



HAL
open science

Planification tactique de chaîne d’approvisionnement en boucle fermée : modélisation, résolution, évaluation

Pierre Desport

► **To cite this version:**

Pierre Desport. Planification tactique de chaîne d’approvisionnement en boucle fermée : modélisation, résolution, évaluation. Modélisation et simulation. Université d’Angers, 2017. Français. NNT : 2017ANGE0012 . tel-01679886

HAL Id: tel-01679886

<https://theses.hal.science/tel-01679886v1>

Submitted on 10 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Pierre DESPORT

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université d'Angers
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

École doctorale : Sciences et technologies de l'information, et mathématiques

Discipline : Informatique, section CNU 27

Unité de recherche : Laboratoire d'Étude et de Recherche en Informatique d'Angers (LERIA)

Soutenue le 4 juillet 2017

Planification tactique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée Modélisation, résolution, évaluation.

JURY

Rapporteurs : **M. Van-Dat CUNG**, Professeur, G-SCOP, Grenoble INP
M. Frédéric GARDI, Docteur (HDR), Innovation 24

Examineurs : **M^{me} Anne LIRET**, Docteure, British Telecom France
M. Alain HAÏT, Professeur, ISAE, Université de Toulouse

Directeur de thèse : **M. David LESAIN**T, Professeur, LERIA, Université d'Angers

Co-directeur de thèse : **M. Frédéric LARDEUX**, Maître de conférences (HDR), LERIA, Université d'Angers

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier David et Fred, mes directeurs de thèse, pour avoir mis en place la collaboration avec British Telecom, et m'avoir permis de travailler sur ce sujet dans les meilleures conditions. Ils ont toujours été présents pour me soutenir, me guider et m'encourager dans mes choix. Ils ont également relu mes différents écrits (qui n'étaient souvent que des brouillons) et à maintes reprises ce manuscrit qui n'a pu aboutir que grâce à eux. Encore merci.

Je tiens également à remercier très chaleureusement messieurs Van-Dat Cung et Frédéric Gardi pour m'avoir fait l'honneur de rapporter cette thèse. Ma gratitude s'adresse également à Alain Haït pour avoir accepté d'être membre de mon jury. Enfin, j'adresse tous mes remerciements à Anne Liret, également membre du jury et avec qui j'ai apprécié collaborer durant ces années de thèse.

Je remercie également tous mes collègues du LERIA avec qui j'ai pu travailler, échanger et rire durant ces années. Particulièrement, les enseignants-chercheurs Matthieu, Adrien et Frédéric qui m'ont accompagné à plusieurs conférences. Nos secrétaires adorées, Catherine et Christine, qui assurent le bon fonctionnement du labo et sont toujours là pour nous soutenir avec un petit mot pour rire (même avec une sombre histoire de cravate). L'équipe technique, Jean-Matthieu, Alexan, Frantz et Eric qui nous permet de travailler dans les meilleures conditions possibles. Enfin, mes pensées vont vers mes collègues doctorants qui ont su me supporter moi et mon humour particulier pendant plusieurs années. Marc, Vincent, Fabien, Arthur, Christopher, Hugo, Sara, Théo, merci à vous (et n'oubliez pas que moi aussi je vous ai supporté).

I would like to thank people from Ipswich as well. They made me feel well during this year spent in UK. Especially, Gilbert, Carla and Kash who worked on this project and always supported me. I also thank my colleagues, friends and roomates (Chris, Jake, John, Ray, Josh, Angélique, Max, Lucie, Marie, Tristan) who made me discover Ipswich Town football games and afterwork pubs. A very special thanks goes to Damien and Andrada who were always there for me in good and bad moments.

Je remercie également mes amis, Axel, Camille, Bambi, Chouchou, Thomas, Bogui, Zah, Johanne et tous ceux qui m'ont toujours fait rire et qui m'ont aidé à surmonter les moments de doutes.

Ma gratitude va tout particulièrement à ma famille, mes parents Nadège et Eric, mon frère David et sa femme Aïcha pour m'avoir toujours encouragé à aller plus loin et m'avoir donné l'opportunité de faire de longues études malgré les sacrifices que ça impliquait. Un très gros merci au petit Malik qui, même s'il ne parle pas encore, m'a souvent fait sourire dans cette période de rédaction de thèse. Enfin, merci à Hélène pour sa patience, son soutien et pour avoir eu le courage de relire mon manuscrit.

Merci à tous !

Table des matières

Introduction générale	15
Contexte	15
Motivations et objectifs	16
Organisation du manuscrit	18
1 Généralités sur les chaînes d’approvisionnement	19
1.1 Introduction	19
1.2 La chaîne d’approvisionnement	20
1.2.1 Un peu d’histoire	20
1.2.2 Définition	21
1.2.3 Chaîne intra-organisationnelle et Chaîne inter-organisationnelle	23
1.2.4 Les topologies de chaînes d’approvisionnement	23
1.3 Gestion de chaînes d’approvisionnement	24
1.3.1 Définition	25
1.3.2 Les objectifs de la gestion de chaînes d’approvisionnement	26
1.3.3 Intégration et coordination	27
1.3.4 Les difficultés de gestion	31
1.3.5 Les niveaux d’abstraction	33
1.4 Des extensions à la gestion classique	34
1.4.1 Logistique inverse	35
1.4.2 La boucle fermée	37
1.5 Conclusion	39
2 Problématique	41
2.1 Introduction	41
2.2 Le cas réel	41
2.2.1 Un besoin opérationnel	41
2.2.2 La chaîne d’approvisionnement de British Telecom	42
2.2.3 Le processus de gestion	43

2.2.4	Les limites de ce système	44
2.3	Points clés	46
2.4	Les méthodes de gestion et de distribution d'inventaire	47
2.4.1	Les méthodes utilisées en chaîne d'approvisionnement classique	47
2.4.2	La gestion en boucle fermée	57
2.5	Nos choix	58
2.6	Un système d'aide à la décision	60
2.7	Conclusion	61
3	Définition du problème	63
3.1	Introduction	63
3.2	Modélisation générique	63
3.3	Modélisation	64
3.3.1	Paramètres et constantes	64
3.3.2	Variables	66
3.3.3	Équations	67
3.3.4	Objectifs et plan	69
3.4	Complexité du TDPP	70
3.4.1	Théorie de la complexité	70
3.4.2	TDPP comme un problème de flot de coût minimum	71
3.4.3	Réduction du problème de somme de sous-ensembles	75
3.5	Un modèle d'aide à la décision	77
3.5.1	Interprétation des résultats	77
3.5.2	Extensions	78
3.6	Conclusion	80
4	Résolution du TDPP	81
4.1	Introduction	81
4.2	Méthodes d'optimisation	81
4.3	Une méthode exacte pour TDPP	82
4.4	Les méthodes de résolution approchées	82
4.5	Nos métaheuristiques	85
4.5.1	Une première métaheuristique	87
4.5.2	Difficultés	89
4.5.3	La métaheuristique Best Improving Sequence	90
4.6	Expérimentations	100
4.6.1	Instances utilisées	100
4.6.2	Diversification	102

4.6.3	Évaluation des méthodes sur le cas réel	103
4.7	Conclusion	109
5	Pondération et politiques de gestion	111
5.1	Introduction	111
5.2	Politiques de gestion	111
5.2.1	Les politiques de coûts	112
5.2.2	Les politiques opérationnelles	112
5.3	Relation d'ordre entre les poids	112
5.4	Points clés et modélisation	113
5.5	Expérimentations	114
5.5.1	Mise en place	114
5.5.2	Résultats	115
5.6	Discussion	123
5.7	Conclusion	124
6	Robustesse et mise en place des plans	125
6.1	Introduction	125
6.2	Application des plans	126
6.3	Gestion des incertitudes	128
6.4	Expériences	130
6.4.1	Protocole d'application des plans roulants face aux incertitudes	130
6.4.2	Instances utilisées	131
6.4.3	Paramétrage du système	133
6.4.4	Évaluation des résultats	134
6.4.5	Résultats et analyse	135
6.5	Discussion et perspectives	142
6.6	Conclusion	143
	Conclusion générale	145
	Publications et communications	149

Liste des tableaux

1.1	Définitions de la gestion de chaîne d'approvisionnement	25
3.1	Paramètres d'une instance	65
3.2	Constantes d'une instance	66
3.3	Variables d'une instance	66
3.4	Un exemple de plan	70
4.1	Comparaison entre le MIP et la métaheuristique BIS	105
5.1	Bornes α associées aux différents objectifs	113
5.2	Résultats sur la topologie <i>Tree</i> avec les schémas High et Mix	116
5.3	Pourcentage moyen selon le type d'opération sur la topologie <i>Tree</i>	118
5.4	Récapitulatif des politiques opérationnelles	121
5.5	Récapitulatif des politiques opérationnelles	122
6.1	Comparaison de performance selon la topologie sur l'objectif de ruptures de stock avec les schéma High et DC en fonction de λ et de la fréquence de recalcul.	142

Table des figures

1	Un système d'aide à la décision	17
1.1	Modèle SCOR (supply chain council)	22
1.2	Différentes structures de chaîne d'approvisionnement	24
1.3	La maison de Stadtler et Kilger [2000]	26
1.4	Résultats de Yu et al. [2001]	28
1.5	Les types de demandes	30
1.6	Bullwhip effect	32
1.7	Les niveaux d'abstraction selon Génin [2003]	34
1.8	La chaîne d'approvisionnement inverse selon Thierry et al. [1995]	36
1.9	La chaîne d'approvisionnement de Cummings selon Souza [2013]	38
2.1	Le réseau de British Telecom	43
2.2	Les processus de gestion	45
2.3	Politique r, Q	49
2.4	Politique r, S	50
2.5	Politique s, S	50
2.6	Politique s, Q	50
2.7	Politique t, s, S	51
2.8	Politique t, s, Q	51
2.9	Un système d'aide à la décision	60
3.1	Un exemple de graphe espace-temps	65
3.2	Un plan représenté sur un graphe espace-temps	70
3.3	Instance du MCNFP obtenue par réduction de l'instance TDPP de la figure 3.1	74
3.4	Somme de sous-ensembles vers TDPP avec $K = [8; 18; 9; 2]$ et $B = 17$	76
3.5	Étiquetage du graphe avec $K = [8; 18; 9; 2]$ et $B = 17$	77
3.6	Un autre exemple de réduction de la somme de sous-ensembles	77
3.7	Une chaîne d'approvisionnement avec un acheteur et un vendeur	79
4.1	Une classification simple des métaheuristiques.	83

4.2	Un exemple de chaîne d’approvisionnement à deux niveaux.	88
4.3	Un exemple de chaîne d’approvisionnement à 3 niveaux.	90
4.4	Étiquetage du gain sur un graphe.	95
4.5	Un autre exemple de chaîne d’approvisionnement à 3 niveaux.	96
4.6	Les topologies des instances utilisées.	100
4.7	Évolution de la fitness sur une instance simple.	102
4.8	Évolution de la fitness sur une instance plus complexe.	103
4.9	Évolution des métriques.	106
4.10	Impact de la pondération.	108
5.1	Objectif des expérimentations	114
5.2	Topologies	115
5.3	Évolution des métriques sur l’horizon de temps sur la topologie <i>Tree</i> avec les schémas High et Mix	119
6.1	Le système d’aide à la décision	127
6.2	Le système de plans roulants avec une fréquence égale à l’horizon de temps	127
6.3	Le système de plans roulants avec une fréquence inférieure à l’horizon de temps	127
6.4	Délai nécessaire à la prise en compte d’une défaillance non prévue avec différentes fréquences	129
6.5	Génération, application et évaluation des plans	131
6.6	Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.05$	137
6.7	Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.1$ sur la topologie <i>Tree</i>	137
6.8	Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.25$ sur la topologie <i>Tree</i>	138
6.9	Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.5$ sur la topologie <i>Tree</i>	138
6.10	Évaluation de l’utilisation des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC pour les différents λ sur la topologie <i>Tree</i>	139
6.11	Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.05$ sur la topologie <i>Tree</i>	140
6.12	Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.01$ sur la topologie <i>Tree</i>	140
6.13	Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.25$ sur la topologie <i>Tree</i>	140

6.14	Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.5$ sur la topologie <i>Tree</i>	141
6.15	Évaluation de l'utilisation des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC pour les différents λ sur la topologie <i>Tree</i>	141

Introduction générale

Face à une concurrence économique toujours plus importante, les entreprises doivent assurer une satisfaction de leurs clients à moindre coût. Dans ce contexte, la performance des entreprises est généralement conditionnée à une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement. En effet, toutes les activités essentielles à la productivité d'une entreprise (fabrication, assemblage, vente, ...) sont conditionnées par la présence de la pièce nécessaire, au bon moment et au bon endroit. Notre manuscrit s'inscrit dans cette problématique de la gestion de chaîne d'approvisionnement.

Dans cette introduction, nous énonçons le contexte de cette thèse. Nous décrivons ensuite les motivations et objectifs principaux fixés puis précisons l'organisation du manuscrit.

Contexte

Cette thèse est le résultat d'une collaboration entre le Laboratoire d'Étude et de Recherche en Informatique d'Angers (LERIA) et l'unité Technology, Service and Operations (TSO) de British Telecom (BT).

