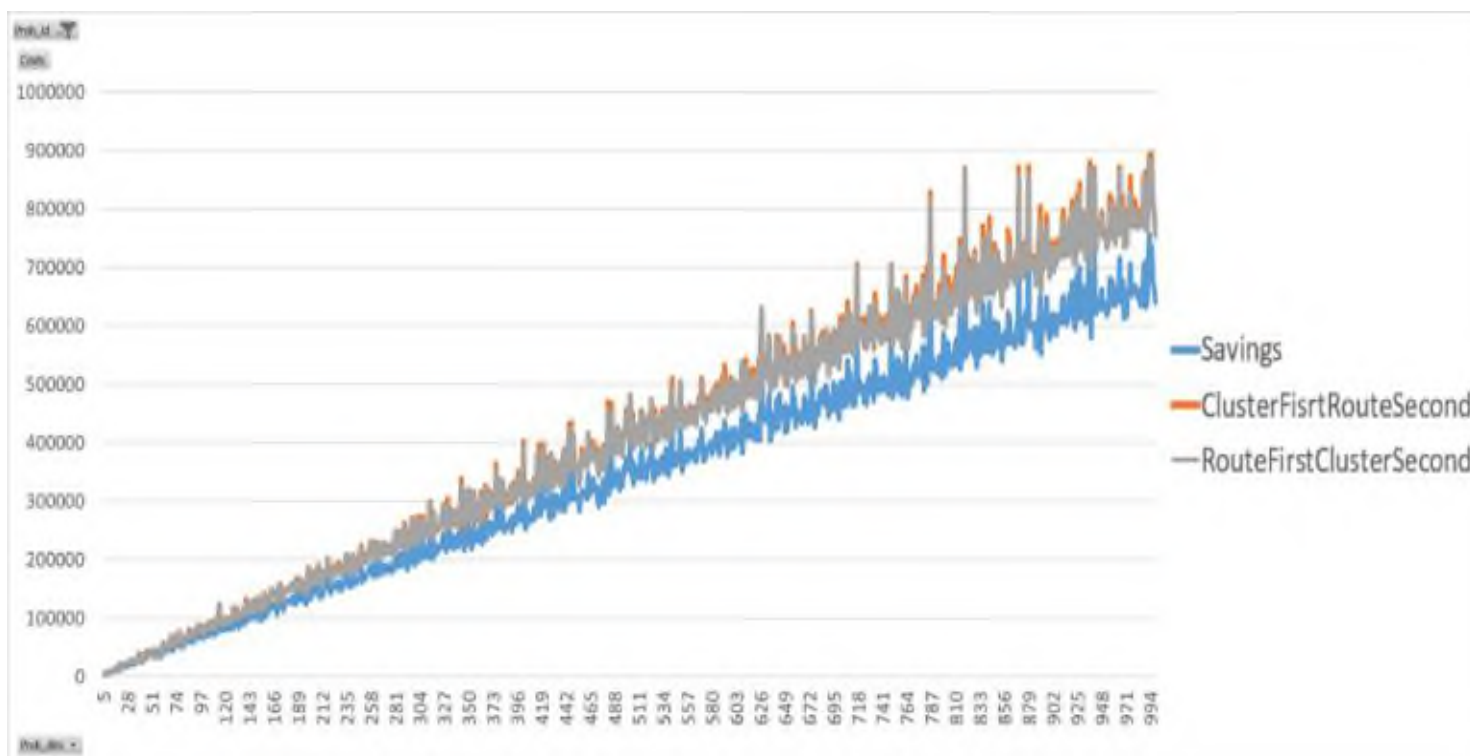


Figure V- 13 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Max disponible, Grande Dispersion et
Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

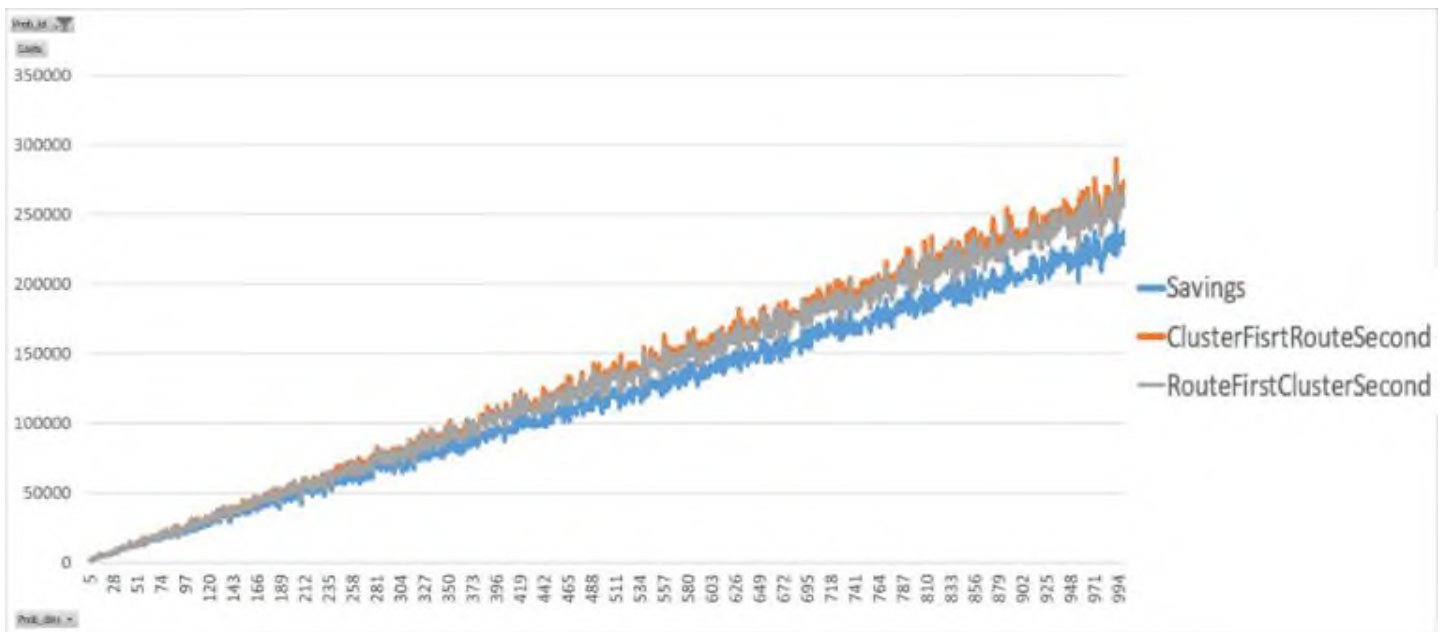


Figure V- 14 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Min disponible, Petite Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

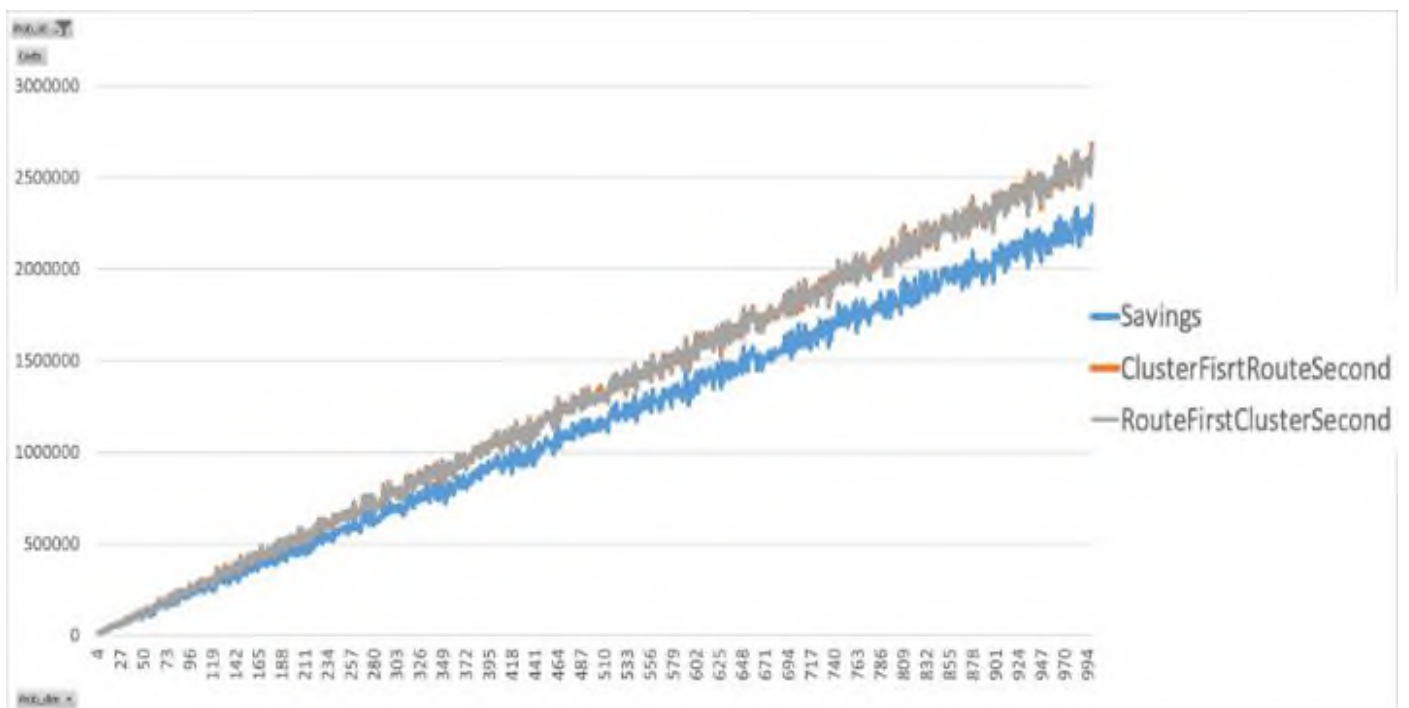


Figure V- 15 résultats de simulations CVRP : Demande Max=Cap Min disponible, Grande Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

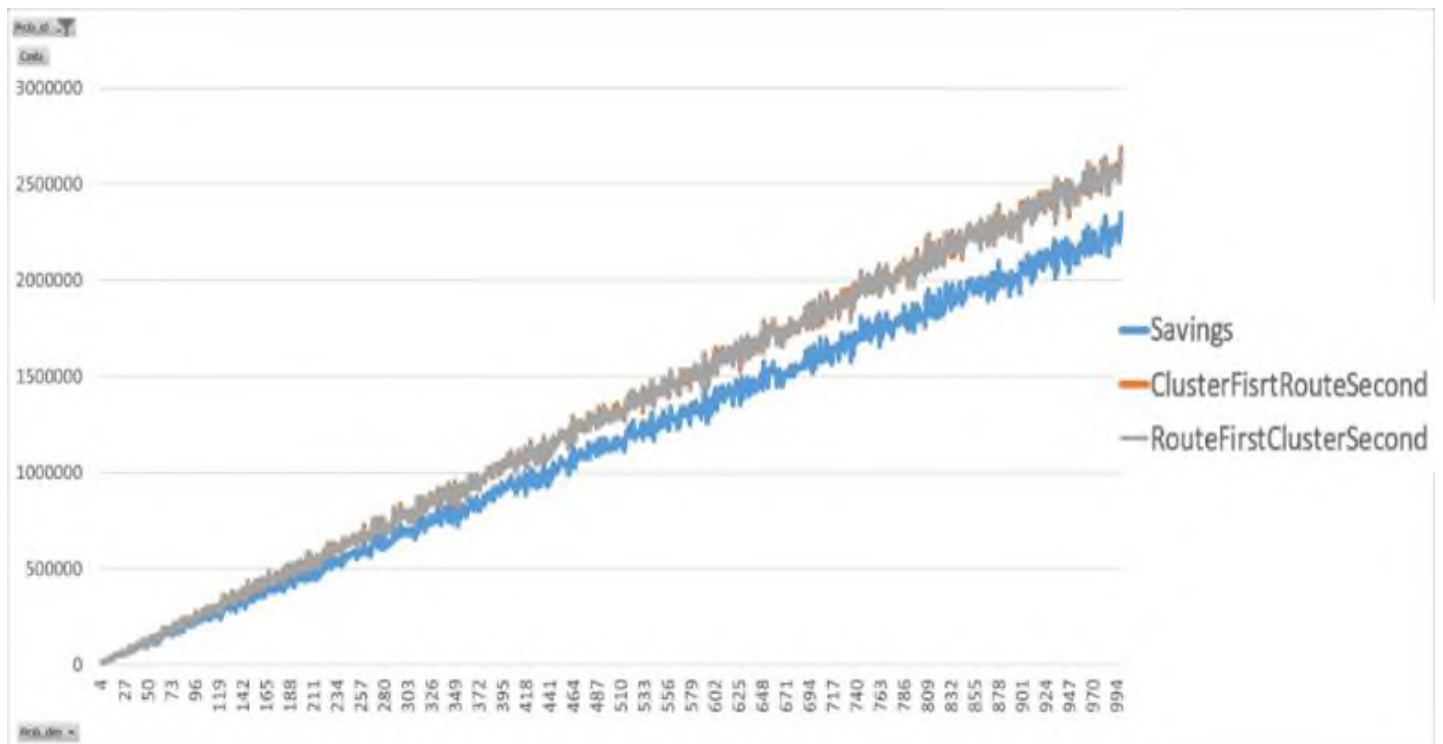


Figure V- 16 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap max disponible et Petite Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

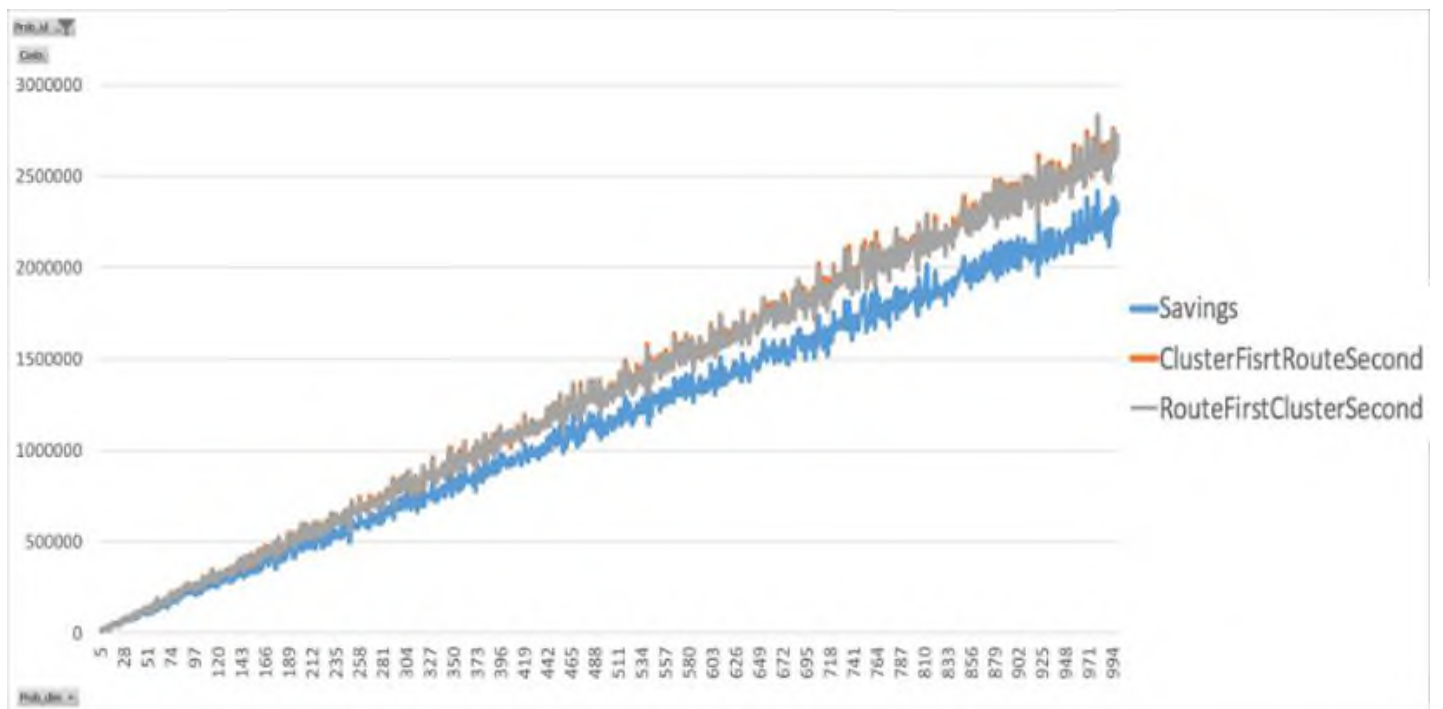


Figure V- 17 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Max disponible et Grande Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