British Telecom est l'opérateur historique des télécommunications au Royaume-Uni. Privatisé en 1984, l'entreprise doit faire face à une concurrence croissante sur les marchés de la téléphonie fixe et de la connexion à internet. British Telecom compte sur sa bonne qualité de service pour convaincre de nouveaux clients et fidéliser les anciens. Cette qualité de service repose sur des dizaines de milliers de sites disséminés à travers le pays et qui font l'objet d'une maintenance quotidienne. Cette maintenance est assurée par des milliers de techniciens qui vérifient le bon fonctionnement des pièces et remplacent les pièces défectueuses. Pour travailler efficacement et assurer une qualité de service élevée les techniciens doivent avoir à disposition les pièces nécessaires pour effectuer les remplacements de pièces défectueuses. Dans ce contexte, la gestion de la chaîne d'approvisionnement est primordiale. Elle doit permettre l'anticipation des défaillances et la mise à disposition immédiate des pièces nécessaires au maintien du service. Bien évidemment, la mise en place et la gestion d'une telle chaîne d'approvisionnement représentent un coût considérable, c'est pourquoi BT répare au maximum les pièces défectueuses pour limiter les coûts d'achats. Cette extension de la chaîne d'appro-

visionnement en boucle fermée complique considérablement sa gestion puisqu'elle nécessite une finesse supplémentaire. En effet, les pièces doivent être retournées vers un réparateur et réparées suffisamment rapidement pour être renvoyées au bon moment au bon endroit. Cette gestion est actuellement faite via un système automatique et corrigée manuellement. Toutefois, les problèmes de gestion et de répartition des pièces deviennent courants et posent de nombreuses difficultés aux équipes chargées de gérer la chaîne d'approvisionnement.

Afin d'améliorer cette gestion et de limiter les coûts, les experts ont contacté les chercheurs de TSO afin qu'ils leur fournissent un outil pour les aider à planifier les mouvements de pièces. C'est dans ce contexte que la thèse prend place. Elle fut réalisée à moitié dans le laboratoire LERIA à l'université d'Angers et à moitié dans le centre de recherche de BT situé à Ipswich en Angleterre. Cette intégration au sein de BT a permis une interaction hebdomadaire avec les autres chercheurs et surtout avec les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement. Cette interaction est à la base de ce manuscrit. Elle a permis de comprendre le fonctionnement interne de BT, d'accéder aux données de la chaîne d'approvisionnement et surtout de cibler et d'établir les objectifs de la thèse.

Motivations et objectifs

La problématique qui a motivé cette thèse est la nécessité de la mise en place d'un processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement de British Telecom.

Les problèmes de gestion des pièces dans une chaîne d'approvisionnement peuvent être abordés de plusieurs manières. Dans cette thèse, nous avons choisi de proposer une approche de planification tactique, principalement motivée par la qualité des données fournies. Cette approche devra permettre d'anticiper la résolution rapide des défaillances par l'envoi anticipé des pièces saines nécessaires au rétablissement du service. D'autre part, nous aborderons à travers cet outil deux problèmes qui sont celui de la gestion des rapatriements des pièces défectueuses dans une chaîne logistique inverse et celui de l'approvisionnement des pièces saines dans une chaîne d'approvisionnement classique. Ces problèmes sont souvent traités séparément alors que la synchronisation entre les deux approches nous paraît essentielle pour le bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement et devrait permettre de minimiser le coût global de la gestion de la chaîne d'approvisionnement représenté à travers les différents objectifs (rupture de stock, stockage, réparation, transfert). Ainsi une première partie de notre travail consistera en la proposition d'une modélisation pour le problème de planification tactique de distribution (TDPP) et d'une approche pour le résoudre.

Si les éléments précédents constituent le cœur de notre travail nous nous intéresserons également à la possibilité de mettre en œuvre des stratégies de gestion particulières (réapprovisionne-

ment juste-à-temps, réparation minimum) à travers l'introduction d'une fonction coût pondérée. Cette approche a pour but d'offrir une fonctionnalité supplémentaire. Toutefois, nous verrons que le paramétrage de la fonction coût peut s'avérer complexe, aussi nous investiguerons la possibilité de simplifier cette difficulté en proposant une hiérarchisation stricte des différents objectifs.

Enfin, nous n'oublions pas que l'objectif est la génération et l'application des plans au niveau opérationnel. Aussi, nous nous intéresserons aux différents facteurs (fréquence de recalcul, chevauchement entre les plans) qui doivent être pris en compte pour appliquer de manière optimale les plans générés. Nous étudierons également la possibilité de gérer les incertitudes avec l'approche proposée.

Chacun des points évoqués précédemment est associé à un problème complexe qui pourrait faire l'objet d'une étude à part entière.

Nous souhaitons proposer un outil générique applicable à une grande variété de chaînes d'approvisionnement et permettant de prendre en compte tous les aspects évoqués précédemment. L'objectif principal de la thèse est, par conséquent, le développement d'un prototype d'outil d'aide à la décision permettant la gestion des mouvements de pièces dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

Le schéma de l'outil complet d'aide à la décision est présenté sur la figure 1.

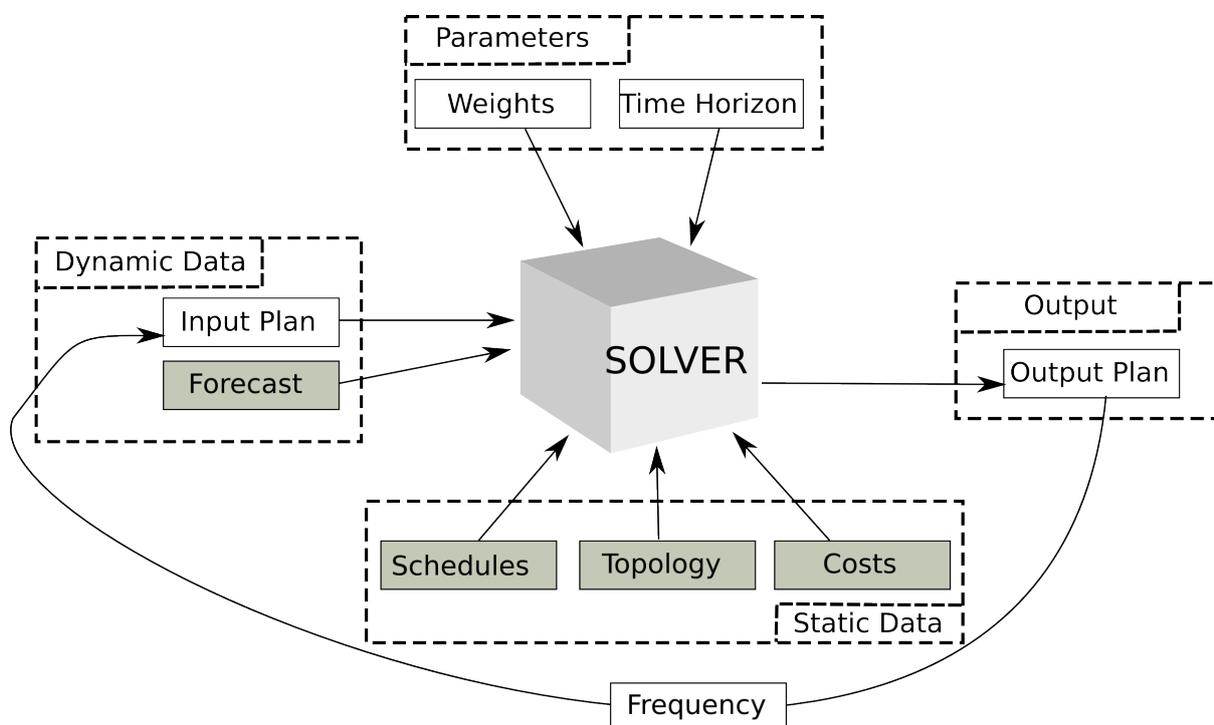


FIGURE 1 – Un système d'aide à la décision

Il est axé autour des différents éléments qui définissent une chaîne d'approvisionnement et

d'un solveur qui permet de résoudre le problème TDPP (Tactical Distribution Planning Problème) qui constitue le cœur de notre travail.

Organisation du manuscrit

Le manuscrit est organisé autour des points décrits précédemment.

Dans un premier chapitre, nous introduirons le domaine de la logistique et des chaînes d'approvisionnement. Il a pour but de définir les notions clés et de donner un aperçu de l'étendu du domaine de la logistique et de la variété des problématiques qui peuvent être rencontrées dans la gestion d'une chaîne d'approvisionnement.

Dans un second chapitre, nous expliciterons le problème concret de British Telecom et analyserons les points clés qui le caractérisent. Nous comparerons ce problème avec différents problèmes de la littérature et expliquerons les choix de conception faits dans notre système d'aide à la planification.

Dans un troisième chapitre, nous formaliserons le problème qui nous intéresse (TDPP) et établirons sa complexité.

Dans un quatrième chapitre, nous proposerons des méthodes pour résoudre TDPP et particulièrement une métaheuristique qui constituera le cœur du système. Nous réaliserons également une étude comparative entre 2 méthodes sur une variété d'instances.

Dans un cinquième chapitre, nous étudierons la possibilité de mettre en œuvre des politiques classiques de gestion en proposant une méthode de hiérarchisation stricte des objectifs de la fonction coût. En particulier, nous nous intéresserons aux politiques de coûts (e.g., minimiser le coût de réparation) et aux politiques opérationnelles (e.g., juste-à-temps).

Enfin, dans un sixième chapitre, nous investiguerons comment les plans générés par notre outil peuvent être appliqués opérationnellement et la capacité du système à faire face aux incertitudes sur les demandes.

Généralités sur les chaînes d'approvisionnement

1.1 Introduction

Depuis la seconde partie du XXème siècle, les entreprises sont confrontées à une concurrence de plus en plus importante. Cette concurrence est explicable entre autres par le développement du commerce international et de l'économie de marché. Dans ce contexte, il est essentiel pour les entreprises de s'appuyer sur une chaîne d'approvisionnement efficace nécessaire à leurs performances. Cette course à la performance pousse les entreprises à la recherche d'innovations pour optimiser la gestion de leurs chaînes d'approvisionnement.

Ces innovations se sont traduites par l'apparition d'un vaste panel de problèmes d'optimisation qui occupent maintenant une partie importante de la communauté recherche opérationnelle (RO).

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous attacherons à essayer de définir ce qu'est une chaîne d'approvisionnement. Dans une seconde partie, nous développerons les concepts et objectifs qui sont liés à la gestion de chaînes d'approvisionnement. Le chapitre a pour but de permettre au lecteur d'acquérir les notions principales qui sont liées à ce domaine et de visualiser la quantité de problèmes qui peuvent exister. Il ne s'agit pas d'expliquer en profondeur les différents points proposés. Pour une analyse plus détaillée, nous vous proposons de vous référer aux ouvrages de référence cités dans chaque section.

1.2 La chaîne d'approvisionnement

1.2.1 Un peu d'histoire

Il est difficile de situer temporellement l'origine des chaînes d'approvisionnement et de la logistique. Certains se réfèrent à la création des pyramides et à l'acheminement des pierres en 2700 avant J-C tandis que d'autres préfèrent se référer au commerce des phéniciens en mer méditerranée durant l'Antiquité (350 avant J-C). Comme souvent, le développement militaire a permis une véritable expansion et une étude approfondie de la logistique. En effet, les grands tacticiens ont rapidement compris l'intérêt de la logistique et a opposé des approches différentes. [Tzu \[400 BCE\]](#) dans son célèbre "Art de la guerre" explique que "une armée sans chariots d'approvisionnement ni céréales ni provisions est perdue". Au contraire, Alexandre le Grand (356-323 avant J.-C.) décida de brûler ses chariots d'approvisionnement avant de partir à la conquête de l'Inde pour augmenter la mobilité de ses troupes. Évidemment, cette tactique ne peut être efficace que si un ravitaillement a été prévu en avance ou si la région est hospitalière. Ainsi, on note dès l'Antiquité des conflits dans la manière de gérer la logistique mais aussi une prise de conscience de son importance.

Dans les années 60 avant J.-C., Jules César créa dans son armée la fonction de logista. Le logista était un officier chargé de mettre en place les campements et de gérer l'approvisionnement pour l'armée dans les villes soumises. C'est ici l'apparition des premiers logisticiens militaires.

L'importance de la logistique dans la gestion d'une armée est mise en exergue par l'empereur byzantin Léon VI (886-912) qui, dans son ouvrage sur la guerre intitulé "Tactique", présente la logistique comme l'un des arts essentiels de la guerre au même titre que la stratégie, la tactique, les fortifications, l'armement ou encore le service sanitaire [[Dornier et Fender, 2007](#)].

Il faut ensuite avancer dans le temps jusqu'au XIX^{ème} siècle et au règne de Napoléon Bonaparte pour voir une nouvelle expansion en matière de logistique.

Napoléon était persuadé de l'importance d'une logistique parfaite pour l'emporter sur le champ de bataille. Toujours à la recherche d'innovations et de tactiques plus efficaces dans ce domaine, il commença par développer une stratégie basée sur l'exploration du territoire à conquérir afin de définir les lieux clés pour l'approvisionnement de l'armée.

Sa stratégie a évolué par la suite. Il mit en place des chaînes d'approvisionnement hippomobiles qui faisaient le lien entre ses places fortes où sont installés dépôts et magasins, avec le corps principal de son armée. Toutefois, cette vision de la logistique l'a mené au désastre lors de la campagne en Russie. Les conditions climatiques empêchant la mise en place des ravitaillements rapides qu'affectionnait Napoléon, son armée s'est retrouvée privée de ses bases arrières causant sa défaite.

Cette défaite, comme ses victoires précédentes, montre l'importance de la logistique. C'est d'ailleurs l'un des anciens généraux de Napoléon, le baron Henri de Jomini qui fut l'un des premiers à introduire le terme de logistique en 1838 dans son ouvrage sur l'art de la guerre.

Dès lors, la logistique va se professionnaliser et revêtir une importance primordiale qui était encore délaissée par certains généraux.

Aux États-Unis, le général Grant va se distinguer lors de la guerre de sécession en mettant en place une stratégie d'approvisionnement dans ses armées mais également en faisant des réseaux d'approvisionnement sudistes des cibles de première importance.

En Europe, les guerres de la fin du XIX^{ème} siècle et du XX^{ème} siècle sont le théâtre de l'apparition d'une arme logistique redoutable : le chemin de fer. Le chemin de fer, bien que difficile à maintenir et à protéger, fut l'une des clés de la seconde guerre mondiale en matière d'approvisionnement de part les quantités de matériel qu'il pouvait transporter rapidement des lignes arrières vers le front.

Actuellement, les besoins militaires toujours grandissants font de la logistique un pan entier des armées.

Bien que la logistique trouve ses origines dans les conquêtes et les guerres, l'intérêt financier et commercial des chaînes d'approvisionnement n'a pas échappé longtemps aux industriels.

Nous expliquons dans la suite de ce chapitre les notions importantes inhérentes au domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et tentons d'explicitier pourquoi elle est cruciale pour le développement d'une entreprise.

1.2.2 Définition

Le terme chaîne d'approvisionnement - en anglais Supply Chain - fut utilisé pour la première fois dans le journal "The Independence" en 1905. Toutefois, il reste difficile de définir les termes "chaîne d'approvisionnement".

On trouve dans la littérature une multitude de définitions qui sont généralement dépendantes du problème traité. L'une des premières définition générique est proposée par [Beamon \[1999a\]](#) qui définit la chaîne d'approvisionnement comme étant : "un processus dans lequel un nombre variable d'entités (i.e., fournisseurs, fabricants, distributeurs, détaillants) travaillent ensemble afin de : (1) acquérir des matières premières, (2) convertir ces matières premières en produits finis spécifiques et (3) livrer ces produits finis aux détaillants. Cette chaîne est traditionnellement caractérisée par un flux aval de matières et un flux amont d'informations."

Cette définition présente la chaîne d'approvisionnement sous trois aspects qu'utilisent [Cormelli \[2008\]](#) et [Lemoine \[2008\]](#) pour la définir : les entités, les flux et les activités.

Pour [Christopher \[1999\]](#), les entités sont des organisations reliées entre elles qui produisent de la valeur à travers différentes activités. Pour [Beamon \[1999a\]](#), ce sont les fournisseurs, fabricants, distributeurs et détaillants. Les entités sont les nœuds physiques du réseau qui exécutent

différentes tâches telles que le stockage, la fabrication, ou encore la distribution afin de satisfaire un objectif qui est généralement la satisfaction du client à moindre coût.

Le second aspect est celui des flux. [Mentzer et al. \[2001\]](#) en proposent quatre dans leur définition de la chaîne d'approvisionnement :

- les flux de produits et de services. Ce flux est généralement un flux aval (des fournisseurs vers le client). Le but de ce flux est, dans la majeure partie des cas, la satisfaction du client.
- le flux financier. Il est généralement inverse aux flux de produits et de services. Il constitue la rétribution des différentes entités de la chaîne d'approvisionnement envers celles qui se trouvent en amont. Ce flux généralement est optimisé de manière locale par chacune des organisations indépendantes de la chaîne d'approvisionnement bien que, dans le cas d'une chaîne d'approvisionnement intra-organisationnelle (voir section 1.2.3), ce flux peut être optimisé de manière globale.
- le flux d'informations. C'est un flux essentiel au bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement. D'après [Comelli \[2008\]](#) et [Lemoine \[2008\]](#) il permet la coordination entre les flux physiques et financiers. Il contient également l'ensemble des données nécessaires au pilotage de la chaîne d'approvisionnement et à la réalisation des différentes activités.

Le dernier aspect représente les différentes activités effectuées au sein de la chaîne d'approvisionnement. Elles peuvent être variées et sont regroupées en quatre catégories par le "supply chain council"¹ dans le modèle SCOR. La figure 1.1 présente cette modélisation.

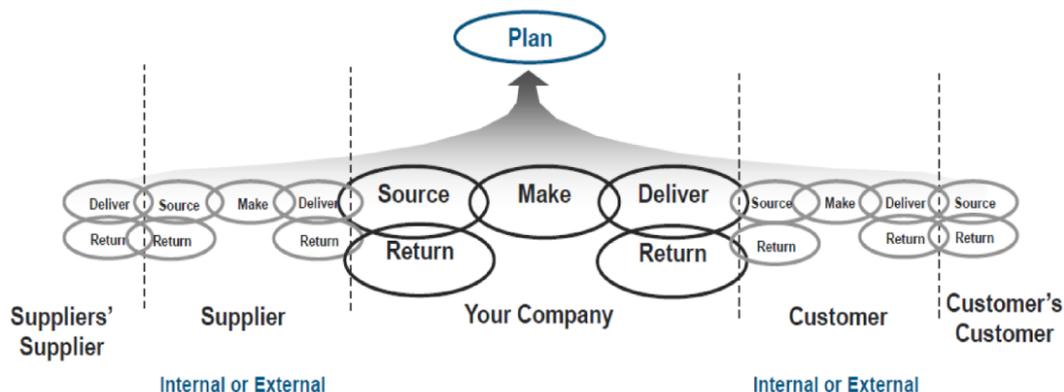


FIGURE 1.1 – Modèle SCOR (supply chain council)

Les différentes activités proposées sont :

¹Le supply chain council est une organisation à but non lucratif fondée en 1996 dont l'objectif est la modélisation des chaînes d'approvisionnement.

- “Source”, le processus d’approvisionnement qui fournit les biens et les services.
- “Make”, le processus de fabrication qui permet la transformation de matière première en produits finis.
- “Deliver”, le processus de livraison des biens et des services aux différentes entités de la chaîne.
- “Return”, le processus de retour d’objets pour diverses raisons (service après vente).

1.2.3 Chaîne intra-organisationnelle et Chaîne inter-organisationnelle

Les chaînes d’approvisionnement peuvent être inter-organisationnelles ou intra-organisationnelles. Une chaîne intra-organisationnelle est une chaîne au sein de laquelle toutes les entités sont gérées par une seule organisation. Une chaîne d’approvisionnement inter-organisationnelle est composée d’entités dont certaines sont gérées par différentes organisations. On peut noter qu’une chaîne d’approvisionnement inter-organisationnelle peut être composée de sous-chaînes d’approvisionnement intra-organisationnelles. Du point de vue de la gestion, nous verrons en section 1.3.3.1 qu’une chaîne intra-organisationnelle est généralement plus simple à gérer qu’une chaîne inter-organisationnelle.

1.2.4 Les topologies de chaînes d’approvisionnement

Nous utilisons le terme topologie (design) pour désigner la forme de la chaîne d’approvisionnement. On peut également noter l’utilisation courante du terme “échelon” qui désigne la profondeur (le nombre de niveaux de la chaîne).

On trouve une grande variété de topologies de chaînes d’approvisionnement souvent élaborées pour répondre au mieux à des problèmes concrets. Cela explique pourquoi il est ardu d’en retirer des schémas particuliers. [Huang et al. \[2003\]](#) dégagent plusieurs structures classiques de chaînes d’approvisionnement (exemples en figure 1.2) :

- Dyadique : composée de deux entités, généralement un vendeur et un acheteur.
- En série : suite de chaînes dyadiques, ce qui permet la représentation d’un circuit plus complexe.
- Divergente : structure en forme d’arbre qui permet de représenter la distribution d’un produit fini vers différents détaillants.
- Convergente : structure inverse de la chaîne convergente. Elle représente l’assemblage de différentes pièces pour construire un produit fini.

- Réseau : suite de chaînes divergentes et convergentes. La majorité des chaînes d'approvisionnement des grandes entreprises sont très complexes et ne peuvent être catégorisées que sous la forme d'un réseau.

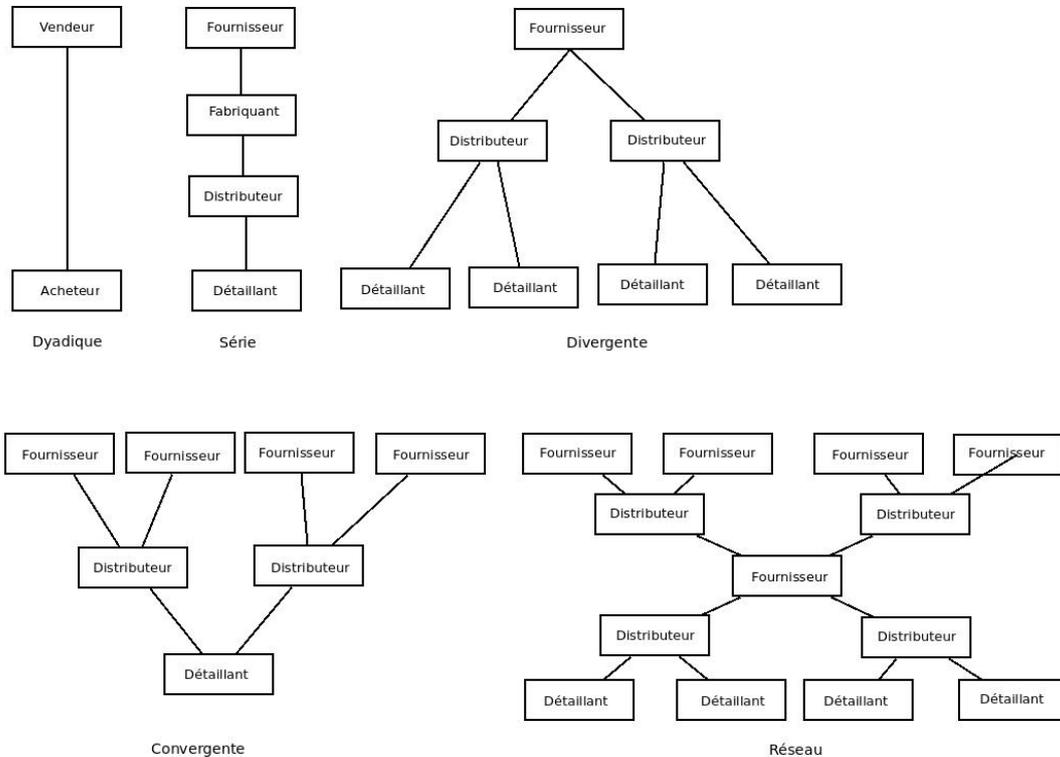


FIGURE 1.2 – Différentes structures de chaîne d'approvisionnement

On notera que [Huang et al. \[2003\]](#) précisent que la complexité de la gestion d'une chaîne d'approvisionnement va être dépendante de sa topologie.

1.3 Gestion de chaînes d'approvisionnement

La gestion de chaîne d'approvisionnement- en anglais Supply Chain Management (SCM) - est un sujet d'envergure qui s'intègre dans une grande variété de problèmes. C'est pourquoi la notion qui fut apparemment introduite par [Oliver et Webber \[1982\]](#) connaît un intérêt important depuis la fin des années 1990 jusqu'à nos jours. En effet, dès la fin du siècle précédent, il était difficile de trouver des travaux sur la fabrication, la distribution, le marketing, la gestion des clients ou encore le transport sans y voir associé le thème de la gestion de chaîne d'approvisionnement [[Ross, 1998](#); [Trent et Monczka, 1998](#)]. Les raisons de la popularité du concept sont multiples. On peut notamment évoquer la mondialisation qui a provoqué l'apparition de chaînes d'approvisionnement très difficiles à gérer. Également, le besoin des entreprises à être de plus en plus concurrentielles sur différents aspects tels que le coût de gestion ou encore les

temps de livraison [Mentzer et al., 2001]. Ainsi, une course à la performance fut lancée entre les entreprises de premier plan et provoqua l'intérêt général pour la gestion des chaînes d'approvisionnement car si une bonne gestion de la chaîne d'approvisionnement ne permet pas forcément à une entreprise de prospérer, une mauvaise gestion la fera sombrer.

1.3.1 Définition

De la même manière que pour les chaînes d'approvisionnement, il existe de multiples définitions pour leur gestion. Mentzer et al. [2001] proposent une étude très intéressante de ces définitions. Nous avons retenu quelques définitions présentées dans le tableau 1.1.

Stevens [1989]	“L'objectif de la gestion de chaîne d'approvisionnement est de synchroniser les besoins du client avec les flux de matériaux provenant des fournisseurs afin d'obtenir un équilibre entre les objectifs contradictoires que sont un niveau de service élevé, un faible coût de gestion d'inventaire, et un faible coût unitaire.”
Cooper et al. [1997]	“La gestion de la chaîne d'approvisionnement est une philosophie d'intégration dont le but est la gestion du flux de distribution depuis le fournisseur jusqu'au dernier client.”
Simchi-Levi [2005]	“La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, fabricants, entrepôts et détaillants afin que la marchandise soit produite et distribuée dans les bonnes quantités, aux bons sites et aux bons moments, afin de minimiser le coût global et de satisfaire le niveau de service requis.”
Christopher [2012]	“La gestion de flux amonts et avals entre clients et fournisseurs afin de livrer de la valeur au client à moindre coût pour l'ensemble de la chaîne.”
Seuring et Müller [2008]	“La chaîne d'approvisionnement recouvre les activités associées aux flux et à la transformation de biens depuis les matières premières jusqu'à l'utilisateur final ainsi que les flux d'informations associés. Les flux de matières et d'informations traversent la chaîne en amont et aval. La gestion de la chaîne est l'intégration de ces activités à travers des relations améliorées au sein de la chaîne pour obtenir un avantage compétitif et durable.”