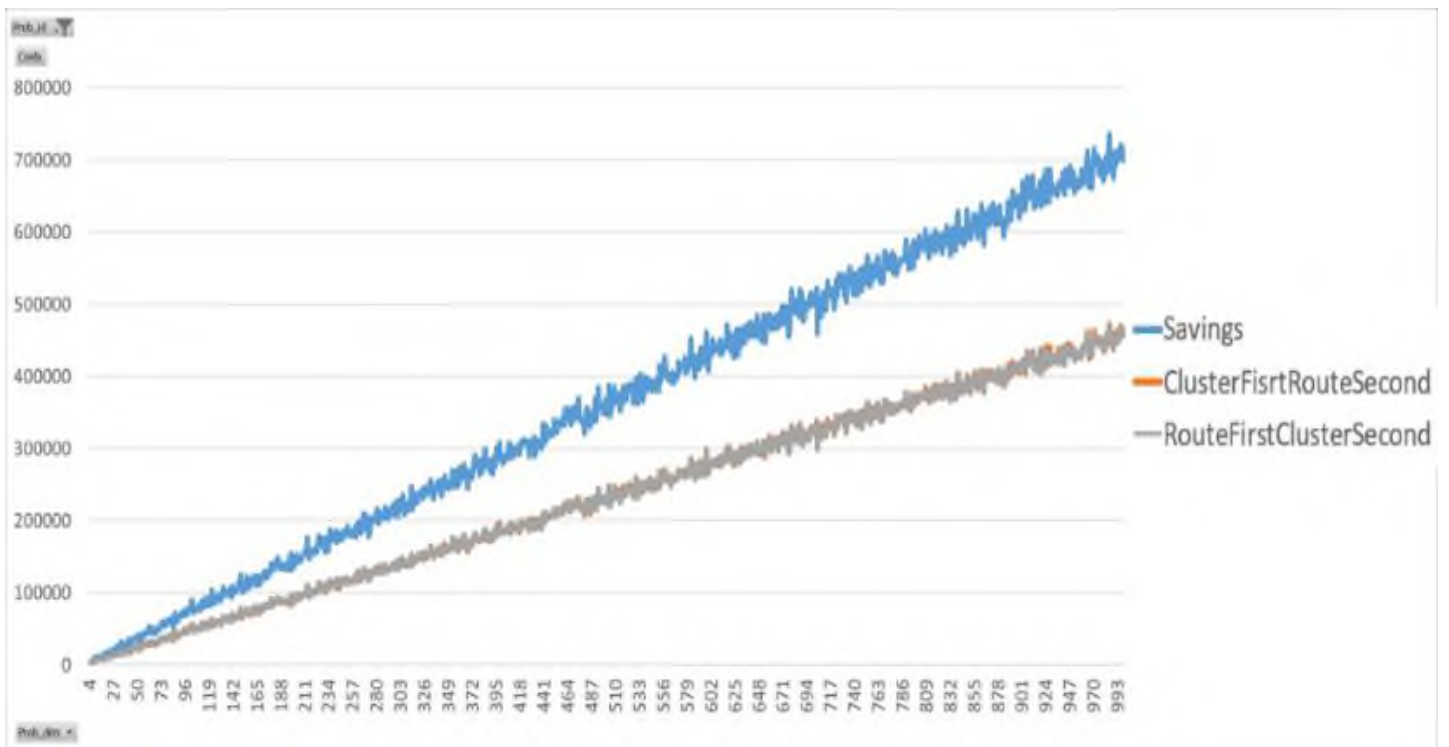


Figure V- 18 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Petite Dispersion
Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

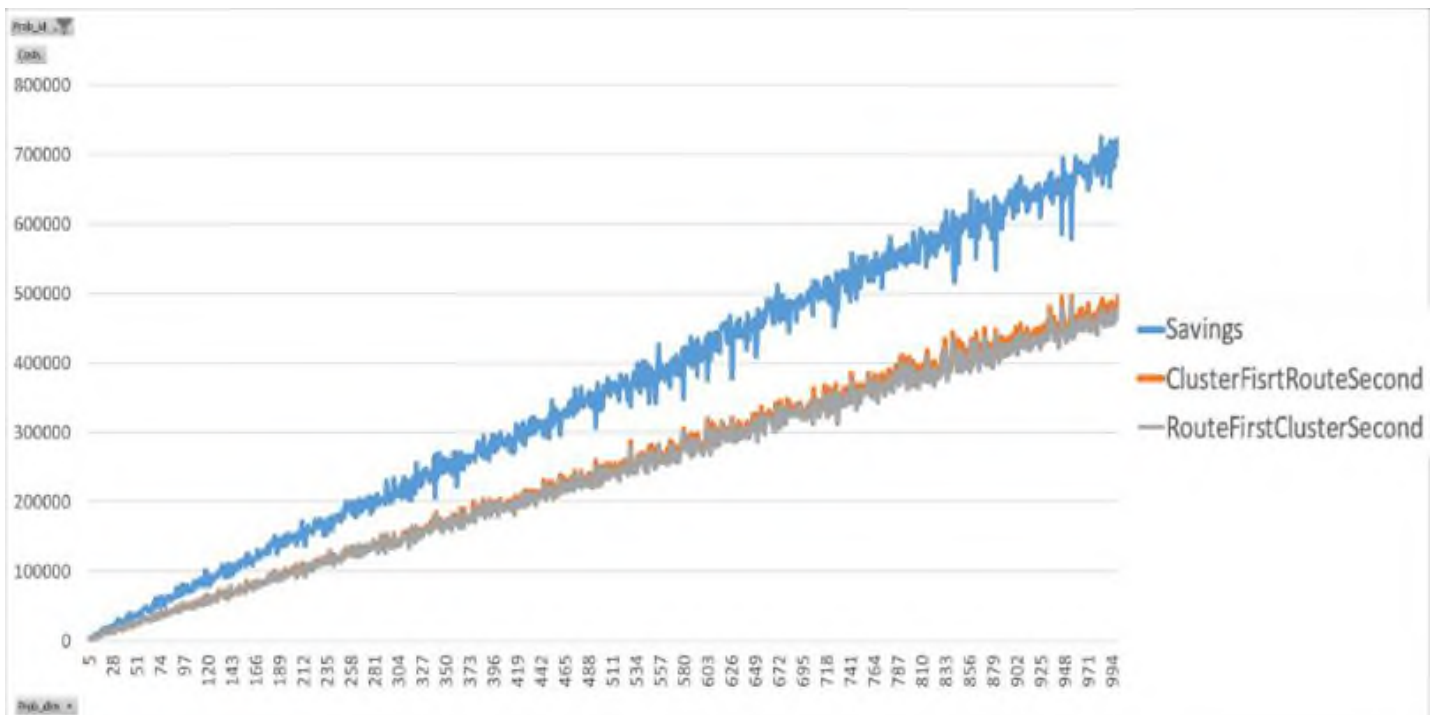


Figure V- 19 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Grande Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et 2π

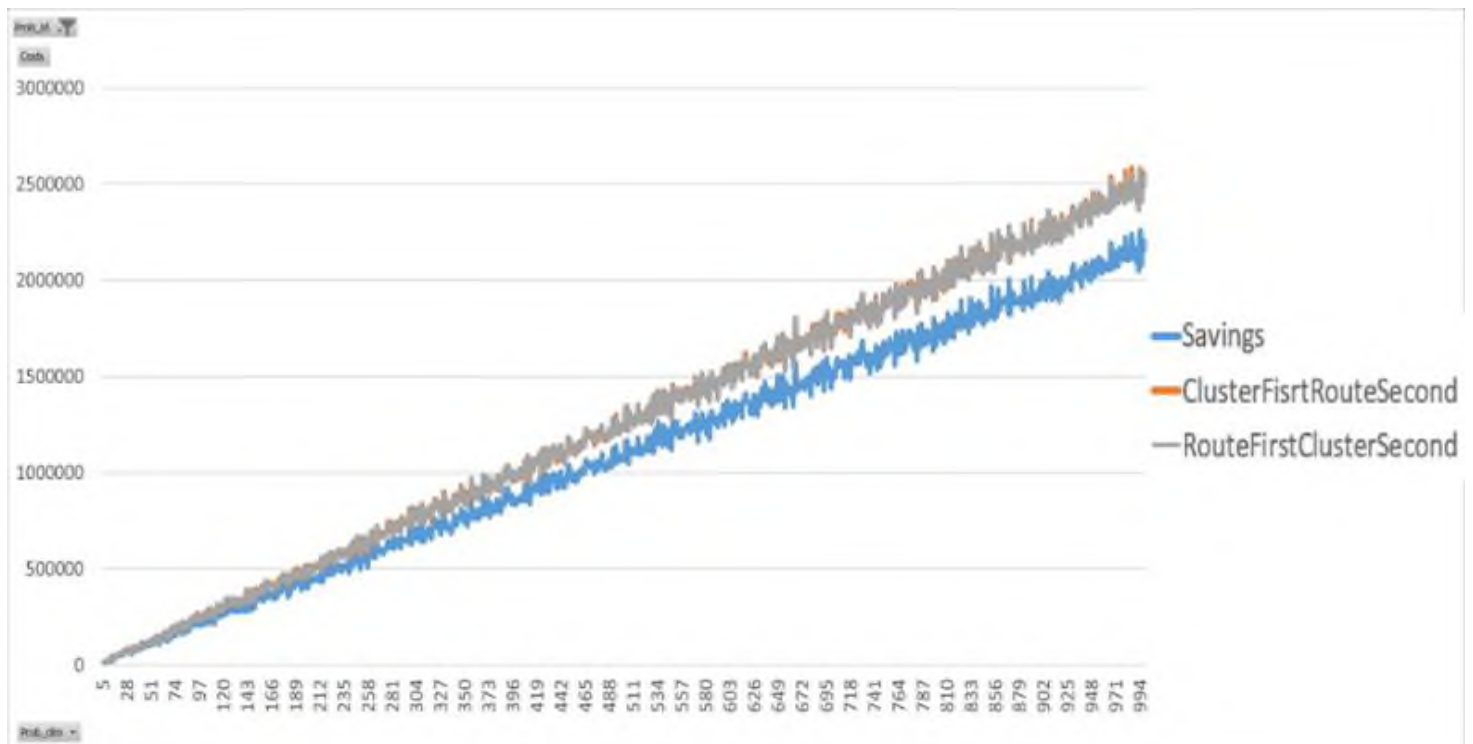


Figure V- 20 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Max disponible et Petite Dispersion
Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

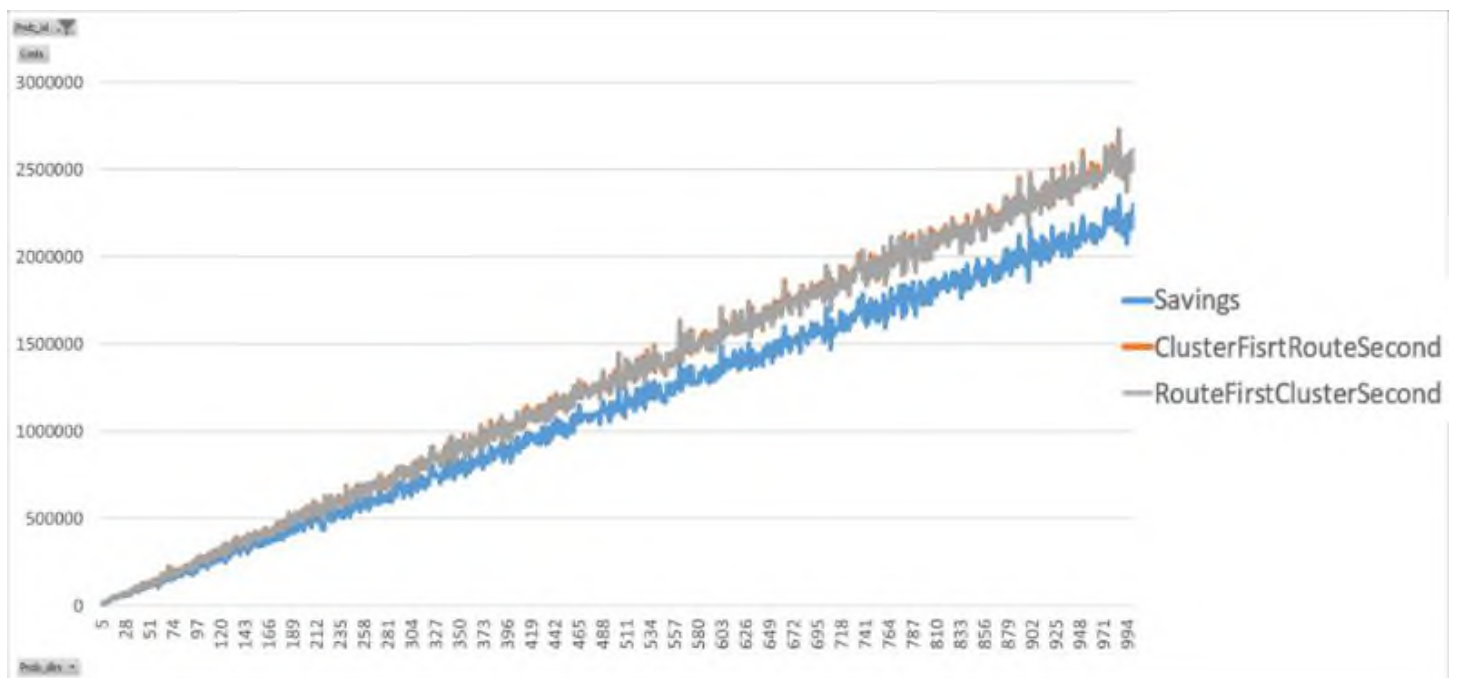


Figure V- 21 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Max disponible et Grande Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

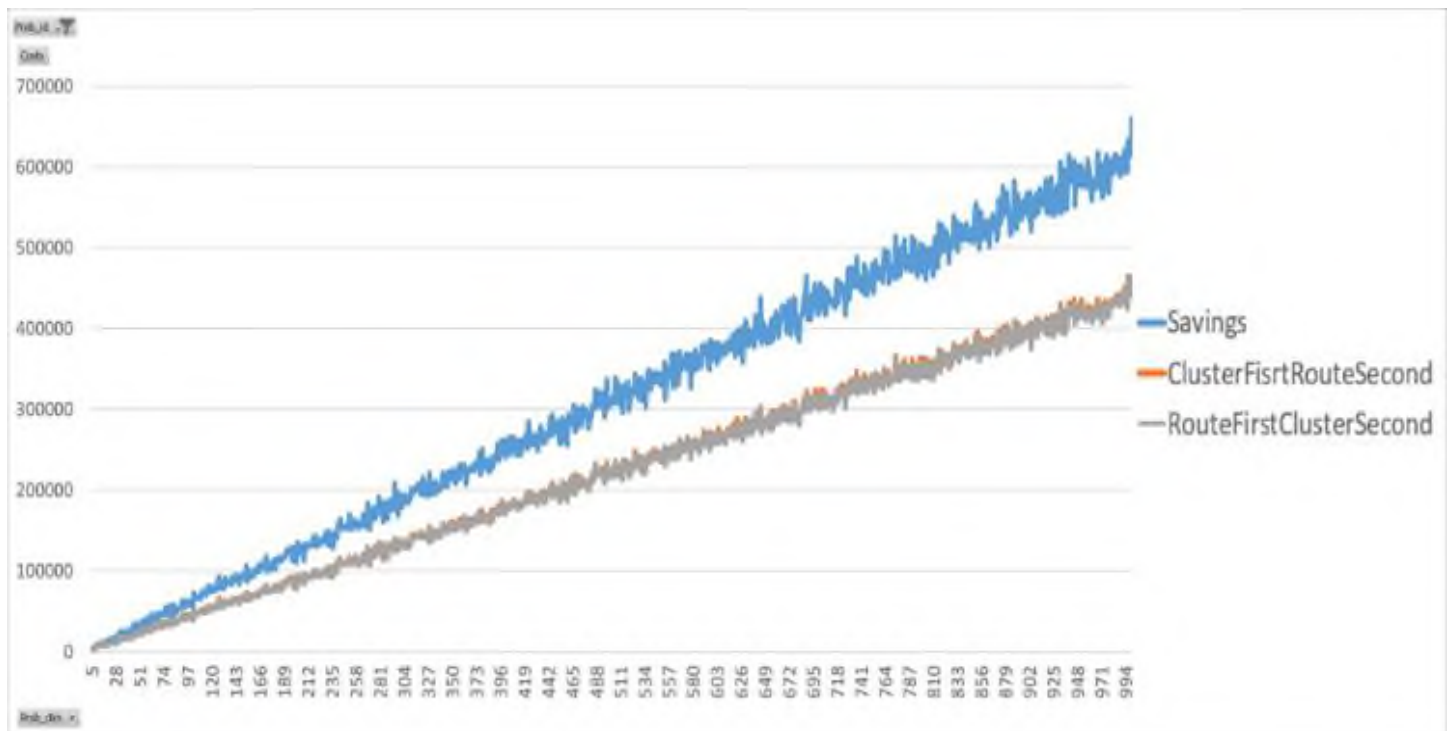


Figure V- 22 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Petite Dispersion
Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