TABLE 1.1 – Définitions de la gestion de chaîne d'approvisionnement

Stadtler et Kilger [2000] évoquent les points clés que l'on retrouve dans la majeure partie des définitions avec leur “maison” de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (figure 1.3).

Cette maison représente les trois points clés de la gestion de chaîne d'approvisionnement. Le premier point, le toit, représente les objectifs. Ils peuvent varier mais sont en général la compétitivité globale de la chaîne et la satisfaction des clients. Les deux autres points sont les piliers sur lesquels reposent le toit. Le premier est l'intégration qui représente l'organisation et

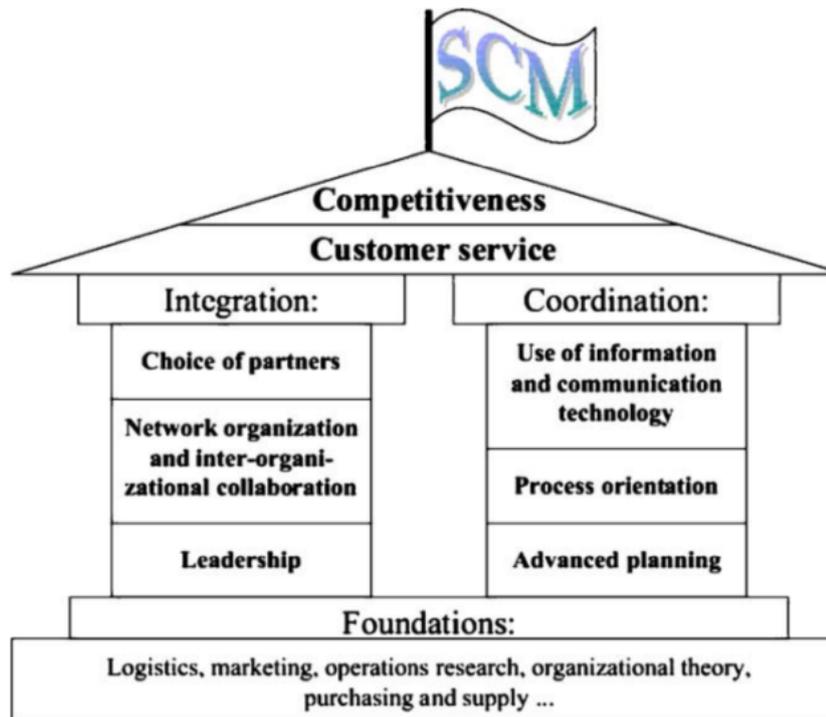


FIGURE 1.3 – La maison de [Stadler et Kilger \[2000\]](#)

la structure globale de la chaîne d’approvisionnement. Le second est la coordination entre les entités de la chaîne d’approvisionnement. On évoque ici, par exemple, la synchronisation entre les commandes et les livraisons.

Nous allons maintenant détailler les points clés de la gestion de chaînes d’approvisionnement.

1.3.2 Les objectifs de la gestion de chaînes d’approvisionnement

Le but principal de la gestion de chaînes d’approvisionnement est d’améliorer la compétitivité de la chaîne d’approvisionnement dans sa globalité. Afin d’atteindre cet objectif, il est nécessaire de s’intéresser à différents objectifs plus concrets.

Le plus important d’entre eux est en général la satisfaction du niveau de service exigé par le client [[Houlihan, 1985](#); [Jones et Riley, 1985](#)]. Le niveau de service est défini comme étant le pourcentage de demandes satisfaites à temps [[Fisher, 1997](#)]. Une demande est considérée comme satisfaite à temps si elle est satisfaite dans le temps spécifié par le contrat entre le fournisseur et le client - en anglais Service Level Agreement (SLA). Évidemment, toutes les entreprises peuvent satisfaire un niveau de service maximum. Il suffit d’investir dans des moyens de transports efficaces et dans suffisamment de stocks pour répondre à toutes les demandes ima-

ginables [Bowersox et al., 2002]. Toutefois, une telle gestion mènerait les entreprises vers la faillite car les dépenses engendrées seraient nettement supérieures aux bénéfices.

Il est par conséquent nécessaire de définir des objectifs transversaux à celui de la satisfaction du niveau de service. Ces objectifs peuvent être de limiter la quantité de stock présente dans la chaîne d'approvisionnement ou encore de limiter le nombre de trajets effectués. Dans le cas d'une chaîne d'approvisionnement avec boucle de réparation, on peut essayer de limiter le nombre d'achats d'objets pour éviter d'en introduire de nouveaux dans la chaîne ou encore essayer de dépenser aussi peu que possible en réparation. D'autres objectifs peuvent être plus dépendants de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi on peut par exemple évoquer les chaînes d'approvisionnement écologiques (green supply chain) dont l'un des objectifs principaux est de limiter l'énergie utilisée lors de l'ensemble des processus [Beamon, 1999b].

La définition des objectifs est une étape primordiale dans la construction d'une chaîne d'approvisionnement si l'on souhaite que celle-ci soit efficace.

1.3.3 Intégration et coordination

L'intégration et la coordination sont les deux piliers qui sont nécessaires à la bonne gestion d'une chaîne d'approvisionnement [Stadtler et Kilger, 2000].

L'intégration est en grande partie liée à la topologie de la chaîne d'approvisionnement. Lors de la création d'une chaîne d'approvisionnement ou de la modification de celle-ci, il est important de penser à l'intégration des nouvelles entités dans la chaîne pré-existante. En effet, si l'une des entités est en difficulté alors le reste de la chaîne sera également impliqué [Stevens, 1989]. L'intégration de la chaîne d'approvisionnement doit prendre en compte différents paramètres tels que la distance géographique entre les entités, les capacités de production et de stockage. Une bonne intégration de la chaîne d'approvisionnement permet d'obtenir une chaîne cohérente qui va faciliter la collaboration entre les différentes entités.

La coordination est relative à la gestion des différents flux qui circulent dans la chaîne d'approvisionnement. Elle doit permettre la livraison des bonnes pièces aux bons moments et aux bons endroits [Ullrich, 2013]. Nous allons maintenant introduire plusieurs notions importantes qui sont relatives à l'intégration et à la coordination.

1.3.3.1 Centralisation et décentralisation

On distingue généralement deux types de gestion de chaînes d'approvisionnement. Le premier type est la gestion centralisée. Cela signifie que les différentes décisions sont prises de manière globale. Il est nécessaire dans ce cas de connaître les informations sur l'ensemble des entités de la chaîne d'approvisionnement (i.e. niveau de stock, demandes). La mise en place de cette gestion est facilitée dans une chaîne intra-organisationnelle. À contrario, une gestion décentralisée est

une gestion dans laquelle chacune des entités prend ses décisions basées sur des informations locales [Lee et Billington, 1993].

Comme nous l'avons vu en section 1.3.1, la philosophie de la gestion de chaînes d'approvisionnement est de privilégier la vision globale de la chaîne d'approvisionnement, c'est-à-dire une gestion centralisée.

Ce choix s'appuie sur différentes études. Yu et al. [2001] nous présentent une étude de cas dans laquelle ils comparent trois systèmes de gestion d'une chaîne d'approvisionnement composée d'un client, d'un détaillant et d'un fournisseur. Le premier système est le système décentralisé dans lequel les entités n'ont pas d'informations sur les inventaires des autres. Le détaillant peut accéder aux commandes passées par le client et le fournisseur aux commandes qui lui sont passées par le détaillant. Le second système est un système intermédiaire dans lequel le fournisseur reçoit en même temps les informations sur les commandes du détaillant et sur les commandes du client ce qui permet une meilleure coordination entre les différentes entités. Enfin, le dernier système est un système centralisé dans lequel fournisseur et détaillant obtiennent de manière synchronisée les informations sur la commande du client. Le même modèle est appliqué aux trois systèmes afin de définir des politiques de réapprovisionnement optimales.

Les résultats sont présentés par la figure 1.4. Dans le second système les résultats obtenus par

Information sharing levels	Average order-up-to level		Average inventory level		Expected inventory cost	
	R	M	R	M	R	M
Level 1	-	-	-	-	-	-
Level 2	-	↓	-	↓	-	↓
Level 3	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓

Notes: R = retailer; M = manufacturer; - = the value equals that of Level 1; ↓ = the value is less than "-";
 ↓↓ = the value is less than "↓"

FIGURE 1.4 – Résultats de Yu et al. [2001]

le détaillant sont les mêmes que ceux obtenus dans le premier système. En effet, le détaillant ne possède pas d'informations supplémentaires donc la gestion reste la même. Pour le fournisseur, le second système permet d'obtenir plus d'informations et ainsi de réduire la part d'incertitude sur la commande du détaillant. Cela lui permet d'affiner sa politique d'approvisionnement et ainsi d'améliorer sa gestion des stocks. Le dernier système est positif pour le détaillant et le fournisseur. En effet, le détaillant connaît les temps d'approvisionnement du fournisseur ce qui permet de réduire les incertitudes et d'améliorer les choix qui sont faits. Cette réduction de l'incertitude permet d'améliorer la gestion du fournisseur et apparaît être bénéfique pour tous les éléments de la chaîne. La conclusion de cette étude de cas est l'avantage de la gestion centralisée par rapport à une gestion décentralisée notamment grâce à la réduction des

incertitudes dans la chaîne d'approvisionnement.

D'autres articles font état des avantages d'une gestion centralisée de la chaîne d'approvisionnement. On peut notamment citer le concept *VMI* (Vendor Managed Inventory) [Çetinkaya et Lee, 2000; Disney et Towill, 2003; Waller et al., 1999]. Dans le *VMI*, les décisions d'approvisionnement sont prises par une seule entité pour l'ensemble de la chaîne (généralement le fournisseur). Évidemment, ce mode de gestion suppose un partage total des informations entre les entités tant pour les niveaux de stock que pour les délais de fabrication et d'approvisionnement pour ne citer qu'eux. Le *VMI* et sa gestion centralisée comportent de nombreux avantages impossibles à mettre en place avec une gestion décentralisée. Nous dressons une liste non exhaustive des avantages apportés par ce mode de gestion. Cela offre la possibilité de plus simplement synchroniser les mouvements d'inventaire entre les différentes entités et ainsi de limiter les coûts de main d'œuvre et de stockage. Une connaissance de l'ensemble des données permet également une meilleure anticipation de la demande et une faculté accrue à absorber les incertitudes. Au niveau du transport cela limite les coûts grâce à une bonne synchronisation qui permet d'utiliser les moyens de transport au maximum de leurs capacités. Enfin, cela permet de mettre en place des schémas de transports plus intéressants et également une meilleure utilisation des stocks. Par exemple, si un client, n'utilise pas l'ensemble de son stock et qu'un autre est en pénurie, alors une partie du stock du premier client peut être envoyé au second.

L'ensemble des avantages explicités précédemment nous montre pourquoi, dans la philosophie de la gestion de chaîne d'approvisionnement, il apparaît essentiel de gérer la chaîne globalement et non pas localement.

1.3.3.2 Gestion des demandes et des stocks

Un élément essentiel pour établir la méthode de gestion de chaîne d'approvisionnement est la demande. La demande correspond à la quantité de produits commandée ou prévue par le client. La nature de la demande est fortement dépendante de la nature du produit qui lui est lié [Fisher, 1997; Lee, 2002]. Les produits peuvent être divisés en deux principales catégories : les produits fonctionnels et les produits innovants (voir figure 1.5). Les produits fonctionnels sont les produits basiques que l'on peut trouver dans n'importe quel centre commercial. Ces produits ont généralement une durée de vie longue et leur demande est stable et prévisible. Au contraire, les produits innovants sont des produits qui vont rapidement se démoder et dont la demande est largement dépendante non seulement de la qualité du produit mais aussi de facteurs subjectifs tels que les effets de mode. Aussi, il est très difficile de prévoir la demande pour ce genre de produits. Nous verrons en section 1.3.4 que cette incertitude est l'un des principaux freins à une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement.

Intimement lié à la gestion des demandes, l'autre axe de la gestion des chaînes d'appro-

Functional	Innovative
Low demand uncertainties	High demand uncertainties
More predictable demand	Difficult to forecast
Stable demand	Variable demand
Long product life	Short selling season
Low inventory cost	high inventory cost
Low profit margins	High profit margins
Low product variety	High product variety
Higher volume per SKU	Low volumes per SKU
Low stockout cost	High stockout cost
Low obsolescence	High obsolescence

FIGURE 1.5 – Les types de demandes

visionnement est la gestion des stocks. Cette dernière est primordiale d'après Waters [2008]. Elle doit permettre d'obtenir un équilibre subtil entre production et commandes. En effet, les cadences de consommation et de production ne sont pas toujours similaires, et il faut alors une gestion efficace des stocks pour éviter les excès qui peuvent être un volume trop faible de stock pour répondre aux demandes ou au contraire un surplus de stock. Ces risques sont dépendants du type de demandes auquel il faut répondre. En effet, les techniques de gestion des stocks qui vont être employées pour répondre aux demandes vont être significativement différentes.

Nous introduisons ici la notion de politique de gestion des stocks. Une politique de gestion des stocks se traduit par le choix d'une séquence de décisions (achat, vente, approvisionnement, etc.) dont le but est de minimiser le coût de la chaîne d'approvisionnement tout en maximisant les profits.

Nous divisons les politiques de gestion en deux catégories : les politiques de gestion proactives et les politiques de gestion réactives. Les politiques proactives produisent des séquences de décisions prises dans le but d'anticiper les demandes futures. Au contraire, les décisions prises par les politiques réactives font suite à un événement déclencheur (demande, niveau de stock sous un seuil, etc.).

Une politique proactive peut permettre un meilleur niveau de service et/ou une quantité de stock mobilisée moindre qu'une politique réactive. Il est toutefois nécessaire de disposer d'une prévision fiable de la demande future. Sans cela, la mise en place d'une politique proactive est inefficace et mènera soit à de nombreuses ruptures de stock, soit à une accumulation de stocks de sécurité. Dans le cas où les informations sur les demandes futures sont non fiables ou inexistantes, la mise en place d'une politique réactive sera préférée.

Évidemment, pour que le type de politique mis en place soit efficace, il est nécessaire que la topologie et les schémas de distribution mis en place lui soit dédié. Dans le cas d'une politique réactive, il est intéressant d'avoir une chaîne d'approvisionnement qui permet une production rapide des produits et des envois rapides vers le client. Dans le cas d'une politique proactive ce type de chaîne n'est pas nécessaire si la politique est bien définie. On évitera ainsi un surcoût de la chaîne d'approvisionnement. Quelques politiques seront détaillées en section 2.4.1.1.2.

La difficulté réside dans la mise en place de nouvelles politiques de gestions dans une chaîne d'approvisionnement qui n'est pas forcément adaptée.

1.3.4 Les difficultés de gestion

Nous avons vu en section 1.3.3.1 que pour que la gestion de la chaîne d'approvisionnement soit le plus efficace possible il est nécessaire d'adopter une gestion centralisée. Ce type de gestion est dépendant du partage des informations entre les entités. En effet, il est possible que des informations soient incertaines ou erronées (e.g., niveau de ventes inférieures à l'estimation, panne d'un véhicule, d'une ligne de production). L'incertitude est le plus grand ennemi de la gestion de chaîne d'approvisionnement, et son impact peut être rapidement dévastateur [Chen et al., 2000; Lee et al., 2004]. Mason-Jones et Towill [1998] insistent sur le fait que les compagnies qui "gèrent le mieux les incertitudes sont les plus compétitives sur le plan international".

Van der Vorst et Beulens [2002] proposent la définition suivante : "L'incertitude dans la chaîne d'approvisionnement se réfère à des situations dans lesquelles le décideur ne sait que faire car les objectifs sont imprécis ; il manque d'informations sur la chaîne d'approvisionnement ou son environnement ; il manque d'informations sur les capacités de production ; il n'est pas capable de prédire de manière efficace l'impact de certaines actions sur le comportement de la chaîne d'approvisionnement ou encore lorsqu'il manque d'actions efficaces et contrôlables".

Cette définition présente différents aspects desquels peuvent découler les sources principales d'incertitudes. Si la chaîne d'approvisionnement respecte les principes de coordination et d'intégration présentés précédemment alors la principale source d'incertitude se trouve être les fluctuations sur les différents flux de la chaîne d'approvisionnement. Ces variations peuvent apparaître sur les délais approvisionnement, niveaux de stock ou de demande dus à des imprévus externes ou internes à la chaîne [Fisher et al., 1997].

Les effets de ces incertitudes sont bien connus dans le monde de la gestion des chaînes d'approvisionnement et sont souvent présentés sous le terme d'effet coup de fouet (bullwhip effect). Ce terme décrit une propagation et une amplification des incertitudes au sein de la chaîne d'approvisionnement. La figure 1.6 représente un exemple de propagation de l'incertitude dans la chaîne d'approvisionnement.

Les facteurs provoquant cet effet coup de fouet sont multiples. Les techniques de prévisions de la demande peuvent par exemple amplifier l'incertitude, incertitude qui sera répercutée

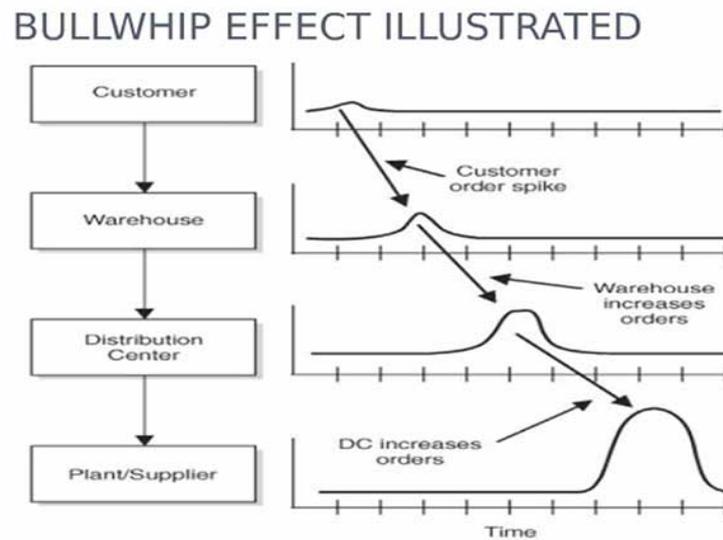


FIGURE 1.6 – Bullwhip effect

à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement. En effet, si un site augmente ses stocks pour être prêt à répondre aux demandes alors le site en amont devra lui aussi ajuster ses stocks et ainsi de suite jusqu'à provoquer un effet coup de fouet. Les variations de prix, telles que des promotions exceptionnelles, font également partie des facteurs aggravants. En effet, lors de promotions, il apparaît un pic de demandes suivi d'une baisse. Le total de produits consommés ne varie que très peu mais les variations dans les commandes provoquent d'importantes perturbations qui vont se propager dans la chaîne d'approvisionnement. Également, des temps d'approvisionnement longs amplifient l'effet car ils ne permettent pas de rétablir une situation correcte rapidement. D'une manière générale, l'effet coup de fouet est impossible à éliminer totalement dans une chaîne d'approvisionnement car tout élément qui va dégrader la stabilité de la chaîne va provoquer l'effet coup de fouet.

Les conséquences de cet effet coup de fouet sont multiples et néfastes pour la chaîne d'approvisionnement. Cela entraîne notamment un surplus de stocks dans la chaîne d'approvisionnement ou, au contraire, une incapacité à répondre aux demandes donc un mauvais service client. Dans les deux cas, le risque est une perte de profits et de clients. Évidemment, nous notons que plus la chaîne d'approvisionnement est étendue, plus les répercussions sont importantes.

Des solutions existent pour limiter l'effet coup de fouet. Premièrement, il est nécessaire que les informations partagées par les différentes entités soient exactes sinon il est préférable de travailler de manière décentralisée. Deuxièmement, il faut soit accroître la fiabilité des prévisions pour limiter l'incertitude qu'elles génèrent, soit limiter leur impact dans la méthode de gestion de la chaîne d'approvisionnement. Enfin, il est primordial de mettre en place une chaîne d'approvisionnement flexible qui sera capable d'absorber des variations imprévues des niveaux

de demande et ainsi limiter au maximum l'effet coup de fouet.

1.3.5 Les niveaux d'abstraction

Les différents problèmes qui ont trait à la gestion de chaîne d'approvisionnement se situent à différents niveaux d'abstraction. Ces niveaux d'abstraction sont au nombre de trois : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel.

1.3.5.1 Le niveau stratégique

Le niveau stratégique est le plus haut niveau d'abstraction. À ce niveau, la chaîne d'approvisionnement est considérée comme un tout et les décisions s'appliquent à l'ensemble de cette chaîne [Ackoff, 1974]. Les décisions prises à ce niveau déterminent la stratégie globale de l'entreprise et sont des décisions à long terme (plus de 18 mois). Les buts du niveau stratégique sont [Lummus et al., 1998; Stevens, 1989] :

- définir les buts et lignes directrices de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (quels coûts doivent être réduits, augmenter la flexibilité, assurer un haut niveau de disponibilité des produits, etc.).
- présenter la topologie et les modifications apportées à la chaîne d'approvisionnement ainsi que les points clés de la chaîne (entrepôts principaux, sites critiques, etc.).
- définir la stratégie concurrentielle de l'entreprise (quels seront les niveaux de service proposés, les temps d'approvisionnement, la gestion du service après-vente, etc.).

Le niveau stratégique met en place le cadre général sur lequel le niveau tactique va s'appliquer.

1.3.5.2 Le niveau tactique

Le niveau tactique concerne les décisions prises à moyen terme. C'est à ce niveau que l'on va trouver les étapes de prévision de la demande. Elles vont proposer les volumes à produire, stocker, déplacer, transporter dans la chaîne d'approvisionnement sur l'horizon de temps auquel le niveau tactique s'applique [Fox et al., 1993, 2000].

À ce niveau, on rencontre souvent la notion de planification tactique. D'après Génin [2003], le plan tactique est "l'ensemble des plans définissant les volumes de distribution de production et d'approvisionnement et la modulation de capacité des ressources pour satisfaire les besoins des clients finaux".

La planification tactique est l'élaboration d'un plan de décisions (achat, mise en production, envoi, réparation, etc.) qui va permettre de respecter les volumes proposés précédemment au niveau tactique tout en minimisant ou maximisant les objectifs définis au niveau stratégique.

1.3.5.3 Le niveau opérationnel

Le niveau opérationnel représente l'application quotidienne des décisions prises au niveau tactique. C'est à ce niveau que les stocks vont être réellement déplacés et que les produits vont être fabriqués, achetés et vendus. Si le but est le respect des décisions tactiques cela est parfois impossible à cause de facteurs extérieurs à la chaîne d'approvisionnement. Dans un tel cas et si la flexibilité de la chaîne d'approvisionnement n'est pas suffisante pour absorber les perturbations, il peut être nécessaire de régénérer un nouveau plan tactique.

La figure 1.7 récapitule les différences entre les niveaux d'abstraction.

	Stratégique	Tactique	Opérationnel
Objet	Attributs de la chaîne logistique	Volume de matière et niveau de ressources	Matières, Ordres
Objectif	Gain de part de marché, de rentabilité	Immobilisations stockées, optimisation des actifs circulants, rentabilité	Atteinte des volumes définis par le plan tactique
Rôle	Prospectif	Compromis	Programmation
Indicateurs	Quantitatif (parts de marché), ou qualitatif (leader sur tel marché de niche ...)	Quantitatif : fonction économique	Taux de respect
Unité d'œuvre	Economique, qualitatif	Economique	Unité, heure

FIGURE 1.7 – Les niveaux d'abstraction selon Génin [2003]

1.4 Des extensions à la gestion classique

Les sections précédentes décrivaient les chaînes d'approvisionnement et leur gestion d'après la vision classique que l'on a généralement d'une chaîne d'approvisionnement. Toutefois, si les chaînes d'approvisionnement classiques sont concernées par la distribution d'objets depuis le fabricant vers le client, on comprend aisément que des chaînes logistiques peuvent être également appliquées dans d'autres cas. Récemment, les enjeux écologiques et financiers ont provoqué l'émergence de la logistique "inverse" et de la gestion d'approvisionnement en boucle fermée. L'extension des chaînes d'approvisionnement classiques à ces nouvelles chaînes a également étendu le champ des problèmes existants et a provoqué l'apparition de nouveaux défis.

1.4.1 Logistique inverse

La logistique inverse - en anglais *reverse logistics* -, bien qu'évoquée dans les décennies précédentes, prend réellement son essor au début des années 1990 [Stock, 1992]. En effet, à cette époque plusieurs entreprises majeures prennent conscience des intérêts financiers des activités de recyclage et de réparation qui leur permettent, entre autres, de récupérer et de réutiliser des matériaux. Dès la fin des années 1990, de nombreuses industries démontrent l'intérêt des chaînes d'approvisionnements inverses. On notera l'exemple du fabricant d'imprimantes Xerox qui, en 1999, rapportait que 90% des équipements étaient recyclables et que les économies faites grâce à ce recyclage s'élevaient alors à plusieurs centaines de millions de dollars [Fleischmann et al., 1997]. D'autres industries telles que DCM, Canon, Dupont, font état à la même période de résultats similaires grâce aux chaînes logistiques inverses. Ces résultats économiques très encourageants ont confirmé l'intérêt global des industries pour les chaînes d'approvisionnement inverses. Dans le même temps, les gouvernements commencent à s'intéresser à l'écologie et insistent auprès des industries pour que l'impact environnemental soit considéré par les décideurs [Henriques et Sadorsky, 1996]. On notera notamment la directive européenne sur la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) qui deviendra une loi en 2003. Cette directive fut appliquée par la suite dans d'autres pays tels que le Canada, la Chine, le Japon et certains états des États-Unis [Georgiadis et Besiou, 2008; Quariguasi Frota Neto et al., 2010].

La logistique inverse fut définie de différentes manières [Álvarez-Gil et al., 2007; Dekker et al., 2013]. Certaines définitions sont axées principalement sur les motivations environnementales alors que d'autres sont centrées sur les aspects financiers. Enfin, certaines définitions tentent d'inclure les deux points précédemment cités [Kroon et Vrijens, 1995; Thierry et al., 1995].

Rogers et Tibben-Lembke [2001] proposent une définition basée sur les aspects financiers et décrivent la logistique inverse comme "le processus de planification, d'implémentation et de contrôle du coût des flux de matières premières, d'inventaire, de produits finis et des informations relatives à la gestion depuis le point de consommation jusqu'au point d'origine dans le but de récupérer la valeur de produits recyclés".

Carter et Ellram [1998] soulignent quant à eux les aspects environnementaux dans leur définition de la logistique inverse : "les processus grâce auxquels les compagnies peuvent devenir plus efficaces environnementalement en recyclant, réutilisant ; et réduisant la quantité de matériaux utilisés.