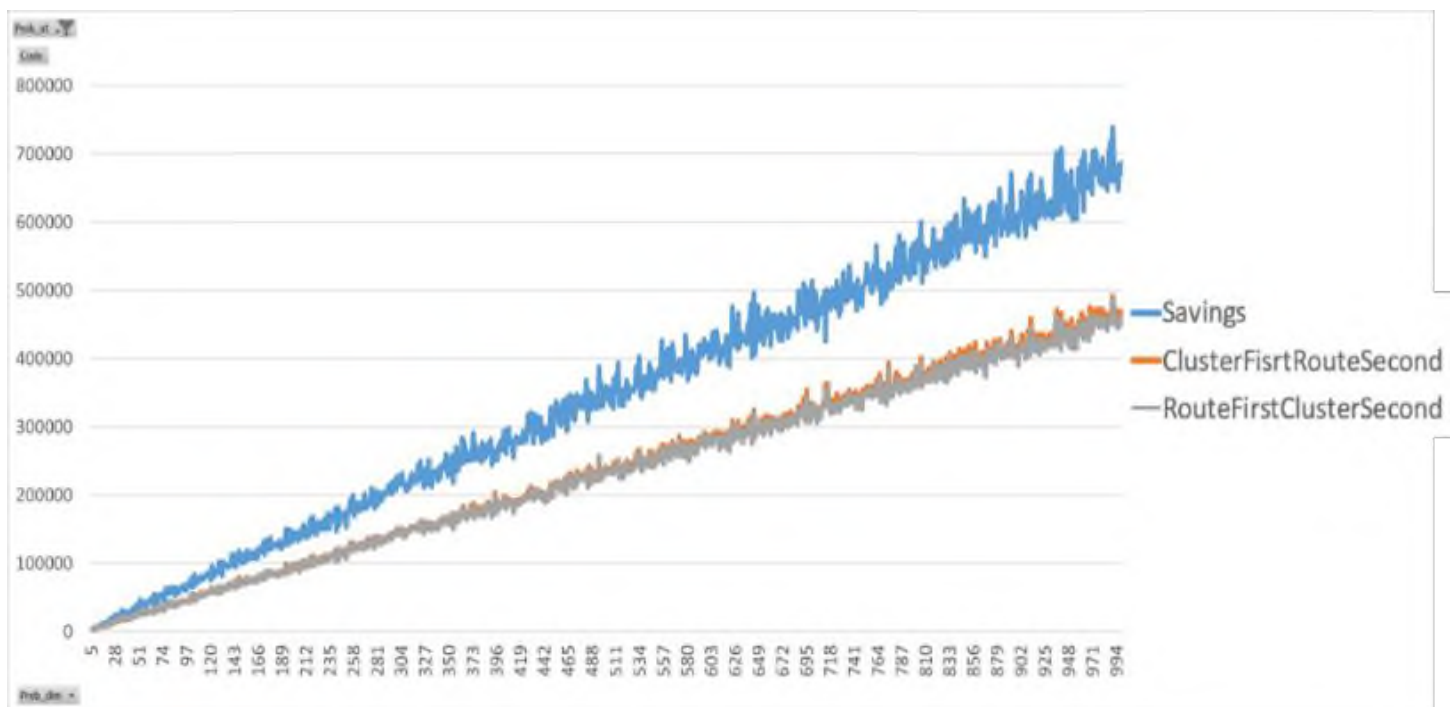


Figure V- 23 résultats de simulations HFVRP : Demande Max=Cap Min disponible et Grande Dispersion et Répartition des points autour du dépôt θ entre 0 et $\pi/2$

On constate que lorsque la demande maximale, que peut exprimer un client, est considérablement petite comparée à la capacité maximale disponible, la méthode des économies fournit des solutions moins bonnes que ceux fournies par la méthode CFRS ou bien ceux fournies par la méthode RFCS dans le cadre de la résolution des problèmes HFVRP.

Pour mieux visualiser ce comportement nous allons faire varier pour chaque dimension donnée n , la demande maximale « demand_max » que peut exprimer un client (la demande est générée aléatoirement entre 0 et demand_max). Le paramètre demand_max varie entre 0 et la capacité maximale disponible (la plus grande capacité offerte par les véhicules disponibles). Les résultats obtenus sont tracés dans la Figure V-24. Cette simulation permet de constater qu'il existe une certaine valeur d_{0_max} inférieure à la capacité maximale des véhicules pour laquelle :

- L'algorithme des économies est plus performant que le CFRS et le RFCS si les demandes des clients sont comprises entre 0 et d_{max} avec d_{max} supérieur à d_{0_max} .
- Les algorithmes CFRS et le RFCS donnent des résultats proches et sont tous les deux plus performants que l'algorithme des économies si les demandes des clients sont comprises entre 0 et d_{max} avec d_{max} inférieur à d_{0_max} .

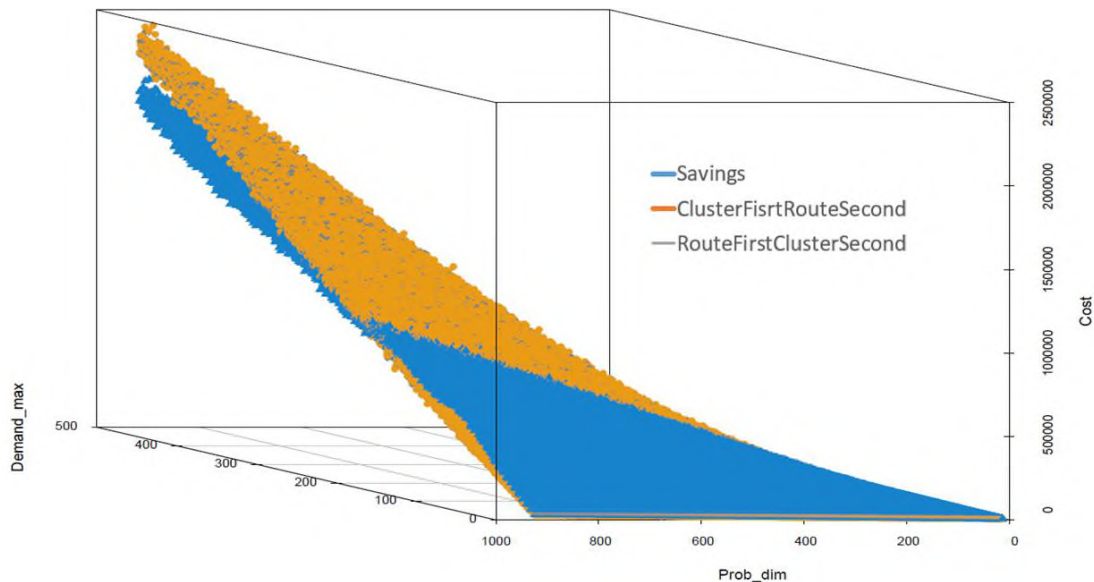


Figure V- 24 l'évolution des couts en fonction de la dimension et de la demande maximale permise

A travers l'implémentation des heuristiques constructives pour les problèmes CVRP et HFVRP et les différentes simulations, nous avons pu constater que pour le problème des tournées de véhicules à capacité limitée (CVRP), l'algorithme des économies est plus performant que l'algorithme « cluster first route second » et celui de « route first cluster second » (tels que

implémentés) indépendamment de tous les paramètres qui était en jeu. D'un autre coté nous avons constaté que, pour les problèmes de tournées des flottes de véhicules (HFVRP), lorsque la demande maximale que peut exprimer les différents clients est considérablement petite comparée à la capacité maximale disponible, la méthode des économies fournit des solutions moins bonnes que ceux fournies par les deux autres méthodes et l'inverse lorsque la demande maximale des clients se rapproche de la capacité maximale disponible.

V.4 Le Modèle MLRP

Nous introduisons dans ce paragraphe le MLRP en tant que méthode permettant de déterminer les besoins de la production et de la logistique amont (relative aux composants et matières premières) et la logistique avale (relative à la distribution) en prenant en considération les demandes clients, la nomenclature restructurée (structure de composition du produit fini adaptée au MLRP), les délais de livraison (de transport et de production), les dimensions et poids des composants, le volume et le poids maximal des moyens de transport disponibles et les coûts de transport par voyage. Le modèle MLRP prendra également en charge la planification des tournées de véhicules correspondantes à la distribution et au réapprovisionnement. Le modèle prend en considération également les capacités liées aux unités de production qu'elles soient internes ou chez les fournisseurs. Nous allons utiliser la même nomenclature restructurée présentée précédemment ainsi que le générateur de nomenclature adaptée au MLRP en vue de créer la nomenclature pas à pas depuis le niveau le plus haut (produit fini) jusqu'au niveau le plus bas des composants.

La Figure V-26 illustre l'algorithme implémenté dans le cadre du MLRP, cette figure décrit la première phase du MLRP : la détermination des ordres de fabrications, d'approvisionnement et de transport. En allant du niveau le plus haut de la nomenclature (produit fini) vers le niveau le plus bas et pour chaque composant d'un niveau donné on parcourt toutes les périodes faisant partie de l'horizon de planification en calculant le besoin net du composant i du niveau l en fonction du besoin brute en ce composant et du stock disponible relatif à ce dernier. Le besoin brut est calculé sur la base du plan directeur de production pour le produit final et calculé en multipliant le coefficient de montage et le besoin brute du composant père pour un composant autre que le produit final.

Une fois le besoin net pour une période donnée est calculé, on détermine la date de lancement de l'ordre de fabrication ou d'approvisionnement en fonction des délais de livraison relatifs à

la production et à la logistique et on fixe la quantité commandée pour cette période.

Si la quantité commandée est supérieure à la capacité de production du composant en question, on attribue l'excédent à une période antérieure, Si cette période (antérieure) est déjà concernée par une quantité de production on additionne les deux quantités et dans le cas où il y a dépassement de capacité on l'attribue à une autre période antérieure et ainsi de suite. Si on atteint des périodes antécédentes à t_0 , la solution n'est pas faisable. Une fois les ordres d'approvisionnement arrêtés pour tous les composants sur l'horizon de planification, on détermine pour chaque composant i du niveau l et pour toutes les périodes de l'horizon de planification les dates de lancement des ordres de transport en ajoutant aux dates de lancement de fabrication/ approvisionnement les délais de production associés. La figure V-25 illustre un exemple de calcul des dates de lancement de la production/Approvisionnement et des dates de lancement des ordres de transport ainsi que les quantités des différents ordres.

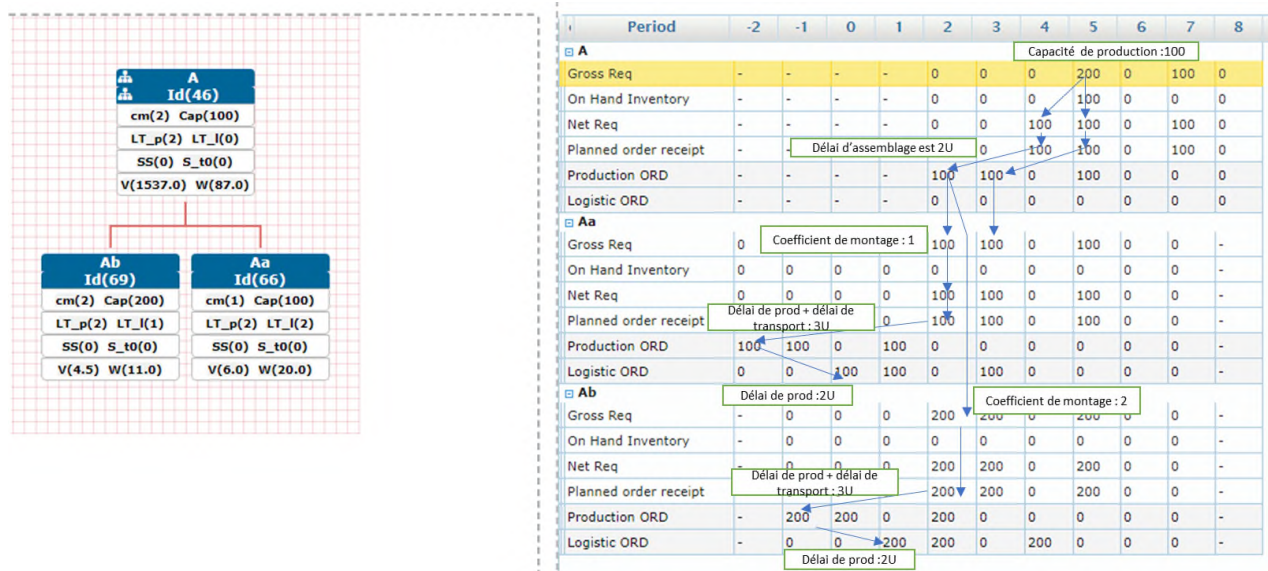


Figure V- 25 Exemple de calcul des ordres production et de transport

Une fois les ordres de transport arrêtés, le MLRP planifie pour chaque période faisant partie de l'horizon de planification, les tournées de véhicules nécessaires pour la logistique amont (récupération de matière première et/ou composants) et pour la logistique aval (distribution de produits finis) en faisant exécuter les trois heuristiques constructives exposées dans le paragraphe précédent et en choisissant la solution la moins couteuse des trois solutions trouvées par les algorithmes des économies, du CFRS et du RFCS. La figure V-27 illustre la deuxième partie de l'algorithme implémenté dans le cadre du MLRP (la planification des tournées de véhicules).

Pour la planification des transports relatifs à la distribution on détermine d'abord la capacité des différents véhicules en fonction des dimensions du produit finis et du volume et poids que le véhicule peut supporter.

Pour la planification des transports relatifs aux approvisionnements, si les éléments à transporter sont différents en termes de volumes et/ou poids nous déterminons une relation d'équivalence entre chaque élément et l'élément qui a la masse volumique la plus petite puis nous transformons les besoins de transport en fonction de la relation d'équivalence déterminée. La capacité des différents véhicules est calculée sur la base du volume disponible et du poids maximal que le véhicule peut transporter ainsi que des dimensions de l'élément qui a la masse volumique la plus petite.