D'une manière générale, les définitions de la logistique inverse sont structurées en deux parties qui sont d'un côté les motivations et d'un autre côté les activités survenant dans une chaîne logistique inverse. Nous essayons de résumer l'ensemble des définitions en explicitant ces deux

approches. [Fleischmann et al. \[1997\]](#) proposent quatre aspects pour expliciter les différentes motivations :

- L'aspect économique. En effet, la reconversion ou réparation de produits usagés ou défectueux se révèle être généralement moins coûteuse que la production ou l'achat de produits neufs.
- L'aspect marketing. Cela permet d'une part, de proposer une politique de service après-vente efficace. D'autre part, l'entreprise peut développer une image d'entreprise écologique qui lutte pour le bien de l'environnement ce qui est actuellement mis en avant par la majorité des grandes entreprises.
- L'aspect environnemental. Bien que l'on puisse douter de la volonté de certaines entreprises d'investir dans la protection de l'environnement, les communautés d'états et états ont mis en place des lois sur l'écologie qui doivent être respectées sous peine de fortes amendes. Ainsi, les entreprises développent des systèmes de recyclage et de traitement des produits usagés.
- L'aspect protection des actifs. En effet, la proposition d'une chaîne de recyclage permet un meilleur contrôle des produits et évite une fuite vers les marchés et revendeurs secondaires.

D'autre part, [Thierry et al. \[1995\]](#) proposent la figure 1.8 pour décrire les différentes activités.

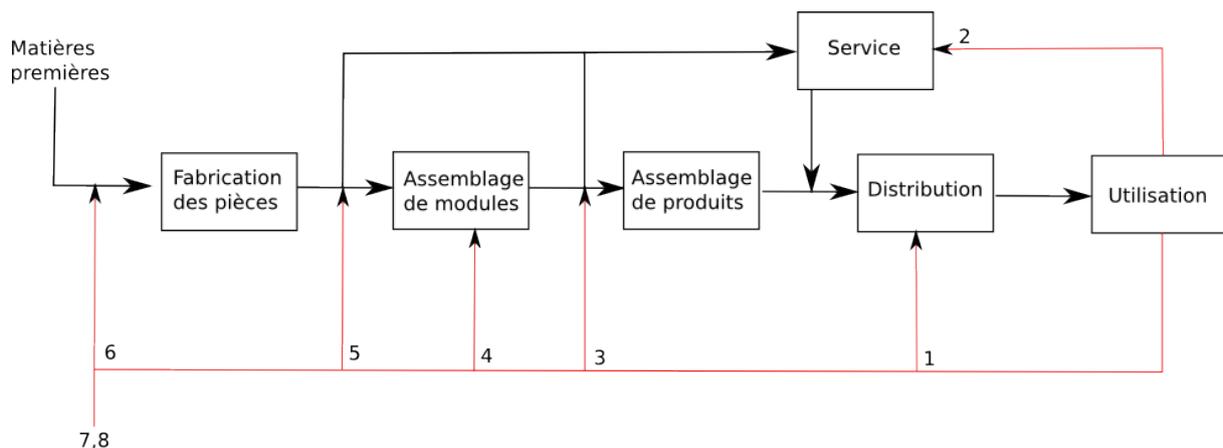


FIGURE 1.8 – La chaîne d'approvisionnement inverse selon [Thierry et al. \[1995\]](#)

Les activités appartenant au processus de logistique inverse y sont identifiées par les numéros 1 à 8 :

- 1 - Réutilisation/revente. Le produit renvoyé par l'utilisateur est fonctionnel et peut être renvoyé directement au distributeur.
- 2 - Réparation. Le produit est défectueux et est envoyé à un service qui va le réparer avant de le renvoyer au distributeur. L'opération de réparation comprend généralement un nombre limité de remplacements de pièces.
- 3 - Remise à neuf. La remise à neuf d'un produit se traduit par le remplacement de ses modules critiques par de nouveaux modules afin d'étendre sa durée de vie. La qualité d'un produit remis à neuf est généralement moindre que celle d'un produit neuf.
- 4 - Refabrication. La refabrication d'un produit est l'inspection de l'ensemble de ses modules et le remplacement de ceux qui ne sont plus à jour. Un produit refabriqué est d'une qualité équivalente à celle d'un produit neuf.
- 5 - Cannibalisation. Les parties saines du produit sont extraites pour être ensuite utilisées dans les processus 2, 3 et 4.
- 6 - Recyclage. Les matériaux composant le produit sont récupérés et recyclés. Contrairement aux étapes précédentes, l'identité du produit n'est pas conservée lors de l'opération de recyclage.
- 7, 8 - Incinération, Mise en décharge. Les parties du produit ne pouvant pas être recyclées sont détruites.

Une chaîne d'approvisionnement inverse est généralement composée d'un sous-ensemble des activités présentées précédemment afin de satisfaire à un sous-ensemble voire à l'ensemble des motivations décrites.

1.4.2 La boucle fermée

Nous avons vu jusqu'à présent que les chaînes d'approvisionnement classiques permettent d'envoyer des produits vers les clients et que les chaînes logistiques inverses permettent de faire remonter ces produits pour les recycler ou les réparer. Ces deux chaînes peuvent être combinées pour former une chaîne logistique en boucle fermée - en anglais closed-loop supply chain (CLSC). Cette notion fut présentée par [Guide et al. \[2003\]](#) comme une extension à la logistique inverse. Différentes définitions des CLSC existent. Nous retiendrons celle de [Guide et Wassenhove \[2006\]](#) : "la gestion d'une chaîne en boucle fermée décrit les processus de conception, de contrôle et de fonctionnement d'un système pour maximiser la création de valeur sur le cycle de vie d'un produit et la récupération de valeur grâce à des retours de différents types et volumes au cours du temps". Les CLSC sont généralement appliquées pour la gestion de produits à forte

valeur et dont la durée de vie est longue. Elles ne peuvent pas être utilisées dans le cadre de la consommation immédiate où les produits perdent rapidement de la valeur. Les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée sont très spécifiques et peuvent intégrer différentes composantes selon le type de produit traité. Leur gestion est généralement très complexe car ces composantes ne sont généralement pas dirigées par la même entité. De plus, les incertitudes présentes dans les chaînes classiques sur les demandes et les stocks sont également présentes dans les CLSC. À ces incertitudes s'ajoutent celles qui concernent le retour et la gestion des produits défectueux. Celles-ci sont multiples et peuvent par exemple concerner le temps de réparation, la possibilité de réparer une pièce ou non ou encore la quantité de défaillances.

Prenons maintenant l'exemple de la société fabricante de moteur diesel Cummins [Souza, 2013] dont la CLSC est représentée en figure 1.9. Nous retrouvons sur cette figure un flux aval

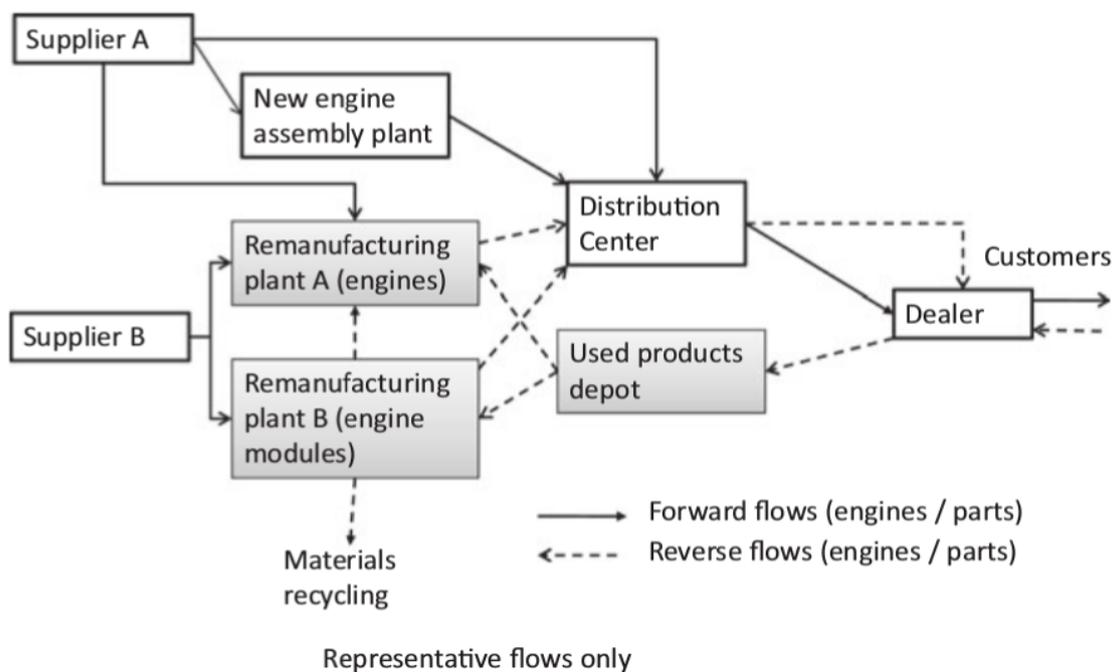


FIGURE 1.9 – La chaîne d'approvisionnement de Cummings selon Souza [2013]

de pièces saines (correspondant à une chaîne classique) vers le client et un flux amont de pièces défectueuses vers les sites de réparation (correspondant à une chaîne inverse). On considère généralement que, dans une CLSC, trois types d'objets peuvent être retournés par les clients. Les premiers et principaux sont les produits dits "en fin d'utilisation". Ces produits ne sont plus utilisés car plus nécessaires ou défectueux mais représentent malgré tout de la valeur. Les seconds produits sont les retours clients immédiats et correspondent à des produits peu ou jamais utilisés. Ces deux types de produits sont ceux qui nous intéressent dans le cas d'une CLSC. Ils sont retournés à des réparateurs qui vont procéder aux opérations 1, 2, 3 et 4 présentées dans la section 1.4.1. Les produits réhabilités peuvent ensuite être réinjectés dans la chaîne d'approvi-

sionnement classique. Le dernier type de produits est les produits "en fin de vie". Ces produits sont soit obsolètes, soit trop endommagés pour pouvoir être réhabilités. Ils sont alors recyclés et sortent du cadre de gestion de la CLSC [Ferguson et al., 2006]. Une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée permet donc le traitement à faible coût d'objets défectueux via une chaîne logistique inverse et leur réhabilitation dans une chaîne d'approvisionnement classique.

Nous comprenons alors que gérer une CLSC revient à administrer deux chaînes d'approvisionnement différentes qui pourraient être gérées indépendamment l'une de l'autre. Toutefois, pour l'intérêt des différents partis, il est préférable que ces chaînes soient gérées de manière simultanée et que la chaîne d'approvisionnement soit centralisée et intégrée. En effet, une synchronisation et un partage des informations entre les deux chaînes est nécessaire pour conduire à un fonctionnement efficace. Dans le cas contraire, la gestion pourrait aboutir à de nombreuses ruptures de stock (dûes par exemple à des quantités de pièces retournées mal estimées) et ainsi un surcoût de la chaîne d'approvisionnement globale. Par conséquent, si une CLSC permet de récupérer de la valeur de produits défectueux ou obsolètes, elle introduit en pratique plus de contraintes que la gestion d'une chaîne d'approvisionnement classique.

1.5 Conclusion

Ce chapitre introductif a présenté les principales notions rencontrées dans le domaine des chaînes d'approvisionnement. Nous avons également détaillé les notions qui seront réutilisées dans la suite de ce manuscrit. Certaines de ces notions et les problèmes qui sont liés seront détaillés dans les chapitres correspondants.

Problématique

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la problématique concrète à laquelle nous nous intéressons et listons ses points clés. Nous nous intéressons également à la littérature et confrontons les problèmes et solutions existants avec notre problématique. Le but est ici d'étudier si notre problématique a déjà été traitée ou si des problèmes connus sont suffisamment proches pour que les méthodes proposées y soient appliquées. Finalement, nous présentons une approche pour notre problématique et les motivations qui ont conduit à cette proposition.

2.2 Le cas réel

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse est initialement basé sur un problème proposé par les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement de British Telecom et répond à un besoin concret. Nous détaillons dans cette section ce cas réel et les difficultés actuellement rencontrées par British Telecom dans la gestion de leur chaîne d'approvisionnement.

2.2.1 Un besoin opérationnel

British Telecom (BT) est l'opérateur historique des télécommunications au Royaume-Uni. BT fournit de nombreux services à des millions de clients. Ces services sont divers et variés et vont de l'entretien des cabines téléphoniques nationales à la couverture du réseau mobile en passant par le développement de chaînes de télévision et d'un réseau internet. Pour assurer ces services,

BT s'appuie sur des ingénieurs de terrain qui se déplacent sur l'ensemble du territoire pour installer, maintenir ou réparer des pièces essentielles au bon fonctionnement. Pour accomplir leur tâche, les ingénieurs ont besoin d'une grande variété de pièces qui vont du simple câble réseau au circuit imprimé très spécifique. On comptabilise plusieurs dizaines de milliers de références de pièces bien que certaines soient très peu utilisées. Face à la diversité et à l'étendue du territoire à couvrir, les experts de BT ont compris qu'il était essentiel que les ingénieurs puissent accéder rapidement aux pièces. En effet, les avantages sont multiples : on augmente la qualité de service, réduit le coût des pénalités reçues lors du malfonctionnement d'un service et réduit le temps de trajet des ingénieurs augmentant ainsi leur capacité de travail. Pour satisfaire à ces besoins, ils ont mis en place une chaîne d'approvisionnement et des processus permettant d'alimenter des milliers d'entrepôts.

2.2.2 La chaîne d'approvisionnement de British Telecom

BT possède à travers le Royaume-Uni plusieurs milliers de sites de différents types avec des fonctionnalités différentes. Dans le cadre de ce manuscrit, nous nous limitons aux sites qui interviennent dans les processus d'acheminement et de retour des pièces. La chaîne d'approvisionnement est une chaîne divergente organisée selon un réseau en forme d'arbre (hub and spoke) et divisée en 4 niveaux dont 3 sont intégralement contrôlés par BT. Cette chaîne peut être considérée comme centralisée. En effet, toutes les entités (à l'exception du réparateur) étant contrôlées par BT, le partage de l'information est total. Nous détaillons ces 4 niveaux présentés sur la figure 2.1 :

- Le réparateur. C'est une entité qui n'est pas contrôlée par BT. Il réhabilite, vérifie ou remplace les pièces défectueuses. Un contrat avec BT stipule pour chaque type de pièce la durée maximale et le coût de réparation. Il permet la réinjection de pièces saines dans la chaîne d'approvisionnement.
- Le centre de distribution (Distribution Center). C'est le premier niveau contrôlé par BT et le centre névralgique du système. Ce centre, appelé Magna Park, est un entrepôt gigantesque dans lequel est stockée la majorité des pièces saines ou défectueuses. Il fait le lien entre le réparateur et les autres sites. Toutes les pièces transitent par cet entrepôt. Le coût de stockage y est considéré comme faible.
- Les Hubs. Ce sont les sites intermédiaires de la chaîne d'approvisionnement de BT par lesquels transitent les pièces avant leur destination finale. Ils sont au nombre de 6000 actuellement dans la chaîne d'approvisionnement. Le coût de stockage y est plus élevé que dans le centre de distribution.

- Les magasins ou sites clients (stores). Ils sont situés à l'extrémité de la chaîne d'approvisionnement et sont au nombre de 25000. Ils servent d'entrepôts de stockage pour assurer la prestation des services dans une zone donnée et permettent la gestion des défaillances dans cette zone. On peut s'abstraire de cette zone géographique et considérer ces sites comme des magasins sur lesquels les défaillances apparaissent. Le coût de stockage y est également plus élevé que dans le centre de distribution.

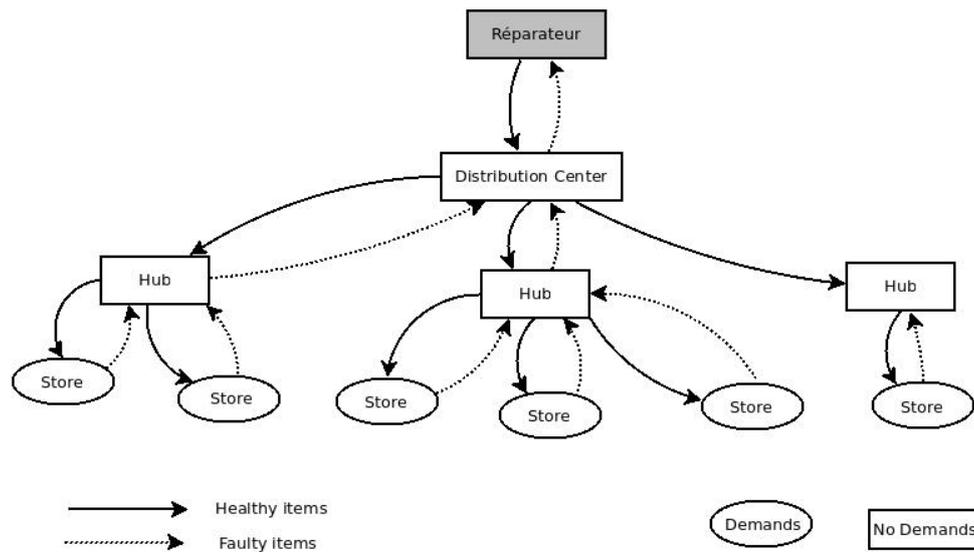


FIGURE 2.1 – Le réseau de British Telecom

Les flots entre les sites sont également contrôlés par BT. À chaque route entre deux sites est associée une fréquence (quotidienne, hebdomadaire, bi-hebdomadaire) qui définit les jours de ramassage et de livraison des pièces. Le transfert d'une pièce (approvisionnement d'une pièce saine ou retour d'une pièce défective) d'un site à un autre prend généralement 1 nuit et les calendriers d'acheminement sont fixés et ne peuvent pas être modifiés. On notera que les acheminements sont effectués indépendamment du volume de pièces transporté et que, par conséquent, le coût de transfert est considéré comme nul par l'entreprise.

La chaîne d'approvisionnement actuelle est probablement amenée à évoluer au cours des prochaines années. En effet, les décideurs de BT ont choisi de réduire le nombre de hubs et de magasins. L'ajout de transferts transversaux entre magasins est également envisagé.

2.2.3 Le processus de gestion

Nous expliquons ici le processus classique de gestion utilisé actuellement pour prendre en charge la défaillance d'une pièce au niveau opérationnel.

Actuellement, la gestion des défaillances est faite de manière réactive (un événement déclenche

une action) et est basée sur l'expérience des utilisateurs. Opérationnellement, lorsqu'une défaillance est détectée sur un site, un ingénieur de terrain est envoyé. Cet ingénieur effectue un diagnostic de la pièce. Si la pièce est estimée défaillante, l'ingénieur la retire et la pièce défaillante est stockée sur le site. Cette pièce est ensuite retournée vers le centre principal de distribution lors du prochain ramassage. Elle sera envoyée au réparateur puis renvoyée vers le centre de distribution et réutilisée dans la chaîne d'approvisionnement. Dans le même temps, la pièce défaillante doit être remplacée pour assurer la continuité du service. Plusieurs cas sont alors possibles :

- Une pièce saine stockée sur le site est utilisée pour résoudre la défaillance.
- Il n'y a pas de pièce saine proche du site et l'ingénieur doit attendre l'approvisionnement d'une pièce saine depuis un hub pour résoudre la défaillance. Le service peut être interrompu à ce moment.

Dans les deux cas, l'ingénieur émet une commande pour cette pièce sous la forme d'une requête de pièce informatisée appelée *RSR* (Repair Service Request). Cette requête est transmise au centre de distribution qui envoie une pièce saine vers le site dès que possible (en respectant les calendriers de livraison). La *RSR* est associée au site sur lequel la défaillance est apparue et servira soit à rétablir le stock soit à résoudre immédiatement la défaillance. Elle est close lorsque la nouvelle pièce est arrivée à destination. Le schéma 2.2 résume les processus utilisés lors d'une défaillance.

2.2.4 Les limites de ce système

Plusieurs difficultés sont actuellement rencontrées par les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement de BT. Tout d'abord, les processus évoqués précédemment reposent principalement sur le positionnement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Si, lorsqu'une défaillance apparaît, aucune pièce saine n'est disponible alors la résolution de la défaillance est différée jusqu'à l'envoi d'une pièce défini selon les calendriers d'acheminement entraînant parfois de longues périodes d'interruption de service. En pratique, ces processus sont souvent court-circuités par les gestionnaires qui envoient en urgence (par coursier) des pièces sur les sites entraînant ainsi un surcoût de transport et une perte de temps des gestionnaires.

De plus, le fonctionnement du système est intégralement basé sur les *RSR*. Une pièce ne peut être envoyée à un site que si un *RSR* est créé sur ce même site. Cette gestion des *RSR* est cohérente avec la politique de gestion théorique proposée par BT. Toutefois, en pratique si un ingénieur ne dispose pas de la pièce nécessaire dans le site concerné il peut aller la chercher sur un autre site proche. Dans ce cas, si un ingénieur satisfait une défaillance sur un site X avec une pièce récupérée sur un site proche Y, alors le *RSR* est créé sur le site X et une pièce saine

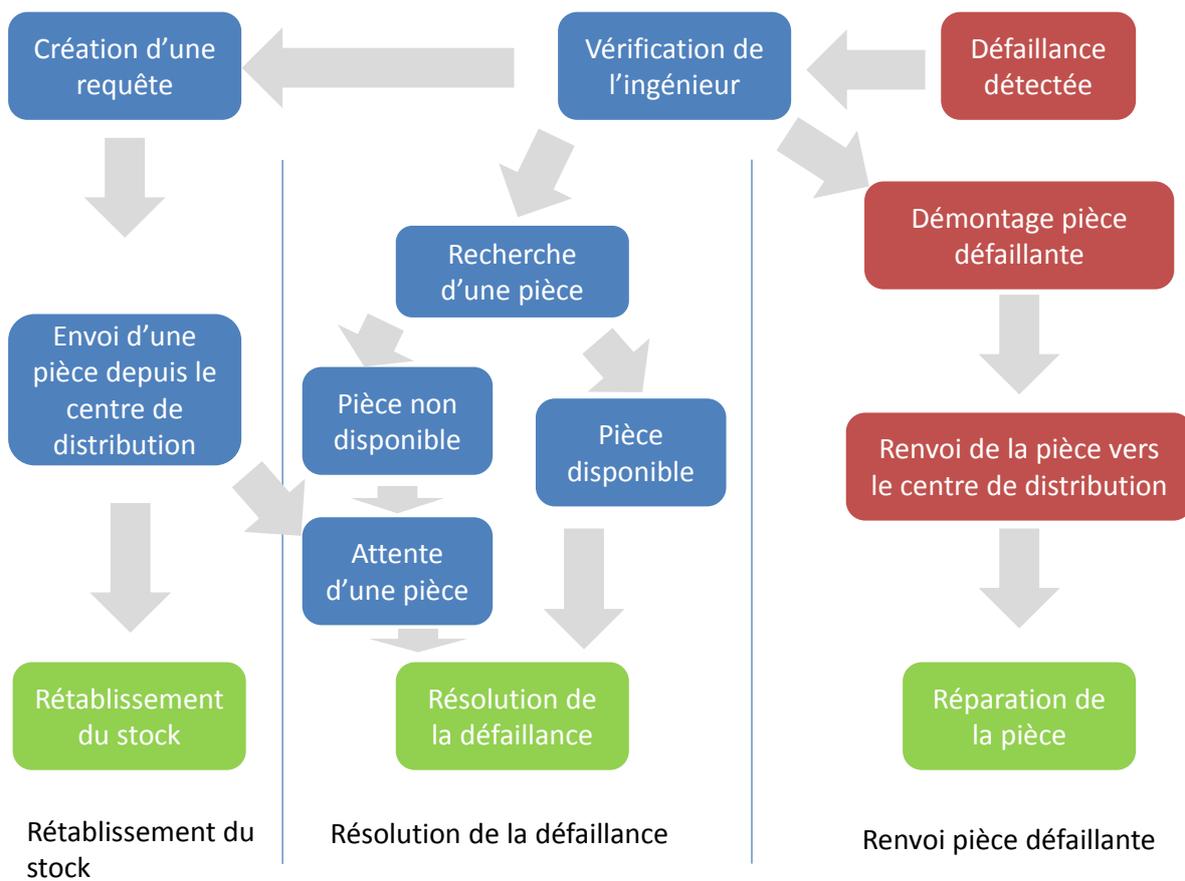


FIGURE 2.2 – Les processus de gestion

sera acheminée vers X et non vers Y. Ce fonctionnement, ajouté à des mauvaises informations parfois remontées par les ingénieurs, entraîne de forts déséquilibres dans la chaîne d’approvisionnement. Certains sites ont énormément de pièces en stock qui ne sont jamais utilisées alors que d’autres sont très peu pourvus en stock alors que les défaillances à traiter sont nombreuses. Pour limiter les difficultés, les gestionnaires sont obligés d’intervenir manuellement en créant de faux RSR pour rééquilibrer la chaîne. Toutefois, leur attention ne peut être concentrée sur l’ensemble des pièces et est limitée aux types de pièce les plus utilisées.

Actuellement, les problèmes de gestion s’accumulent. Les ruptures de stock et interruptions de service augmentent et le nombre de pièces stockées et inutilisées devient de plus en plus important. Les gestionnaires sont débordés par la tâche et n’arrivent plus à endiguer les problèmes. Aujourd’hui, le surcoût de la chaîne d’approvisionnement est estimé à plusieurs dizaines de millions d’euros faisant de sa bonne gestion une priorité. Il est nécessaire d’apporter une solution permettant de limiter les coûts. La décision a donc été prise d’utiliser un **outil d’optimisation pour gérer les niveaux de stock et la distribution des pièces** au travers de la chaîne d’approvisionnement.

2.3 Points clés

Nous listons ici un résumé des points clés du problème de distribution évoqué précédemment. Ces points clés sont exprimés à partir des informations fournies par les experts de BT et constituent la base des méthodes proposées dans ce manuscrit.

- La topologie. La chaîne d’approvisionnement actuelle est en boucle fermée et de forme arborescente. Elle pourrait être amenée à évoluer aux cours des prochaines années.
- Les calendriers d’acheminement. Les calendriers d’acheminement sont fixes et définis selon une fréquence. Cette fréquence varie d’un site à l’autre mais ne peut pas être modifiée.
- Les demandes. Les demandes constituent un calendrier prévisionnel des défaillances à venir ou des pièces à maintenir. Dans le cadre des opérations de maintenance, ces demandes sont connues et certaines. Dans le cadre de gestion des défaillances, ce calendrier prévisionnel n’est pas toujours précis. Toutefois, les méthodes de prévision de BT permettent de générer un calendrier précis pour les pièces les plus utilisées et d’établir ainsi pour un site et une période de temps donnés le volume de défaillances qui se produiront.
- Le réparateur. Le contrat avec le réparateur stipule que les pièces doivent être remplacées ou réparées dans un délai imparti. Quelques incertitudes peuvent apparaître au niveau du délai de réparation mais celui-ci est généralement respecté.
- Le stock. Deux types de pièces circulent dans la chaîne d’approvisionnement : les pièces saines et les pièces défaillantes. Les pièces défaillantes peuvent être réparées pour être réutilisées. La capacité de stockage est considérée comme étant illimitée sur l’ensemble des sites.
- Le volume de pièces. Le volume de pièces global est limité dans la mesure où l’on travaille en boucle fermée. BT n’a accès ni à un vendeur ni à un acheteur pour introduire ou faire sortir des pièces de la chaîne d’approvisionnement .
- Les coûts. Les coûts sont des coût unitaires par objet par période de temps. Ils peuvent différer selon les sites et les pièces. Les différents coûts sont le coût de stockage, le coût de réparation et le coût de rupture de stock. Les calendriers d’acheminement étant figés et indépendants du volume de pièces transportées, le coût de transfert est ignoré. Il pourrait toutefois être intéressant d’inclure la possibilité de le prendre en compte si une évolution amenait les experts de BT à le considérer. Nous notons également que les ruptures de stock sont considérées comme un coût et non comme une contrainte forte. Si la création d’une rupture de stock permet de globalement obtenir un gain alors une rupture de stock peut apparaître.