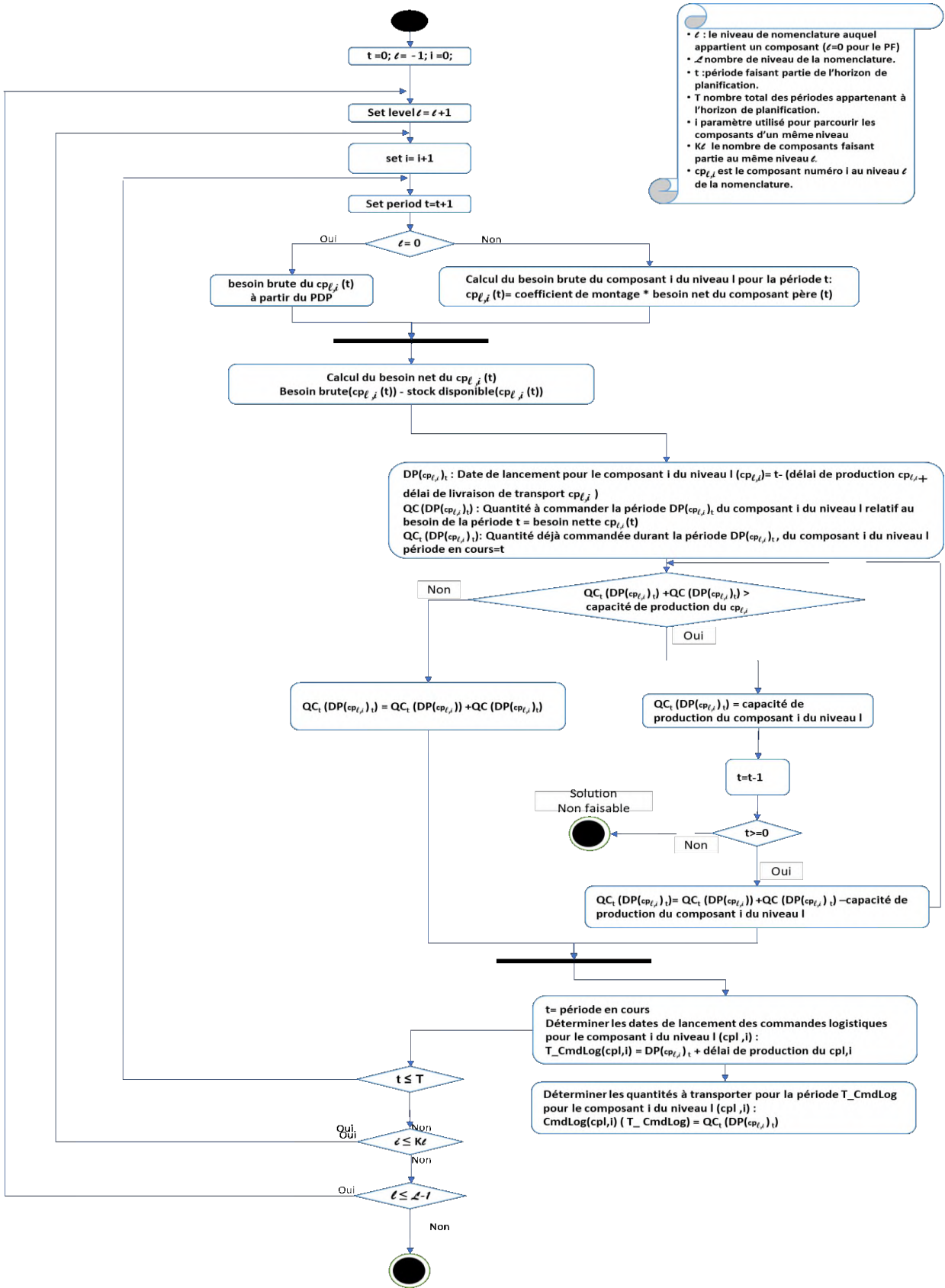


Figure V- 26 L'algorithme MLRP (calcul des ordres de production et de transport)

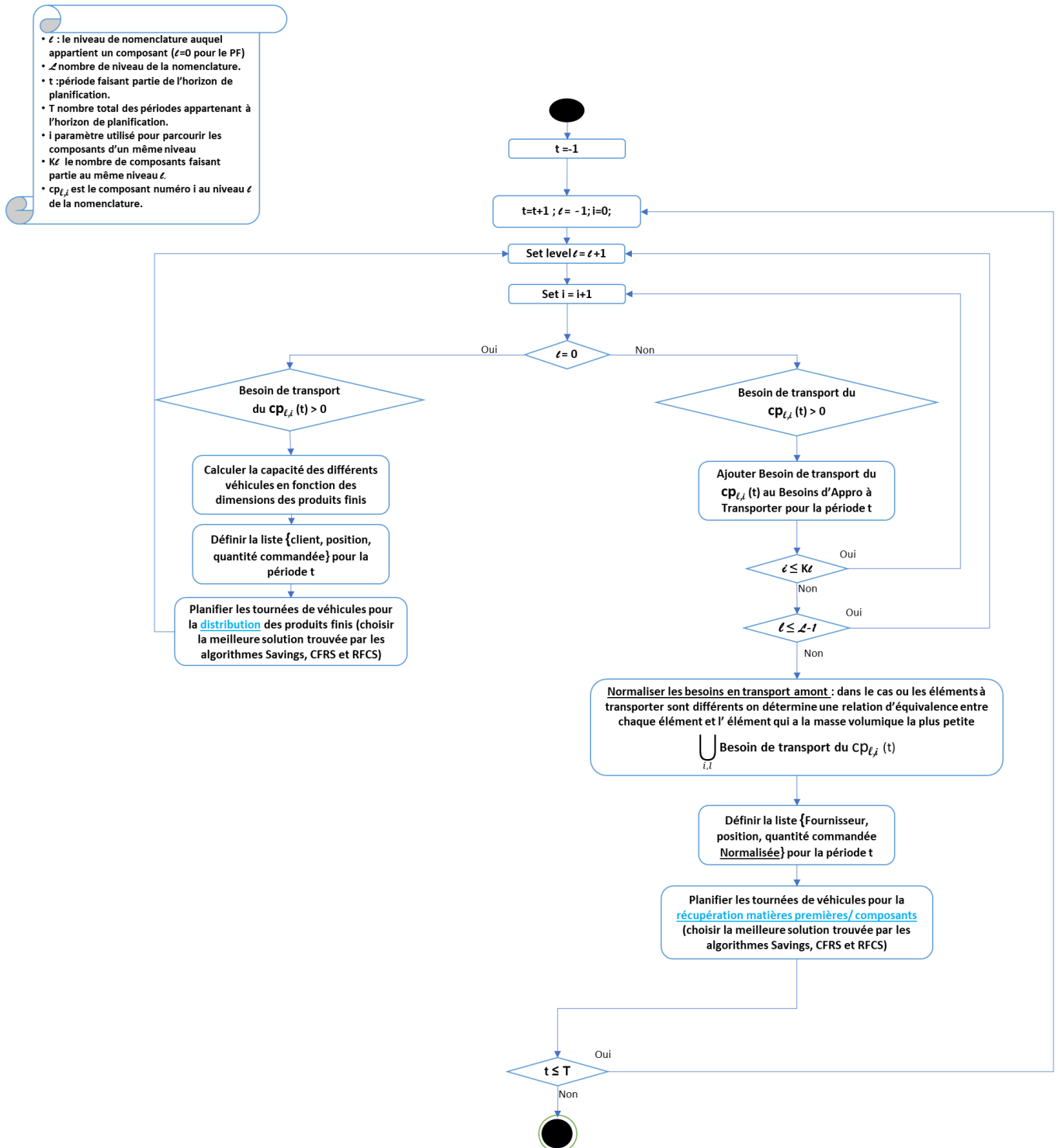


Figure V- 27 L'algorithme MLRP (planification des tournées de véhicules)

V.5 Conclusion

Nous avons introduit dans ce chapitre une nouvelle méthode de planification intégrée de la production et de la logistique, ainsi nous avons présenté les deux algorithmes MLRP, le premier permettant de déterminer les ordres d'approvisionnement, de fabrication et de transport en fonction des demandes clients, de la nomenclature restructurée (structure de composition du produit fini adaptée au MLRP) et des délais de livraison (de transport et de production). Le deuxième algorithme permet de planifier les tournées de véhicules pour le ramassage des matières premières/composants et pour la distribution des produits finis en prenant en considération les dimensions et le poids des composants, le volume et le poids maximal des moyens de transport disponibles et les coûts de transport par voyage ainsi que la répartition géographique des fournisseurs et des clients. Nous avons développé également dans ce chapitre des algorithmes relatifs aux heuristiques constructives permettant de planifier les tournées des flottes de véhicules hétérogènes puis nous avons comparé la performance de ces heuristiques constructives (en termes de meilleures solutions trouvées) en effectuant des milliers de simulations.

**Chapitre VI : SMLRP, outil de la planification
intégrée de la production et de la logistique -
Modélisation de l'outil et étude de cas**

VI.1 Introduction

Ce chapitre présente un outil de planification intégrée de la production et de la logistique, le SMLRP « Solver for Manufacturing and Logistic Requirement Planning », Cet outil vise à informatiser le modèle présenté dans le chapitre précédant afin de faciliter la planification des besoins de production et de la logistique au sein des chaînes logistiques.

Après une introduction du langage de modélisation UML, nous introduisons dans un premier lieu les spécifications et les fonctions escomptées par le SMLRP, nous présentons ensuite les diagrammes des cas d'utilisation et un diagramme de séquence associé à cet outil.

Nous présentons en deuxième lieu un cas d'étude industriel afin de démontrer l'applicabilité du modèle proposé dans le chapitre précédent. Il s'agit de la planification de la production et de la logistique amont et aval pour une entreprise de fabrication des transpalettes manuels peseurs. Nous déroulons les différentes étapes de la démarche depuis l'introduction des éléments de la nomenclature jusqu'à la génération des ordres de production et de transport ainsi que la génération des tournées de véhicules pour la distribution du produit fini et pour l'approvisionnement en matières premières et/ou composants.

VI.2 Modélisation d'un système d'information

VI.2.1 Les méthodes de modélisation des systèmes d'information

VI.2.1.1 La modélisation

L'objectif principal de la modélisation est la description précise, efficace et compréhensible des systèmes. Un système est défini en tant qu'un ensemble d'éléments, ayant chacun une fonctionnalité particulière, qui s'interagissent de telle sorte à ce qu'ils soient perçus en tant qu'une seule unité qui réalise une tâche ou une fonction précise. La notion de modèle est utilisée dans plusieurs disciplines (mathématiques, économies, psychologie, ...), cette notion est dérivée du latin « modulus » qui désigne l'élément le plus simple (constituant unitaire) d'une architecture répétitive (Seidl et al., 2015).

Hebert Stachowiak (Stachowiak, 1973) introduit les principes qui caractérisent sa théorie générale des modèles :

- Mapping : un modèle est toujours une image, une représentation de quelques choses.
- Réduction : un modèle ne représente pas toujours tous les attributs de l'objet modélisé, il représente ceux qui semblent pertinents pour la personne/l'utilisateur qui a modélisé.

- Pragmatisme : un modèle doit être réalisé et utilisé pour un objectif spécifique.

Les modèles permettent de réduire la complexité des systèmes en représentant uniquement les fonctionnalités utiles et en combinant plusieurs vues afin d’avoir une vue d’ensemble complète. (Selic, 2003) fournit cinq caractéristiques qui déterminent la qualité d’un modèle :

- L’abstraction : le modèle doit avoir un niveau d’abstraction suffisant permettant de comprendre le système en sa globalité.
- Compréhensibilité : le modèle doit permettre une meilleure compréhensibilité tout en réduisant l’effort intellectuel requis pour comprendre le système en sa globalité.
- Précision : le modèle doit représenter, avec un degré de précision suffisant, les propriétés du système modélisé en reflétant la réalité.
- Prédicativité : le modèle doit permettre de prévoir le comportement du système modélisé (en fonction des entrées ou bien des états du système).
- Rentabilité : la modélisation du système doit être moins coûteuse que la création du système.

Selon l’utilisation des modèles, (Finger et Dixon, 1989) distinguent deux types de modèles, les modèles descriptifs qui représentent une partie ou l’ensemble du système permettant de faciliter la compréhension d’un ou plusieurs aspects et les modèles de perspectives qui permettent de fournir un mode de construction du système modélisé.

VI.2.1.2 Les méthodes de modélisation d’un système d’information

Le système d’information d’une entreprise ou d’un organisme est considéré comme le support du flux informationnel produit par le fonctionnement de l’organisme à l’occasion de son activité interne et ses interactions avec son environnement.

Plusieurs approches de modélisation des systèmes d’information ont vu le jour ces dernières décennies, (Bouhaddou, 2015) cite :

- Les approches cartésiennes pour lesquels le comportement du système est déduit du comportement de ses éléments internes. Parmi ces approches :
 - Réseaux de files d’attente qui est une méthode qui a vu le jour avec la recherche opérationnelle (Gelembe, 1982), cette méthode est utilisée pour la gestion des flux de matières et elle est appliquée en industrie et en service. Cette méthode n’est pas appropriée pour les systèmes d’informations qui intègrent des mécanismes de décision coopératifs

(Benaissa, 2008).

- Réseaux de pétri, conçu au départ pour l'étude des systèmes de communication par ordinateurs (Petri, 1962) et utilisé par la suite pour les systèmes de production, il est utilisé pour la modélisation des systèmes à événements discrets ainsi que les systèmes à fonctionnement séquentiel. Parmi ses caractéristiques principales, sa capacité de représentation de l'aspect dynamique d'un système (Monteiro, 2001).
- SADT (Structured Analysis Design Technique) est une méthode de modélisation et d'analyse détaillée des processus, basée sur un langage graphique (Ross, 1977). Cette méthode est basée sur deux formalismes, les datagrammes (diagrammes de données) et sur les actigrammes (diagrammes d'activités et décomposition hiérarchique des activités : diagrammes de niveaux inférieurs). Le SADT ne prend pas en considération l'aspect dynamique des systèmes (Santarek et Buseif, 1998).
- Les approches systémiques qui se basent sur l'analyse des flux et l'interaction des systèmes, ils regroupent les fonctionnalités du système afin d'avoir une vue globale de ce dernier. Parmi ces approches :
 - MERISE ayant comme objectif la conception et la mise en place des systèmes d'information d'entreprises, cette méthode se base sur la séparation des données et des traitements en utilisant deux formalismes : le MCD (Modèle Conceptuel des Données) et le MCT (Modèle Conceptuel des Traitement) (Dionisi, 1995).
 - CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) est une démarche qui comprend un cadre de modélisation et une plateforme d'intégration. Le cadre de modélisation est appelé « cube CIMOSA » composé de trois axes qui sont l'axe des généricités (générique, partiel et particulier), l'axe des modèles (cahier des charges, spécification et implémentation) et l'axe des vues (fonctions, ressources, information et organisation) (Vernadat, 1999).
 - PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) est une démarche fondée par le Purdue Consortium en 1994 pour la conception des systèmes industriels de grandes tailles (Williams, 1994), il s'agit d'une architecture en couches qui permet de modéliser les aspects fonctionnels et informationnels d'un système.
- L'approche multi-agents est une approche qui est considérée comme une évolution de l'approche systémique qui se focalise sur les interactions des systèmes, elle se base sur l'intelligence artificielle distribuée où l'expertise est distribuée sur un ensemble d'agents

(capables d'agir sur eux même et sur leur environnements) communiquant entre eux pour réaliser un objectif (Huhns, 1987).

- Les approches orientées objet consistent à représenter le système par un ensemble d'objets communiquant entre eux afin de réaliser un objectif. Le langage UML est l'une des méthodes, orientées objet, les plus connues et le plus utilisées dans le domaine de modélisation des systèmes d'information. De nos jours UML est devenu un langage universel qui permet d'exprimer visiblement une solution objet en limitant les ambiguïtés et les incompréhensions (Bendriss, 2009). Cette approche sera utilisée pour la conception du système proposé dans le cadre de cette thèse. Elle sera détaillée dans le paragraphe suivant.

VI.2.2 Le langage de modélisation unifié : UML

VI.2.2.1 L'approche orienté objet

Un objet représente une idée, un concept ou toute entité du monde physique (personne, client, voiture, ...), il possède une structure interne, un comportement et interagit avec d'autres objets. L'approche orientée objet correspond à la manière avec laquelle on perçoit le monde réel (Seidl,2015).

Il n'existe pas une seule définition de l'approche orientée objet, toutefois il y' a un consensus sur les éléments qui caractérisent cette approche. Ces éléments sont (Seidl,2015) :

- Les classes qui sont une forme d'abstraction regroupant les attributs et le comportement des objets associés, exemple la classe Etudiant peut avoir comme attributs : nom, prénom, niveau, et peut avoir comportements comme s'inscrire, assister à un cours, passer un examen, ...
- Les objets sont les instances de classes, ils s'agissent de la forme concrète des classes associées, exemple l'étudiant E1 est une instance de la classe Etudiant qui a sa propre identité et un état qui peut changer suite à la modification des propriétés de l'objet lui-même.
- L'encapsulation est la protection contre le changement/accès non autorisé des propriétés d'un objet.
- L'héritage est un mécanisme de création de nouvelles classes à partir de classes existantes. Dans ce cas, une classe qui est créé à partir d'une autre classe hérite toutes les propriétés et les fonctionnalités de la classes mère, elle peut en plus avoir d'autres attributs

/fonctionnalités ou bien modifier le comportement d'une fonctionnalité.

- Le polymorphisme est la capacité d'avoir plusieurs formes, ce concept consiste à fournir une interface unique à des entités pouvant avoir différents types. Exemple : des opérations mathématiques (somme, soustraction, la multiplication, ...) peuvent ainsi être étendue à des nombres réels, à des vecteurs ou à des matrices.

VI.2.2.2 Les diagrammes UML

La création de L'UML (Unified Modeling language) a été pilotée par l'OMG (Object Management Group) qui a fait appel à mettre en place les spécifications d'un standard uniforme de modélisation, la version 1.1 est apparue en 1998. L'UML tel que spécifié n'est pas lié à un langage de programmation donné ou à une plateforme sur laquelle le système développé doit fonctionner.

Les détails de l'utilisation correcte et les éléments de l'UML sont spécifiés dans le métamodèle UML (Object Management Group, 2011). L'UML permet ainsi à représenter un modèle graphiquement sous forme de plusieurs diagrammes, chacun de ces diagrammes représente une vue relative au système modélisé. La figure VI-1 représente les différents diagrammes de l'UML (Object Management Group, 2011).

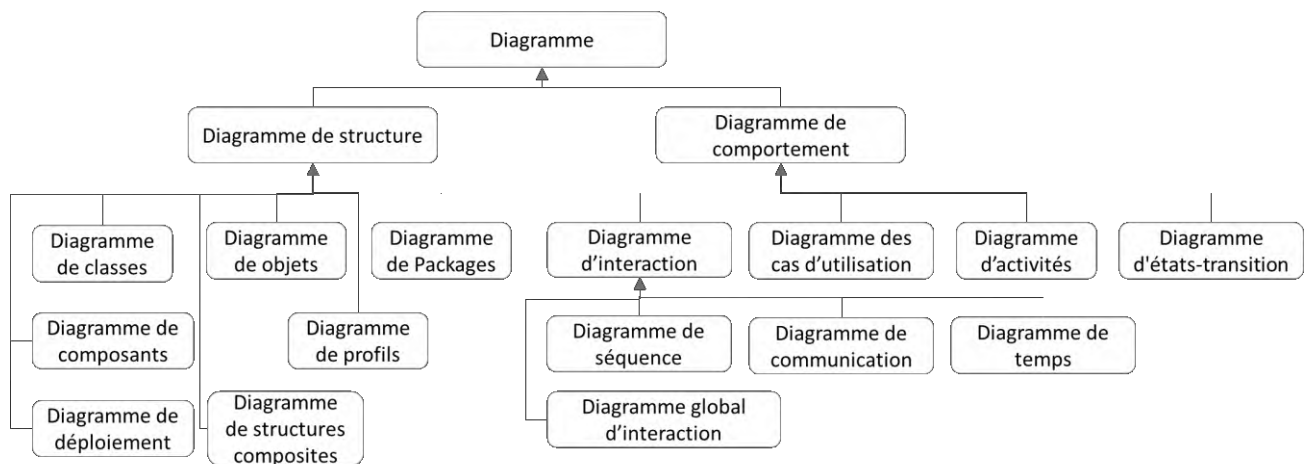


Figure VI- 1 Les diagrammes d'UML

UML fourni sept diagrammes pour modéliser la structure d'un système. L'aspect dynamique du système n'est pas représenté par ce type de diagrammes. Parmi les diagrammes de structure on cite (Seidl,2015) :

- Le diagramme des classes, qui est considéré parmi l'un des principaux diagrammes dans la conception d'un système, il représente une vue statique des différentes entités qui

constituent le système.

- Le diagramme des objets, qui est basé sur le diagramme de classes, permet de fournir une image instantanée de l'état du système dans un moment d'exécution précis.
- Le diagramme des composants a pour objectif de décrire le système sous format de composants réutilisables en mettant en exergue la relation entre ces derniers.

UML fourni également un ensemble de diagrammes permettant de définir le comportement d'un système suite à un changement au niveau de ces objets ou bien suite à une intervention externe (son environnement), parmi ces diagrammes on cite (Seidl,2015) :

- Le diagramme des cas d'utilisation, qui est la première étape dans la modélisation UML, il permet de représenter les besoins des utilisateurs tout en représentant les fonctionnalités du système et les interactions entre les acteurs et le système.
- Le diagramme de séquence permet de montrer comment les objets du système collaborent pour exécuter une fonctionnalité, il met en évidence la chronologie de l'exécution des différentes fonctionnalités des objets ainsi que les messages transmis entre ces objets en vue de réaliser une fonction du système.
- Le diagramme d'activités permet de modéliser tout type de processus qu'il soit informatique ou métier. Il permet de représenter les mécanismes de contrôle des flux ainsi que les mécanismes de cheminement des données.

VI.3 Outil de la planification intégrée de la production et de la logistique : SMLRP

VI.3.1 Les Spécifications fonctionnelles de l'outil

Nous introduisons l'outil dans un premier lieu d'un point de vue systémique en précisant ses différentes entrées/sorties. La Figure VI-2 représente les entrées/sortie du SMLRP, les sorties sont les différents ordres de fabrication, d'approvisionnement et de transport répartis sur les différentes périodes de l'horizon de planification, le SMLRP génère également les tournées de véhicules nécessaires pour le transport en amont et en aval de la chaîne logistique pour toutes les périodes de l'horizon de planification. Les entrées du SMLRP sont la nomenclature, adaptée au MLRP, les commandes clients réparties sur l'horizon de planification, les types des différents moyens logistiques disponibles et la localisation des différentes parties prenantes (clients, fournisseurs, unité de production).

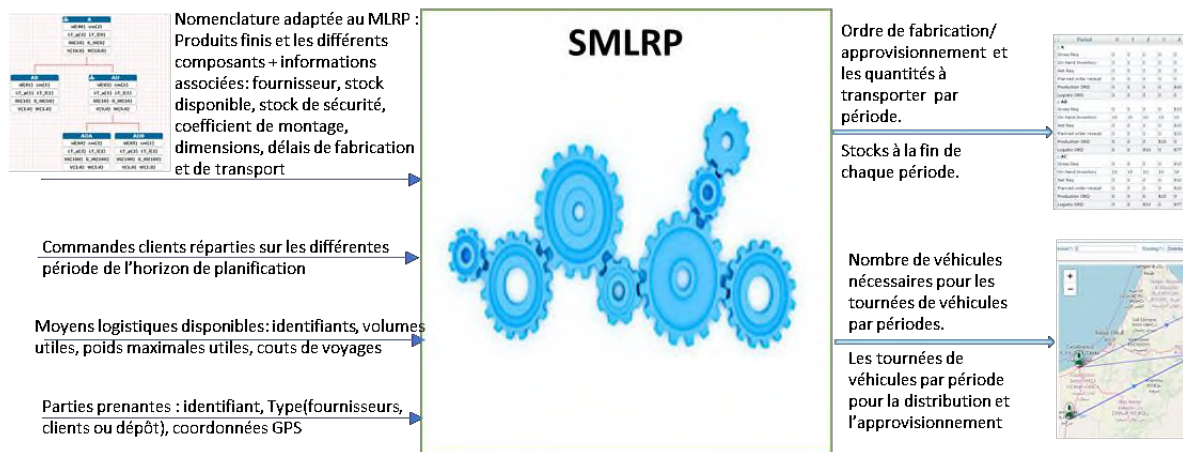


Figure VI- 2 Les entrées/sorties du SMLRP

Le Solveur SMLRP est implémenté en utilisant une architecture java/J2EE, l'utilisateur accède au solveur à travers une application web qui lui permet d'introduire la nomenclature du produit fini, le plan directeur de production et les moyens logistiques. Le solveur présente les différents ordres de production et de transport sous format d'un tableau sommaire et trace sur la carte géographique les différentes tournées de véhicules par période et par type de tournées. Les interfaces homes machines (IHM) du SMLRP seront présentées dans le paragraphe suivant.

Le solveur comprend essentiellement trois modules qui interagissent ensemble en vue d'exécuter l'algorithme MLRP, la figure VI-3 présente les modules du SMLRP.

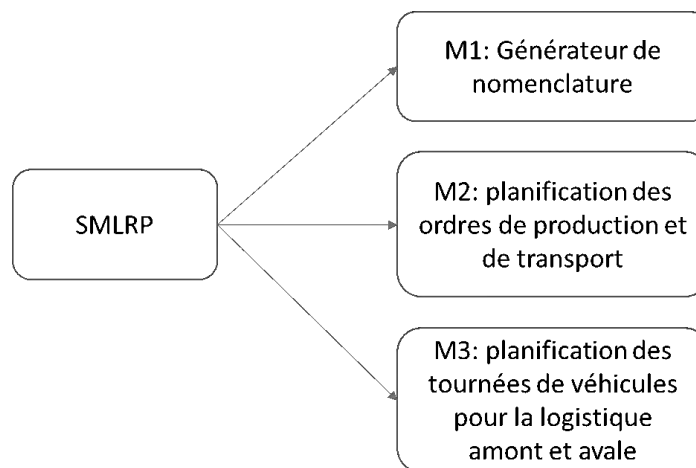


Figure VI- 3 Les modules de l'outil SMLRP

- Module de génération de la nomenclature adaptée au MLRP, il s'agit d'un module graphique qui permet à l'utilisateur d'introduire la structure du produit, les coefficients de montage des différents composants, les délais de production et de transport des

composants ainsi que la capacité de production relative à chaque composant. Ce module permet également d'introduire les dimensions de chaque composant ainsi que les stocks de sécurité et les stocks initiaux.

- Module de planification des ordres de production et de transport, ce module se base sur les commandes clients réparties sur les différentes périodes de l'horizon de planification et sur la nomenclature adaptée au MLRP pour générer les différents ordres de production et de transport.
- Module de planification des tournées de véhicules, ce module se base sur ordres de production et de transport, des dimensions des différents composants et des positions géographiques des différents clients et fournisseurs pour générer les tournées de véhicules associés à la logistique amont et à la logistique avale.

VI.3.2 Modélisation UML

VI.3.2.1 Diagrammes des cas d'utilisation et IHM associées

Les cas d'utilisation relatif à la génération de la nomenclature adaptée au MLRP sont présentés dans la figure VI-4

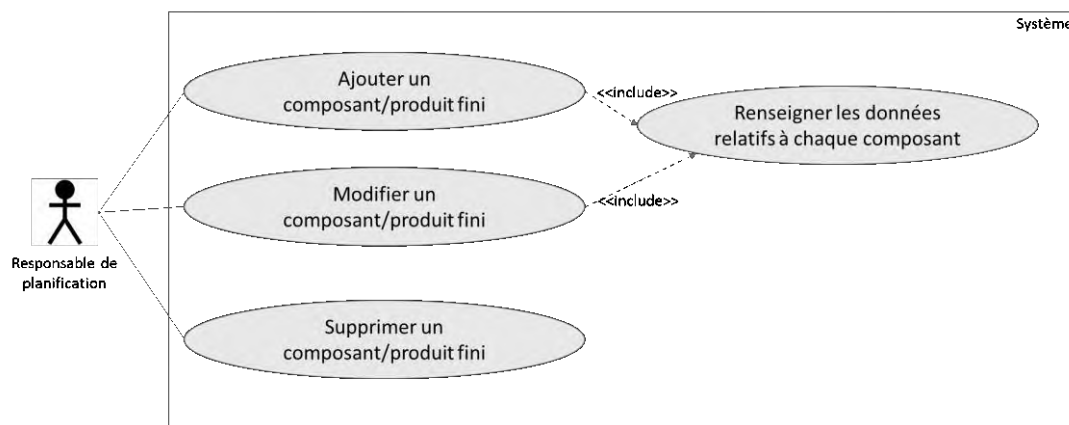


Figure VI- 4 diagrammes des cas d'utilisation relatifs à la nomenclature

Le cas d'utilisation relatif à l'ajout ou la modification d'un nouveau composant/ produit, permet de créer un composant au niveau de l'arborescence associée à la nomenclature et d'introduire par la suite l'ensemble des données relatifs à ce composant qui sont :

- Un code composant qui doit être unique.
- L'identifiant du composant père et le coefficient du montage par rapport à ce dernier.

- La capacité de production relative à ce composant (qu'elle soit en interne ou chez un fournisseur).
- L'identifiant du fournisseur du composant (si ce dernier n'est pas produit en interne).
- Les dimensions (poids et volume) relatifs à ce composant.
- Les délais de livraison relatifs à la production en interne ou bien chez un fournisseur ainsi que les délais de transport depuis un fournisseur.
- Et finalement le stock de sécurité et le stock initial relatif à ce composant.

Le cas d'utilisation relatif à la suppression d'un composant permet de supprimer un composant ainsi que tous ses composants fils.

La figure VI-5 représente l'IHM développée pour mettre en œuvre le cas d'utilisation « ajouter un composant à la nomenclature »

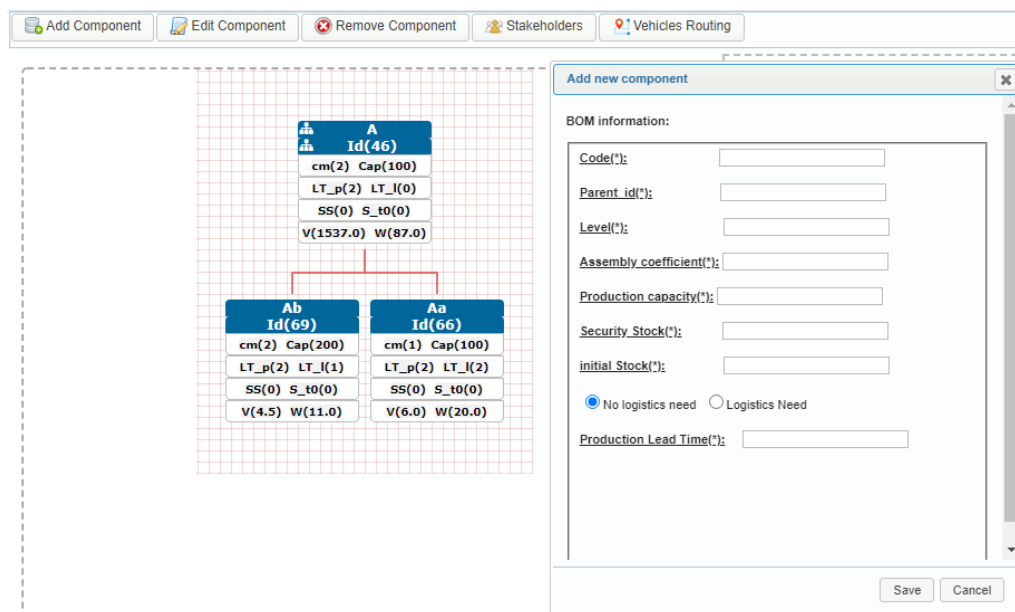


Figure VI- 5 IHM associée à l'ajout d'un composant

Un autre groupe de cas d'utilisation concerne l'introduction des données relatifs aux fournisseurs et aux clients et qui sont nécessaires pour l'algorithme MLRP (figure VI-6)

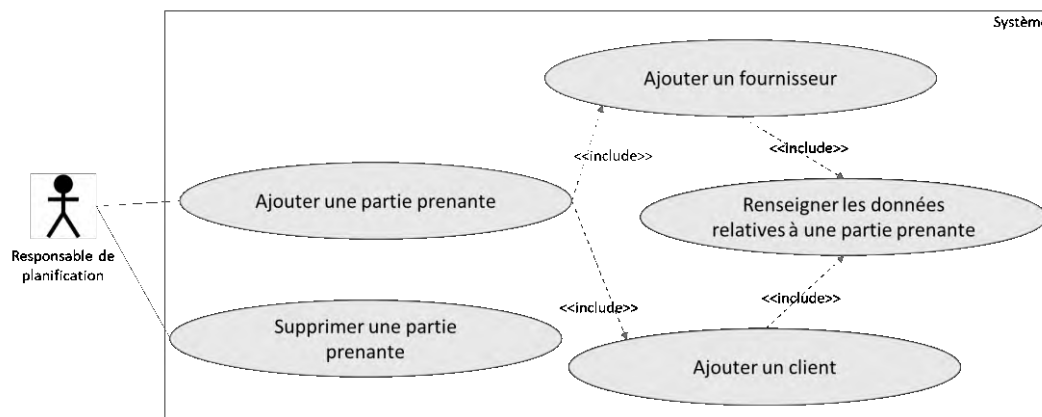


Figure VI- 6 Diagrammes des cas d'utilisation relatifs à la gestion des fournisseurs et clients

Les données relatives aux parties prenantes sont principalement les coordonnées géographiques, le type (Fournisseur, Client, Dépôt). La figure VI-7 représente l'IHM permettant de concrétiser les cas d'utilisation relatifs à la gestion des fournisseurs et des clients.

ID	Name	Latitude	Longitude	Type	Comp_IDs
49	C5	33.904664	-5.493679	Customer	
48	C4	33.961919	-5.031909	Customer	
47	C3	35.602573	-5.339419	Customer	
43	S3	35.716075	-5.901416	Supplier	-66-69
44	S4	33.454257	-7.648178	Supplier	-72
45	C1	34.022551	-6.831264	Customer	
46	C2	35.734414	-5.877599	Customer	

Figure VI- 7 IHM Associée à la gestion des clients et des fournisseurs

Le dernier groupe des cas d'utilisation est l'ensemble des cas d'utilisation permettant d'introduire le plan de production, les types de moyens logistiques disponibles et de lancer par la suite la planification des ordres d'approvisionnement, de production et de transport ainsi que la planification des tournées de véhicules (Figure VI-8).

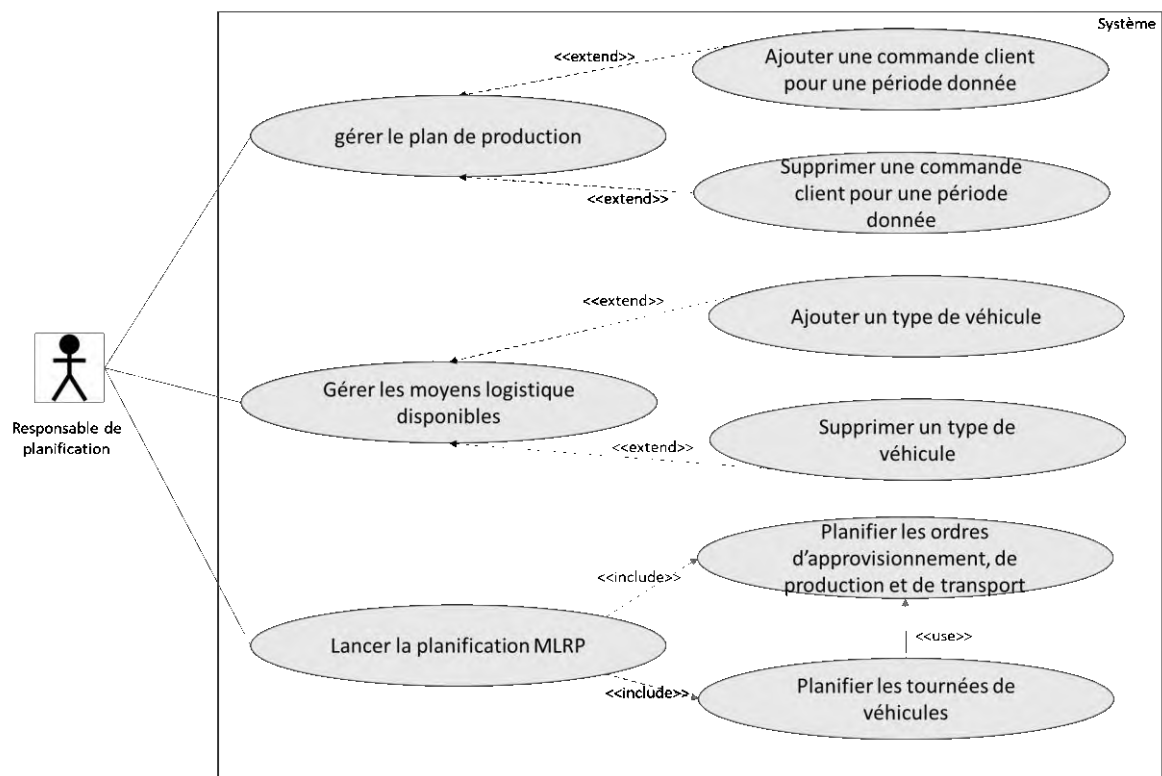


Figure VI- 8 Diagrammes des cas d'utilisation relatifs à la planification MLRP

Ce groupe de cas d'utilisation est constitué de trois cas d'utilisation essentiels, la gestion du plan de production, la gestion des moyens logistiques et le lancement de la planification MLRP. La figure VI-9 illustre l'IHM relative à la gestion du plan de production et la gestion des moyens logistiques, cette IHM permet d'introduire d'une part les commandes clients pour les différentes périodes de l'horizon de planification et de l'autre part, elle permet d'introduire les types de moyens logistiques disponibles avec les données associées (volume maximale et poids maximal transportés, cout de transport fixe et cout de transport par distance parcourue). L'IHM associée au résultat de la planification des ordres d'approvisionnement, de production et de transport ainsi que celle associée au résultat de la planification des tournées de véhicules seront présentées dans l'étude de cas.

Master Schedule

Production information by Period :

Customer(*):

Period(*):

Quantity(*):

Customer_ID	Period	Gross Req
10	5	200

Logistics information:

Type(*):

Used Volume(*):

Max Weight(*):

Cost/trip(*):

Cost/dist(*):

Type	Used_Volum	Max_weight	Fixed_Cost	Cost_dist
RMi	40000.0	5500.0	4500.0	3.0
RK	2600.0	635.0	700.0	1.0
RMa	10800.0	2100.0	1500.0	2.0

Add prod period Delete prod period Add Logistic Type Delete Logistic Type execute MRP Close

Figure VI- 9 IHM Associée à la gestion du plan de production et des moyens logistiques

VI.3.2.2 Diagramme de séquences

La Figure VI-10 représente le diagramme de séquence de l'opération « Op_MLRP », qui est la principale opération du SMLRP, cette opération implémente l'algorithme MLRP d'un point de vue sommaire. Le diagramme de séquence présente la manière avec laquelle interagit « Op_MLRP » avec les principaux objets qui font partie du solveur SMLRP pour assurer une planification intégrée des besoins de la production et de la logistique :

- OrderBacklogManagerImpl : classe qui permet d'effectuer les principales opérations sur les commandes clients (persistance dans la base de données, agrégations, ...).
- ComponentManagerImpl : service permettant de gérer les différents composants de la nomenclature.
- MrpManagerImpl : permet de fournir les méthodes qui assurent la saisie et la mise à jour des ordres de fabrication et de transport pour chaque composant selon les différentes périodes de l'horizon de planification dans la base de données.
- Vc_mapManagerImpl : cet objet permet de fournir la capacité de chaque type de véhicule par rapport aux différents composants de la nomenclature.
- StakeholderManagerImpl : Op_MLRP interagit indirectement avec cet objet à travers les opérations planDistributionRouting et planRelenishmentRouting, ces deux opérations permettent de planifier les tournées de véhicules en faisant appel aux algorithmes de tournées de véhicules (Savings, CFRS et RFCS) développés dans le

chapitre précédent.

- RouteManagerImpl : assure la persistance de la meilleure solution fournie par les algorithmes de tournées de véhicules (savings, CFRS, RFCS) au niveau de base de données.

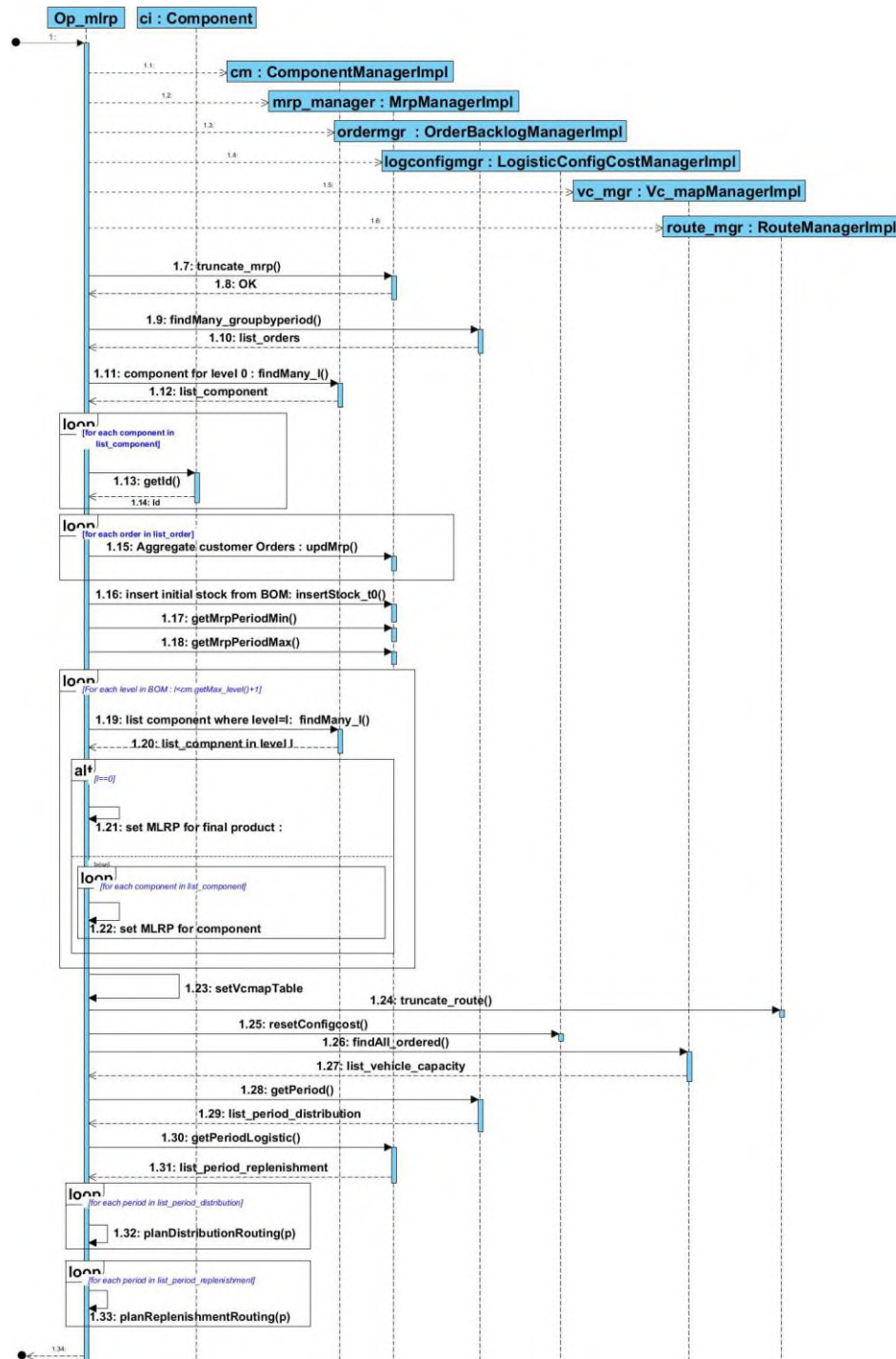


Figure VI- 10 Diagramme de séquence de l'opération « Op_MLRP »

VI.4 Etude de cas : planification de la production du transport pour une unité industrielle d'assemblage et de vente des transpalettes

Pour exposer les différentes fonctionnalités du solveur SMLRP, nous étudions dans ce paragraphe l'exemple d'une chaîne logistique de fabrication des transpalettes manuels peseurs, Figure VI-11, nous allons nous focaliser sur une entreprise faisant partie de cette chaîne logistique, cette entreprise est spécialisée dans la fabrication des structures métalliques en fer et en acier, elle fabrique les composants métalliques de la transpalette, acquiert les autres composants auprès de ses fournisseurs, assemble l'ensemble des composants et emballe le produit fini pour le transporter à ses clients.

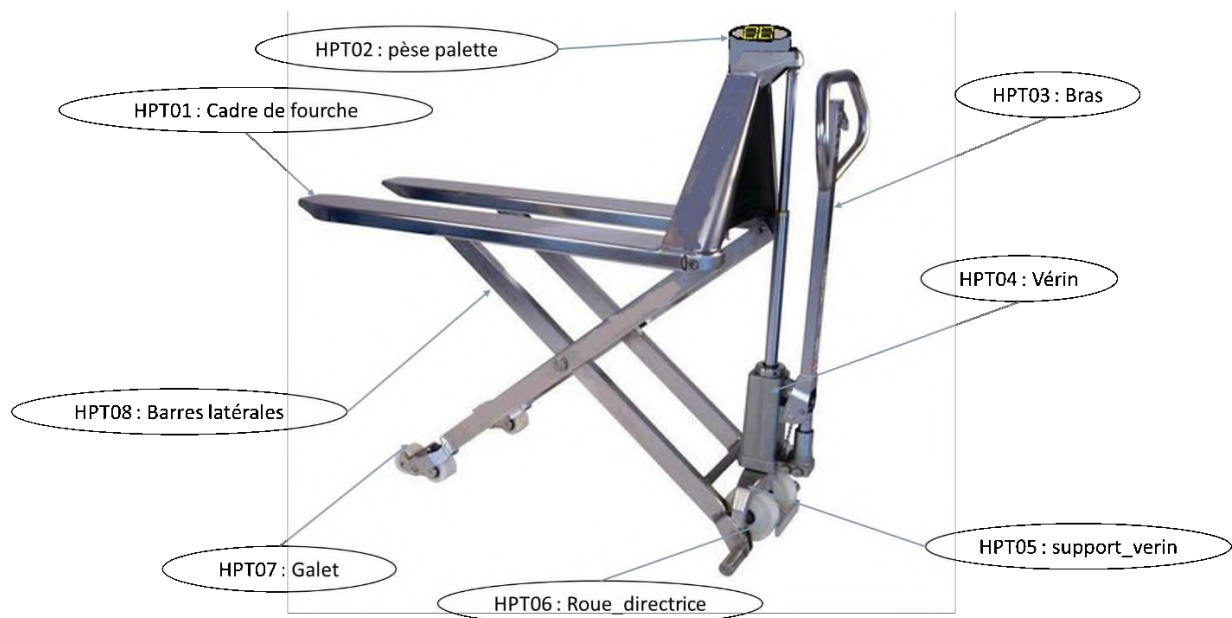


Figure VI- 11 Transpalette manuel peseur

Afin de démontrer la planification intégrée des besoins de la production et de la logistique assurée par le solveur SMLRP, nous listons ci-dessous les différents entrées/sorties, présentées dans la Figure VI-2, relatives au problème étudié.

VI.4.1 Les entrées du SMLRP relatives à l'étude de cas

Comme c'est déjà mentionné dans les paragraphes précédents, la nomenclature adaptée au MLRP, comprend une panoplie d'informations relatives à la structuration du produit fini, aux dimensions des éléments qui nécessitent d'être transportés ainsi que les fournisseurs des différents composants. La Figure VI-12 représente la nomenclature du transpalette manuel

peseur (HPT), elle contient en plus des coefficients de montage et la hiérarchisation des différents composants, les données liées aux délais de production des différents composants (LT_p), les stocks initiaux (S_t0), les stocks de sécurité (SS), et les volumes (V) et les poids (W) des éléments qui nécessitent d'être transportés ainsi que leurs délais de transport (LT_l). Ci-dessous les dimensions des éléments qui seront transportés:

- Les dimensions (en mm) du transpalette emballé sont 1230x1250x1000, ce qui est l'équivalent de 1537 litres, son poids est 87 kg.
- Les dimensions (en mm) du vérin emballé sont 100x128x350, ce qui est l'équivalent de 4.5 litres, son poids est 11 kg.
- Les dimensions (en mm) du pèse palette emballée sont 100x100x75, ce qui est l'équivalent de 0.75 litres, son poids est 1.2 kg.
- Les dimensions (en mm) de la roue directrice sont 200x200x70, ce qui est l'équivalent de 2.8 litres, son poids est 4.5 kg.
- Les dimensions (en mm) des galets de transpalette sont 82x82x70, ce qui est l'équivalent de 0.47 litres, son poids est 1.05 kg.

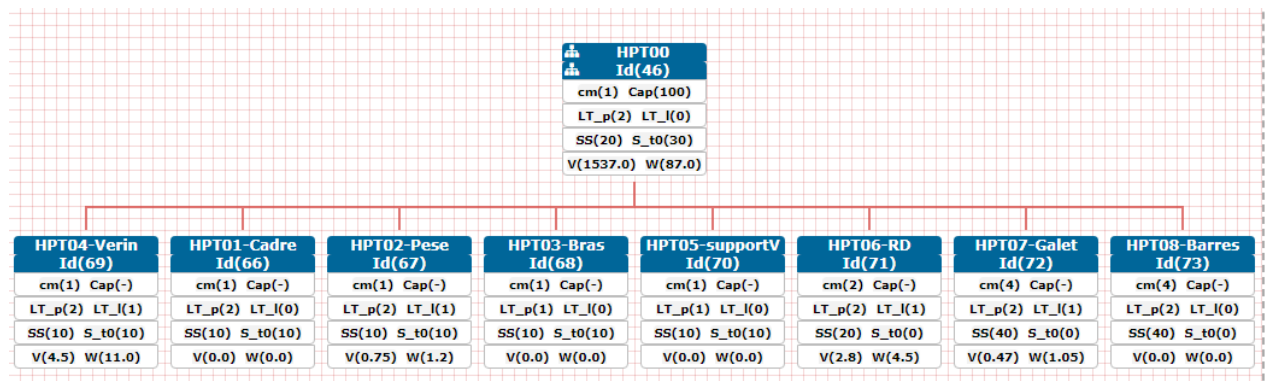


Figure VI- 12 Nomenclature de la Transpalette

L'ensemble des entreprises faisant partie de la chaîne logistique étudiée sont localisées au Maroc. L'entreprise EP est située à Casablanca, elle a un entrepôt principal au même endroit que son unité de production (EP à une capacité de production de 100 unités par semaine), ses fournisseurs (avec capacité considérées comme infinies) sont :

- S1 localisé à Berrechid, il fournit les roues directrices.

- S2 localisé à Kenitra, il fournit les pèses palette.
- S3 localisé à Tanger, il fournit les vérins.
- S4 localisé à Bouskoura, il fournit les galets.

Les clients de l'entreprise EP sont répartis sur tout le territoire du pays, le solveur SMLRP permet d'introduire les coordonnées GPS des différentes parties prenantes avec précision.

Concernant les types des moyens logistiques, trois types de véhicules sont disponibles, le RK, le RMa et le RMi. Le RK permet de supporter un poids de 635kg et dispose d'un volume utile de 2600 litres, tandis que le RMa permet de supporter un poids de 2100kg et a un volume utile de 10800 litres, et finalement le RMi permet de supporter un poids de 5500kg et a un volume utile de 40000 litres.

Finalement, Le tableau VI- 1 représente les commandes des clients de l'entreprise EP réparties sur plusieurs périodes, ces données sont introduites dans le solveur SMLRP.

		Période			
		5	8	9	10
Client	C1	20	30		
	C2		15		40
	C3	30	5	10	
	C4		25		50
	C5	5		20	
	C6	30			10
	C7	20		40	
	C8	30	45		50
	C9			20	

Tableau VI- 1 Les commandes des clients de l'entreprise EP

VI.4.1 Les Sorties du solveur SMLRP

Une fois les données du problème étudié sont saisies au niveau du SMLRP, nous exécutons l'algorithme MLRP pour avoir les différents ordres de fabrication, d'approvisionnement et de transport planifiés sur l'horizon de planification, le solveur les présente sous format d'un tableau (Tableau VI-2). Les lignes correspondantes au « Production ORD » sont des ordres de fabrication pour les composants fabriqués en interne, et des commandes d'approvisionnement auprès des fournisseurs pour les composants fournis par

d'autres entreprises. Les lignes correspondantes au « Logistic ORD » sont les ordres de transports.

Le solveur fournit également par période et selon l'opération concernée par la tournée (distribution de produit fini ou ramassage de composants) les véhicules nécessaires et les tournées de véhicules associées.

La Figure VI-13 présente à titre d'exemple la tournée de distribution relative à la période 9.

Execute MLRP													
Period	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HPT00													
Gross Req	-	-	-	0	0	0	135	0	0	120	120	150	0
On Hand Inventory	-	-	-	0	0	0	55	20	30	130	110	90	40
Net Req	-	-	-	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0
Planned order receipt	-	-	-	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0
Production ORD	-	-	-	55	100	10	100	100	100	100	0	0	0
Logistic ORD	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HPT01-Cadre													
Gross Req	-	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
On Hand Inventory	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	-
Net Req	-	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
Planned order receipt	-	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
Production ORD	-	55	100	10	100	100	100	100	0	0	0	0	-
Logistic ORD	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
HPT02-Pese													
Gross Req	0	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
On Hand Inventory	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	-
Net Req	0	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
Planned order receipt	0	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	-
Production ORD	55	100	10	100	100	100	100	0	0	0	0	0	-
Logistic ORD	0	0	55	100	10	100	100	100	100	0	0	0	-
HPT03-Bras													

Tableau VI- 2 Planification des ordres d'approvisionnement, de production et de transport pour l'entreprise EP

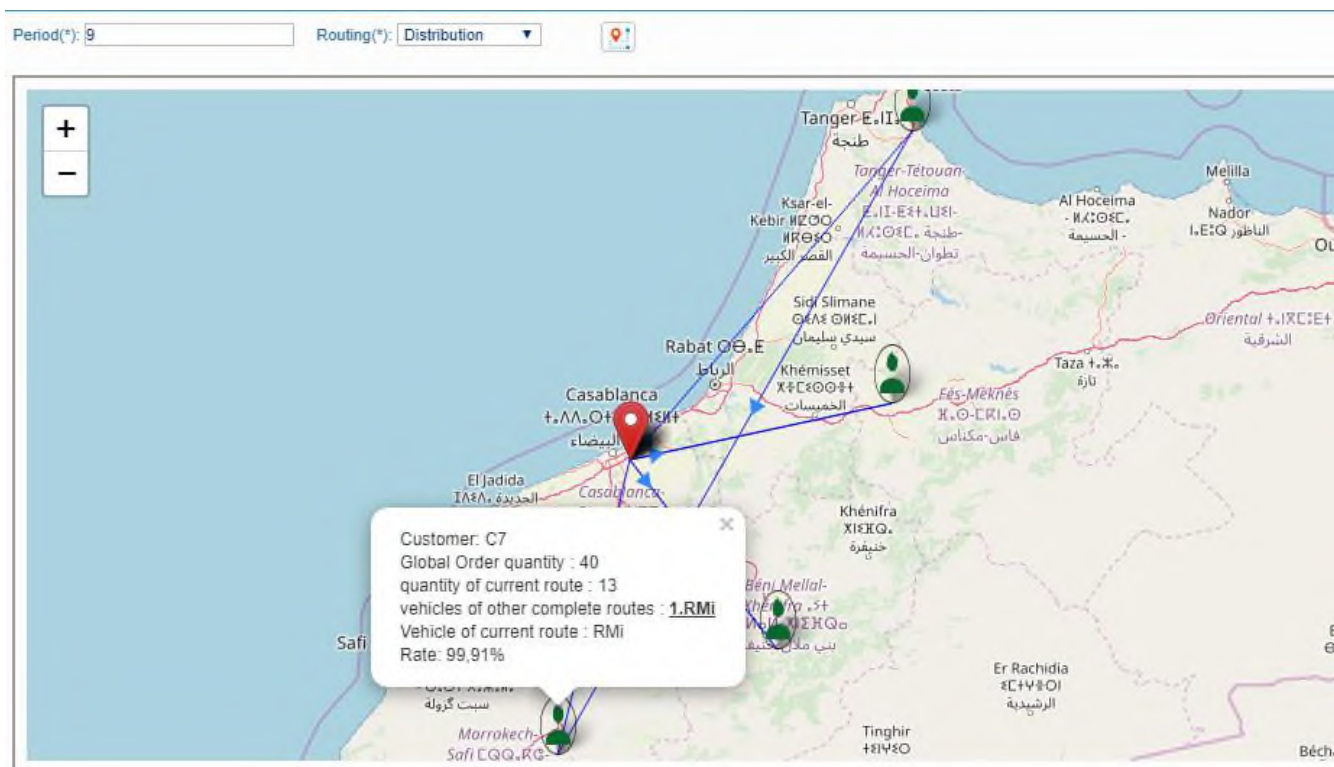


Figure VI- 13 Tournée de distribution pour la période 9

VI.5 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre les fonctionnalités du solveur industriel proposé en vue d'assurer la planification intégrée de la production et de la logistique. La description de ce solveur est effectuée en utilisant le langage de modélisation UML à travers ces diagrammes de cas d'utilisation et de séquence. Pour mettre en application la méthode MLRP proposée dans le chapitre précédent et implémentée en utilisant le solveur SMLRP, nous avons présenté une étude de cas industrielle dans laquelle nous avons pu démontrer la faisabilité de la planification intégrée de la production et de la logistique amont (ramassage) et aval (distribution).

Conclusion générale et Perspectives

A travers les travaux réalisés pour la préparation de cette thèse nous avons pu proposer une démarche de construction des tableaux de bord de pilotage intégré des chaines logistiques intégrant à la fois les risques et la performance et prenant en considération le contexte global de la chaine logistique, la stratégie adoptée, les facteurs clés de compétitivité et les besoins en maitrise au niveau des différents maillons de la chaine logistique.

Nous avons commencé par introduire les différentes notions relatives à la chaine logistique, à la gestion de la chaine logistique et aux risques liés à la chaine logistique. Nous avons présenté également, les différents cadres conceptuels proposés dans la littérature en vue de piloter la chaine logistique du point de vue gestion de la performance et du point de vue gestion des risques. L'ensemble de ces cadres conceptuels relatifs à la gestion de la performance ou des risques traitent séparément les deux notions fondamentales de management, les risques et la performance, or ces deux notions sont fortement liées ce qui nous a induit à proposer un cadre conceptuel de gestion intégrée de la performance et des risques. Nous avons introduit par la suite la démarche de construction de tableau de bord de pilotage de la performance et des risques, cette démarche intègre la notion de priorisation des indicateurs et des risques. Cette priorisation se fait en se basant sur le contexte de la chaine logistique à travers une analyse hiérarchique (AHP) prenant en considération les facteurs clés de compétitivité (Cout, Qualité, Délai) et le niveau de maitrise des différents processus.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons proposé également une nouvelle méthode d'analyse multicritère et multi acteurs qui intègre un processus d'élaboration de consensus en vue d'assurer une prise de décision en groupe. Cette Méthode permet de prioriser un ensemble d'alternatives par un groupe d'expert et elle se base sur la classification automatique afin de faire converger les opinions des différents experts vers un opinion collectif. Ainsi la méthode proposée se base sur la méthode AHP pour la priorisation des alternatives et sur la méthode des centres mobiles pour la classification des jugements dans la cadre d'élaboration

de consensus. Pour mettre en évidence l'utilité de la méthode proposée nous avons présenté une situation réelle dans laquelle nous étions obligés d'effectuer un sur-classement par un ensemble d'expert tout en veillant d'élaborer un consensus entre ces décideurs.

Le troisième volet abordé par nos travaux de recherche concerne la planification intégrée de la production et des transports liés au ramassage des matières premières et à la distribution des produits finis. Nous avons commencé par présenter les différents processus de la chaîne logistique ainsi que les interactions entre ces processus puis nous avons introduit les notions fondamentales relatives à la planification de la production et de la distribution. Nous avons également mis l'accent sur la nécessité d'effectuer une planification intégrée au sein de la chaîne logistique afin d'assurer la réactivité, l'agilité et la maîtrise des coûts permettant une gestion efficace et efficiente de la chaîne logistique.

Nous avons ensuite introduit la nouvelle méthode de planification intégrée de la production et de la logistique, le MLRP, ainsi nous avons présenté les deux algorithmes supportant cette méthode, le premier permettant de déterminer les ordres d'approvisionnement, de fabrication et de transport en fonction des demandes clients, de la nomenclature restructurée (structure de composition du produit fini adaptée au MLRP) et des délais de livraison (de transport et de production). Le deuxième algorithme permet de planifier les tournées de véhicules pour le ramassage des matières premières/composants et pour la distribution des produits finis en prenant en considération les dimensions et le poids des composants, le volume et le poids maximal des moyens de transport disponibles et les coûts de transport par voyage ainsi que la répartition géographique des fournisseurs et des clients.

Dans le cadre de la planification des tournées de véhicules, nous avons développé des algorithmes relatifs aux heuristiques constructives permettant de planifier les tournées des flottes de véhicules hétérogènes puis nous avons comparé la performance de ces heuristiques constructives (en termes de meilleures solutions trouvées) en effectuant des milliers de simulations.

La méthode MLRP est implémentée ensuite en utilisant un solveur industriel, le SMLRP, développé en vue de faciliter l'exécution des algorithmes associés à cette

méthode. Nous avons ainsi détaillé les fonctionnalités du solveur SMLRP en utilisant le langage de modélisation UML à travers ces diagrammes de cas d'utilisation et de séquence. Pour mettre en application la méthode MLRP proposée et implémentée en utilisant le solveur SMLRP, nous avons présenté une étude de cas industrielle dans laquelle nous avons pu démontrer la faisabilité de la planification intégrée de la production et des transports amonts (ramassage) et avalés (distribution).

Finalement, après avoir rappelé de manière synthétique les résultats obtenus, nous concluons ce manuscrit en proposant des perspectives pour des travaux futurs en continuité de ce travail de recherche.

Nous pouvons envisager d'un point de vue pratique :

- L'informatisation de bout en bout de la démarche de prise de décision en groupe ainsi que de son processus d'élaboration du consensus.
- Le développement d'un système d'information permettant de construire un tableau de bord de pilotage intégré de la performance et des risques et d'assurer le suivi des indicateurs faisant partie du tableau de bord conçu.
- Appliquer la méthode MLRP en utilisant le solveur proposé à d'autres cas industriels afin de mesurer l'utilisabilité du solveur développé et les limites du modèle proposé.

D'un point de vue théorique nous envisageons de :

- Étendre le champ d'application des méthodes proposées dans le cadre de pilotage de la performance et des risques à la totalité de la chaîne logistique (chaîne logistique intégrée puis collaborative)
- Intégrer le volet ordonnancement de la production dans le modèle MLRP et l'implémenter au niveau du Solveur SMLRP
- Généraliser le MLRP pour les cas industriels ayant plusieurs sites de production et/ou plusieurs dépôts et ajouter la possibilité de proposition des scénarii de report des demandes ou d'augmentation de capacité lorsque les solutions sont infaisables
- Intégrer dans le modèle MLRP la prise en compte des aléas liés à la production et à la livraison :

- L'incertitude en termes des délais de production et de transport
 - L'incertitude de terme de Fiabilité des produits et composants (produits de mauvaise qualité/ non conformes)
- Utiliser d'autres méthodes que celles utilisées par la méthode de prise de décision en groupe proposée et comparer les performances des différentes configurations de méthodes permettant la prise de décision en groupe : utiliser une autre méthode autre que le AHP pour la priorisation telle que ELECTRE ou PROMETHEE, utiliser d'autres méthodes de clustering autres que la méthode des centres mobiles telles que le SOM ou fuzzy c-means
- Utiliser les méta-heuristiques pour la résolution des problèmes de tournées des flottes de véhicules hétérogènes à la place des heuristiques constructives utilisées par le solveur SMLRP.

Liste des Travaux :

Liste des articles Publiés :

Titre article	Revue et références	Date
Implementation and Comparison of constructive heuristics for the heterogeneous fleet vehicle routing problem	International Journal of Scientific & Technology Research Volume 9(Issue 3):6958-6967 (indexé SCOPUS)	Mars 2020
Design and Development of an Industrial Solver for Integrated Planning of Production and Logistics	International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Volume 10 Issue 5, 2019, pp 252-262 (indexé SCOPUS et WOS)	Juin 2019
Integrated Production and Logistics Planning	International Journal of Online Engineering Vol. 14, No. 12, 2018, pp 84-96 (indexé SCOPUS et WOS)	Décembre 2018
CCAHP: A NEW METHOD FOR GROUP DECISION MAKING-APPLICATION ON SUPPLY CHAIN DASHBOARD DESIGN	International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001 Vol. 8, Issue 2, Apr 2018, 1303-1318 (indexé SCOPUS)	Avril 2018
Analytical hierarchy process-based framework for supply chain risk management	International Journal Of Scientific & Engineering Research ISSN 2229-5518, Volume 7, Issue 7, July-2016 1167	Juillet 2016

Liste des communications :

Titre de communication	Colloque	Date	Etablissement Ville et pays
Planification intégrée de la logistique et de la production à capacités finies : proposition d'un solveur industriel	Artificial Intelligence & Industrial Applications A2IA'2020	18-20 Mars 2020 (Reportée)	ENSAM-MEKNES, Maroc
Proposition d'un système d'information pour la planification intégrée des besoins de la logistique et de la production	JDSIRT'18	28-29 Novembre 2018	EST-MEKNES, Maroc
Les systèmes de planification avancée et la gestion des risques de la chaîne logistique	Conférence internationale de la logistique et de la supply chain management (Logistiqua 2018)	26-27 Avril 2018	FST Tanger- Maroc
Proposition d'une méthode collaborative d'analyse multicritère : Application à l'analyse des risques d'une chaîne logistique	Congrès International de Modélisation et. Optimisation des Systèmes Mécaniques CIMOSM 2017	05 – 06 Décembre 2017	FST-Fès, MAROC

Titre de communication	Colloque	Date	Etablissement Ville et pays
Proposition d'une approche générique de prise de décision en groupe : Application à la priorisation des critères de réévaluation des fournisseurs	Congrès international du génie industriel et du management des Systèmes CIGIMS2017	17 - 18 Mai 2017	ENSAM-Meknès, MAROC
Approche intégrée de pilotage de la chaîne logistique : Gestion de la Performance et des Risques (GPRCL)	Congrès international du génie industriel CIGI2017	3-5 Mai 2017	UTC- Compiègne- France
Evaluation des risques liés à la chaîne logistique : Approche fondée sur le processus d'analyse hiérarchique et la prise de décision en groupe	Conférence internationale de la logistique et de la supply chain management (Logistiqua 2017)	27-28 Avril 2017	ENSIAS Rabat- Maroc
Pilotage efficace de la chaîne logistique : Alignement entre contexte global, stratégie et indicateurs de performance	Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels, CIMSI'2016	19-20 Octobre 2016	ENSA Fès - Maroc
L'optimisation des interfaces et des interactions entre tous les maillons de la chaîne logistique par une approche holistique	Workshop sur les systèmes de production industriels WSPI 2016	16 Mai 2016	FST Fès - Maroc

Références bibliographiques :

A

Adewumi A.O., Adeleke O.J., A survey of recent advances in vehicle routing problems, *International Journal of System Assurance Engineering and Management* (2018) 9: 155. <https://doi.org/10.1007/s13198-016-0493-4>

AFNOR. Norme. Processus Logistique. FD X50-604. 2002

Agarwal A. et al., Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP-based approach, *European Journal of Operational Research* 173 (2006) 211–225.

Alomar M., Pasek ZJ., Linking supply chain strategy and processes to performance improvement, *Procedia CIRP* 17 (2014) 628–634.

ASLOG. Référentiel de la performance logistique. Editions ASLOG. <http://www.aslog.org>

Aven T., Risk Analysis, Assessing Uncertainties beyond Expected Values and Probabilities. John Wiley & Sons, 2008.

B

Bhagwat R., Sharma M.K., Performance measurement of supply chain management: A balanced scorecard approach, *Computers & Industrial Engineering* 53 (2007) 43–62.

Baldacci R., Battarra M., Vigo D. (2008) Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. In: Golden B., Raghavan S., Wasil E. (eds) *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Operations Research/Computer Science Interfaces, vol 43. Springer, Boston, MA.

Barba-Gutiérrez, Y., Adenso-Díaz, B., Reverse MRP under uncertain and imprecise demand. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 40(3), 413–424 (2009).

Beamon B., Supply Chain Design and Analysis Models and Methods. *International Journal of Production Economics*. 1998

Benaissa M., Intégration de la supervision dans la chaîne logistique : application à l'entreprise manufacturière, Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2008.

Bendriss S., Contribution à l'analyse et la conception d'un système d'information pour la gestion de la traçabilité des marchandises dans un contexte de transport multimodal, Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2009.

Bernroider E., Stix, V., A method using weight restrictions in data envelopment analysis for ranking and validity issues in decision making, *Computers & Operations Research*, 34(9), 2637–2647, 2007.

Berrah L., Cliville V., Towards an aggregation performance measurement system model in a supply chain context, *Computers in Industry* 58 (2007) 709–719

Bezdek, J.: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum Press, New York (1981)

Bitton M., ECOGRAI : Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performance pour organisations industrielles, Thèse d'état, Université Bordeaux I, 1990.

Bouhaddou I., Vers une optimisation de la chaîne logistique : proposition de modèles conceptuels basés sur le PLM (Product Lifecycle Management). Autre [cs. OH]. Université du Havre, 2015.

Birhanu D. et al., A survey of classifications in supply chain strategies, *Procedia Engineering* 97 (2014) 2289 – 2297.

Bowersox D.J., Integrated Supply Chain Management: A Strategic Imperative. Conference of Council of Logistics Management, Chicago. 1997.

Boyer L. et al., Précis d'organisation et de gestion de la production, Éditions d'Organisation, 1982.

Brunelli M., Introduction to the analytic hierarchy process. Springer-Briefs in Operations Research, 2015

C

Chen M.F., Tzeng G.H., Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country, *Mathematical and Computer Modelling*, 40(13), 1473-1490, 2004.

Clarke G., Wright J.W., Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4) :568-581, 1964.

Coloni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V.: Distributed optimization by ant colonies. In: Proceedings of the European Conference on Artificial Life, ECAL'91, pp. 134–142. Elsevier (1991)

Cooper R., Kaplan R.S., "Profit Priorities from Activity-Based Costing." *Harvard Business Review* 69, no. 3 (May–June 1991): 130–135.

Cordeau, J., Gendreau, M., Laporte, G. et al. A guide to vehicle routing heuristics. *J Oper Res Soc* 53, 512–522 (2002). <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601319>.

Crainic T.G., Semet F., Recherche opérationnelle et transport de marchandises. In *Optimisation combinatoire*. 3, Applications. Hermès Science: Lavoisier, 2006.

Cross R.L., Lynch, The SMART way to define and sustain success, *National Productivity Review* 8 (1) (1988-1989) 23–33

Curkovic S. et al., (2016) managing supply chain risk, integrating with risk management, CRC Press Taylor & Francis Group.

D

Dantzig R., Ramzer J., The truck-dispatching problem. *Management Science* 6(1):81–91 (1959).

Díaz-Madroño M., et al., A mathematical programming model for integrating production and procurement transport decisions, *Applied Mathematical Modelling* 52 (2017) 527–543.

Ding C., He X., Zha H., Gu M., Simon H., A min-max cut for graph partitioning and data clustering. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Data Mining, pp. 107–114 (2001)

Dionisi D., L'essentiel de Merise, Edition Eyrolles, Paris, 1995.

Dixit A., Mishra A., Shukla A., Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Meta-Heuristic Algorithms: A Survey: Theory and Applications, *ICHSA* 2018. 10.1007/978-981-13-0761-4_52 (2019).

Dong Y., Xu J., Consensus Building in Group Decision Making. Springer Science+Business Media Singapore 2016

E

El Khayyam Y., Herrou B., (2017). Risk assessment of the supply chain: Approach based on analytic hierarchy process and group decision-making. 135-141.
10.1109/LOGISTIQUA.2017.7962887.

El Khayyam Y., Herrou B., (2018 a). CCAHP, A New Method for Group Decision Making Application on Supply Chain Dashboard Design. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 8. 1303-1318.
10.24247/ijmperdapr2018150.

El Khayyam Y., Herrou B., (2018 b). Integrated Production and Logistics Planning. International Journal of Online Engineering. 14. 84-96. 10.3991/ijoe. v14i12.9068.

El Khayyam Y., & Herrou B., (2019). Design and Development of an Industrial Solver for Integrated Planning of Production and Logistics. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 10. 10.14569/IJACSA.2019.0100532.

El Khayyam Y., Herrou B., (2020). Implementation and comparison of constructive heuristics for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. International Journal of Scientific and Technology Research, Volume 9, Issue 3, March 2020, Pages 6958-6967

Ester, M., Kriegel, H.P., Sander, J., Xu, X.: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 226–231 (1996)

F

Fisher M., What is the right supply chain for your product? Harvard Bus. Rev. 75(1997) 105-116.

Finger S., Dixon J.R., A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. Research in engineering design, 1(1) :51–67, 1989.

G

Gelembe E., Introduction aux réseaux de files d'attente, Collection techniques scientifiques des télécommunications, 1982.

Glover F., Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers and Operations Research 13(5), 533–549 (1986).

Goldberg D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley (1989)

Gruat La Forme F.-A. et al., A framework to analyze collaborative performance, Computers in Industry 58 (2007) 687–697.

H

Hegge H.M.H., Wortmann J C., Generic bill-of-material: a new product model, *International Journal of Production Economics*, 23 (1991) 117-128.

Hinneburg, A., Keim, D.: An efficient approach to clustering in large multimedia databases with noise. In: *Proceedings of the 4thACMSIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 58–65. AAAI Press, New York (1998)

Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., Løkketangen, A., Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*. 37. 2041-2061. (2010). doi: 10.1016/j.cor.2010.03.015.

Huhns, M.N., *Distributed artificial intelligence*, Pitman Publishing, London, 1987.

I

ISO 31000:2009 Risk management — Principles and guidelines

J

Jans R., et al., Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research* 46(6), 1619–1643 (2008).

Jawab F., Bouami D., Contribution à la mise au point d'une démarche d'audit logistique. *Conférence Internationale Conception et Production Intégrées Rabat Maroc 2007*

K

Kaplan R. et Norton D. (2001), *Comment utiliser le tableau de bord prospectif*, Éditions d'organisation, chapitres 2 et 3, pp 31-113

Kaplan, R., & Norton, D. (1992). The balanced scorecard: Measures that drive performance. *Harvard Business Review*, 70(1), 71–99

Karni R., Integer linear programming formulation of the material requirements planning problem. *Journal of Optimization Theory and Applications* 35(2), 217–230 (1981).

Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M., Optimization by simulated annealing. *Science* 220(4598), 671–680 (1983)

Kohonen, T., Huang, T., Schroeder, M.: *Self-Organizing Maps*. Springer, Heidelberg (2000)

Kubler S. et al, A state of the art survey and testbed of fuzzy AHP Applications. *Expert Systems with applications* 65 (2016) pp 308-422.

L

Lauras M., *Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques*. Thèse de doctorat en systèmes industriels. Institut National Polytechnique de Toulouse. 2004.

La Londe B.J., Evolution of the Integrated Logistics Concept. Dans ROBESON J.F., COPACINO W.C., *The Logistics Handbook*., Edition Free Press. 1994.

Lenstra JK., Rinnooy Kan AHG., Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks* 11(2):221–227 (1981).

Lee H.L., Billington C., The evolution of supply-chain-Management models and practice at Hewlett-Packard. *Interfaces* Vol. 25. pp.42-63. 1995.

Linkov I. et al., Multi-criteria decision analysis: A framework for structuring remedial decisions at contaminated sites, Linkov, I. and Ramadan, A.B. (Eds.), *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2004

Lorino P., *Méthode et pratiques de la performance*. Editions d'Organisation. 521 p. 1997

M

MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pp. 281–297 (1967)

Magal, S., Word, J. (2012). *Integrated business processes with ERP systems*. Hoboken, NJ: Wiley

Magali M., *Thèse Modélisation pour la simulation de chaînes de valeur en entreprise industrielle comme outil d'aide à la décision en phase de conception / industrialisation* Soutenu le 29 octobre 2007 à l'école Centrale de Nantes.

Maini R., Goel R., Vehicle routing problem and its solution methodologies: a survey. *International Journal of Logistics Systems and Management*. 28. 419. 10.1504/IJLSM.2017.10008188 (2017).

Martel, J.M., Matarazzo, B., Other outranking approaches. In: Figueira, J., Salvatore, G., Ehrgott, M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York, 2005.

McLachlan, G., Basford, K.: *Mixture Models*. Marcel Dekker, New York (2000).

Mentzer J.T., Dewitt W., Keeber J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G. Defining the Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics* Vol 2 N°2. 2001

Monteiro T., *Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises : le cas de la relation donneurs d'ordre-fournisseurs*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

Morgan J., *Integrated Supply Chains: How to make Them Work!* Purchasing. May 1997 pp. 32-37. 1997

Mourits, M.C.M. and Oude Lansink, A.G.J.M., Multi-criteria decision making to evaluate quarantine disease control strategies, In Oude Lansink, A.G.J.M. (Ed.), *New Approaches to the Economics of Plant Health*, Springer, Netherlands, 2006.

Mula J. et al., A Conceptual Model for Integrating Transport Planning: MRP IV, IFIP International Federation for Information Processing pp. 54–65, 2012.

Mula J. et al., MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy Sets and Systems* 157(1), 74–97 (2006).

N

Naciri O, Alami A., Herrou B., Hammoumi M., 2015-a Investigation of the importance of performance indicators in the control of the supply chain of the Moroccan industrial sector. Volume 6, Issue 5, May 2015 Edition International Journal of Scientific and Engineering Research (IJSER) - (ISSN 2229-5518).

Naciri O., Alami A., Herrou B., Contribution au pilotage des processus d'une chaîne logistique Etude de cas du processus approvisionnement d'une PME marocaine. Xieme Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Dec 2015-b, Tanger, Maroc. <hal-01260765>.

O

Object Management Group. OMG Unified Modeling Language (UML), Superstructure. Technical Report Version 2.4.1, OMG, August 2011.

Olson L., supply chain risk management, tools for analysis. Business Expert Press, LLC, 2014.

Orlicky J., Material requirements planning. New York: McGraw-Hill, 1975.

Özgir V., Demirel T., A comprehensive analysis for the metrics of supply chain design strategies, 15th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Prague, 2011.

P

Parmenter D., Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs, Third Edition Wiley & Sons, Inc., 2015.

Paul J., Laville J.J., Le modèle SCOR, vecteur d'excellence de la Supply Chain. N°13 - SUPPLY CHAIN MAGAZINE - MARS 2007

Petri K. A., Kommunikation mit automaten (communication with automata), Thèse de doctorat, Faculté de Darmstadt, Bonn, 1962

Pohekar S.D., Ramachandran M., Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8(4), 365-381, 2004.

Poirier C., Reiter S.E., La Supply Chain Optimiser la chaîne logistique et le réseau inter-entreprises. Edition Dunod. 296 p. 2001

R

Raharno S., Martawirya YY., Improvement of the bill of materials (BOM) generator for product variants. ASEAN Eng J 2012; 3(2): 32–45.

Ramanathan U., Aligning supply chain collaboration using Analytic Hierarchy Process, Omega 41 (2013) 431–440.

Rohde J. et al., Die supply Chain Planning Matrix. PPS Management, 5(1), 10–15, 2000.

Ross D., Structured Analysis: A Language for Communicating Ideas, IEEE Transactions on Software Engineering, Special Issue on Requirements Analysis, Vol.3, No.1, 1977.

S

- Saaty T.L., A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3):234–281, 1977.
- Saaty T.L., *The analytic hierarchy process*. New York : McGraw-Hill, 1980.
- Sahbi B.I. et al., Synthèse du problème de routage de véhicules, *Collection des rapports de recherche de Telecom Bretagne* (2011).
- Santarek K., Buseif I. M., Modelling and design of flexible manufacturing systems using SADT and Petri net tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.76, No.1, pp. 212-218, 1998.
- Schlegel G L. et al., (2015) *Supply Chain Risk Management, An Emerging Discipline*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- SCOR, 2012. SCOR Version 11.0 Overview, URL: <http://www.supply-chain.org>.
- Selic B., The Pragmatics of Model-Driven Development. *IEEE Software*, 20(5):19–25, 2003.
- Seidl, M., et al.: *UML@Classroom: An introduction to Object-Oriented Modeling*. Undergraduate Topics in Computer Science, ed. Springer. Springer International Publishing (2015)
- Shankar R., Jaiswal S., (1999) *Enterprise resource planning*. Galgotia, New Delhi.
- Shi J., Malik J.: Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22(8), 888–905 (2000)
- Soares F., Souza A., *Neural Network Programming with Java*, 2nd Edition, Birmingham B3 2PB, UK. Packt Publishing 2017
- Sodhi M.S., Tang C.S., *Managing Supply Chain Risk*. International Series in Operations Research & Management Science 172, Springer Science Business Media, LLC 2012.
- Siarry P., *Metaheuristics*, Springer International Publishing Switzerland 2016, DOI 10.1007/978-3-319-45403-0_1.
- Simpson L., Do decision makers know what they prefer? Mavt and electre ii. *Journal of the Operational Research Society*, 47 (7), 919–929, 1996.
- Sienou A., (2009) *Proposition d'un cadre méthodologique pour le management intégré des risques et des processus d'entreprise*, Thèse de doctorat en systèmes industriels, sous la direction de Hervé PINGAUD, Toulouse, université de Toulouse, 263 p.
- Stachowiak H., *Allgemeine Modelltheorie* (in German). Springer, 1973
- Stadtler H. et al., *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Springer Texts in Business and Economics, DOI 10.1007/978-3-642-55309-7__4, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

T

Tan, P.N., Steinbach, M., Kumar, V.: Introduction to Data Mining. Addison-Wesley, Reading (2005)

Tayur S., Ganeshan R., MAGAZINE M. Quantitative models for Supply Chain Management. Edition Kluwer Academic Publishers. 1999

Towill D.R., Time Compression and Supply Chain Management – A guided tour. Logistics Information Management Vol.9 N°6. pp. 41–53. 1996

Tsay A., Lovejoy W., (1999) Quantity-flexibility contracts and supply chain performance. Manufacturing & Service Oper Management 1(2):89–111

V

Vaidya D., Kumar S., Analytic hierarchy process: An overview of applications. European Journal of operational research, 169 (1), 1–29, 2006

Vernadat F., Techniques de modélisation en entreprise : application aux processus opérationnels, Editions Economica, 1999.

Vrat P., Just-in-Time, MRP, and Lean Supply Chains, Materials Management, Springer Texts in Business and Economics 2014.

W

Williams T.J., The Purdue Enterprise Reference Architecture, Computers in Industry, Vol. 24, No.2/3, pp.141-158, 1994.

Wujun C., Wenshui Y., A Survey of Vehicle Routing Problem, MATEC Web of Conferences 100, 0100 (2017).

Wu J., Advances in K-means Clustering, Springer Theses, DOI: 10.1007/978-3-642-29807-3_1, 2012.

Y

Yager R.R., on ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 18, 183–190 (1988).