2.4 Les méthodes de gestion et de distribution d'inventaire

Les méthodes existantes pour gérer et distribuer les pièces dans une chaîne d'approvisionnement sont multiples. Nous nous intéressons ici aux méthodes les plus utilisées et à différents problèmes connus connectés à notre problématique. Nous commencerons par discuter des méthodes appliquées dans les chaînes d'approvisionnement classiques puis de celles utilisées en boucle fermée. En effet, bien que notre problématique prenne place dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, il nous apparaît important de commencer par s'intéresser aux approches plus classiques. Deux principales raisons motivent ce choix. D'une part, les méthodes utilisées en boucle fermée sont généralement dérivées des méthodes appliquées en chaîne classique.

D'autre part, l'utilisation d'une boucle fermée restreint le volume de pièces en entrée. On pourrait imaginer simuler le fonctionnement du réparateur en utilisant un vendeur auquel on achèterait les pièces et appliquer les méthodes de gestion connues pour gérer séparément l'approvisionnement des pièces saines et le retour des pièces défectueuses.

2.4.1 Les méthodes utilisées en chaîne d'approvisionnement classique

Différents problèmes et par conséquent différentes méthodes existent pour gérer et distribuer l'inventaire dans les chaînes d'approvisionnement. Nous commençons par nous intéresser au problème de gestion des stocks, puis au problème de distribution des stocks et enfin à l'intégration de ces deux problèmes.

2.4.1.1 Les méthodes de gestion des stocks

Nous présentons ici quelques méthodes de gestion et de contrôle de l'inventaire. Ces méthodes sont généralement des méthodes locales c'est-à-dire qu'elles sont appliquées sur un nœud (un site) particulier de la chaîne d'approvisionnement. Elles peuvent être appliquées dans une chaîne d'approvisionnement décentralisée.

2.4.1.1.1 Economic Order Quantity

L'Economic Order Quantity (EOQ) proposée par [Harris \[1913\]](#) est probablement la méthode la plus utilisée pour gérer les niveaux des stock. Le but de cette méthode est de minimiser les coûts de commande et de stockage tout en satisfaisant la demande. Cette méthode est basée sur différentes hypothèses telles que la consommation régulière et un délai de livraison fixe. Cette méthode déclenche la commande d'une quantité Q de pièces dès que le niveau de stock atteint 0. La quantité Q est déterminée par la formule 2.1 où D dénote la demande annuelle, K le coût

de lancement d'une commande et h le coût annuel de stockage.

$$Q = \sqrt{\frac{2DK}{h}} \quad (2.1)$$

Cette méthode est simple et efficace mais extrêmement restrictive dans les hypothèses posées (demande constante, coût fixe, stocks illimités, ...) qui restreignent son champ d'application.

2.4.1.1.2 Les politiques classiques de gestion de stock

L'autre approche la plus courante pour gérer des stocks est sans doute l'utilisation d'une politique de gestion. Nous avons introduit cette notion de politique en section 1.3.3.2. Les politiques de gestion sont des modèles qui permettent de déterminer quand et quelle quantité de stock il est nécessaire de commander. Les politiques de gestion sont nombreuses et beaucoup de variantes existent. Nous détaillons ici quelques unes des politiques les plus connues.

Les politiques classiques de gestion peuvent être divisées en plusieurs catégories selon le moment où le réapprovisionnement est déclenché et selon la quantité demandée [Chen et al., 2006; Rao, 2003].

Quand réapprovisionner ? [Arda, 2008]

- **Gestion calendaire** : Le stock est réapprovisionné à un intervalle régulier r . Cette politique permet une gestion périodique des stocks. La période de réapprovisionnement est synchrone avec les calendriers d'acheminement.
- **Gestion à point de commande** : Le réapprovisionnement est fait lorsque le niveau de stock est inférieur à un point de commande s (seuil). Cette gestion est mise en pratique dans les systèmes à revue permanente de l'inventaire.
- **Gestion calendaire conditionnelle** : Cette catégorie mélange les deux précédentes. Le réapprovisionnement est fait de manière périodique et uniquement si le niveau de stock est inférieur au point de commande. Cette technique peut être utilisée dans les systèmes où le coût de commande est particulièrement important.

En quelle quantité ? [Bahloul, 2011]

- **Approvisionnement en quantité fixe** : La quantité approvisionnée Q est toujours la même. Cette méthode d'approvisionnement est plus simple pour le distributeur qui envoie toujours la même quantité.

- **Approvisionnement en quantité variable** : La quantité approvisionnée dépend d'un seuil maximal S . Elle correspond à la différence entre S et le niveau de stock au moment où la commande est passée. Cette méthode favorise le client qui peut adapter son stock aux consommations et aux demandes.

Nous détaillons les 6 politiques obtenues à partir des combinaisons possibles et qui constituent les politiques de gestion les plus communes :

La politique r, Q [Federgruen et Zheng, 1992]

À chaque période de temps r , on réapprovisionne le site avec une quantité fixe Q . Cette politique est décrite en figure 2.3.

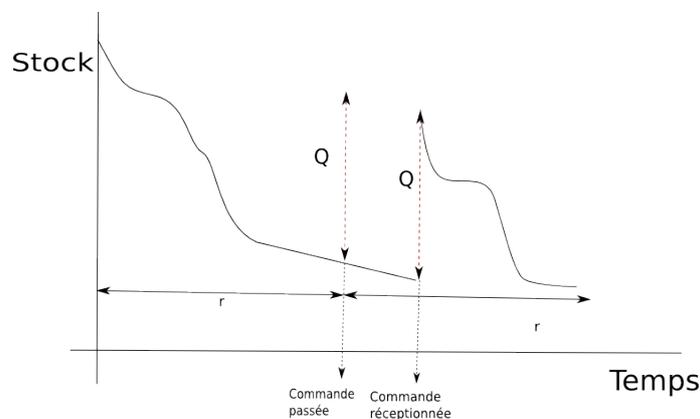


FIGURE 2.3 – Politique r, Q

La politique r, S [Jensen et Bard, 2001]

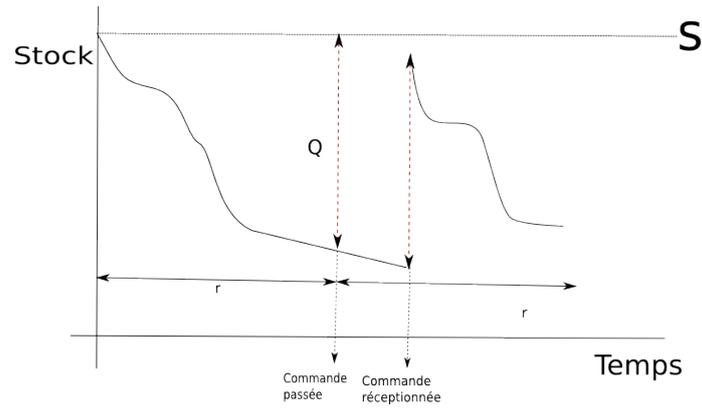
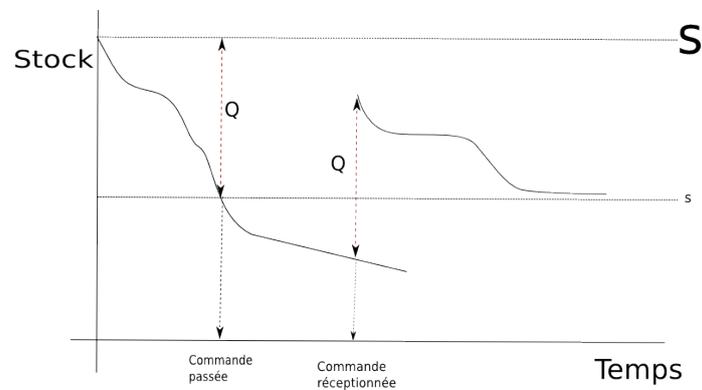
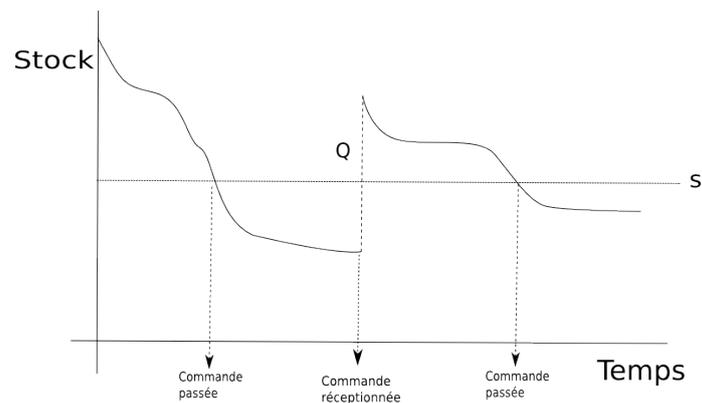
À chaque période de temps r , on réapprovisionne le site jusqu'à une quantité seuil S . Cette politique est décrite en figure 2.4.

La politique s, S [Arrow et al., 1951]

Le site est réapprovisionné lorsque le niveau de stock est inférieur à un seuil défini s . La quantité réapprovisionnée Q est variable et est définie selon le seuil supérieur S tel que $Q = S - I$ où I dénote le stock au moment où la commande est passée. Cette politique est décrite en figure 2.5.

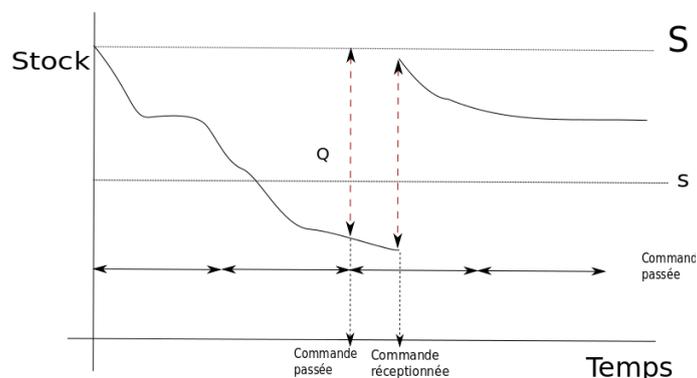
La politique s, Q [Hong et Hayya, 1990]

Le site est réapprovisionné par une quantité fixe Q de pièces lorsque le niveau de stock est inférieur au seuil s . Cette politique est décrite en figure 2.6.

FIGURE 2.4 – Politique r, S FIGURE 2.5 – Politique s, S FIGURE 2.6 – Politique s, Q

La politique t, s, S [Wensing, 2011]

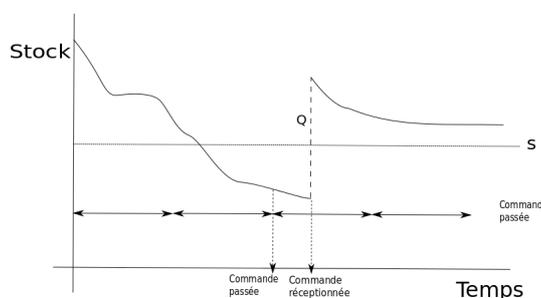
Cette politique est le pendant périodique de la politique s, S . Le stock n'est pas révisé périodiquement mais à toutes les périodes t . Si, à une période t , le niveau de stock est inférieur à s alors on réapprovisionne jusqu'à S . Cette politique est décrite en figure 2.7.

FIGURE 2.7 – Politique t, s, S

La politique t, s, Q [Wensing, 2011]

De la même manière que la politique t, s, S , cette politique est la version périodique de la politique s, Q . A chaque période t , le site est réapprovisionné avec la quantité Q si le niveau du stock est inférieur au seuil s . Cette politique est décrite en figure 2.8.

Ces politiques présentent différents avantages et inconvénients et seront plus ou moins efficaces selon la chaîne d'approvisionnement à laquelle elles sont appliquées. De plus, le choix seul de la politique de gestion n'est pas suffisant pour assurer un bon fonctionnement. En effet, il faut également paramétrer correctement la politique utilisée. Les paramètres sont multiples (périodes, seuils, quantités) et leur configuration peut s'avérer délicate. Cette configuration dépend de différents facteurs (demande moyenne, forme du réseau, nombre de sites, ...) et est géné-

FIGURE 2.8 – Politique t, s, Q

ralement faite au cas par cas. Différents articles présentent des modèles pour configurer une politique de gestion dans différents cas concrets (fournisseurs multiples, demandes aléatoires, temps d'approvisionnement variables, ...).

2.4.1.1.3 Remarques sur les méthodes de gestion des stocks

Les méthodes de gestion des stocks sont des méthodes très utilisées dans les chaînes d'approvisionnement réelles. Elles comportent en effet l'avantage d'être simples à appliquer et peuvent fonctionner de manière autonome sur chaque site dans le cadre d'une gestion décentralisée. De plus, certaines des versions étant extrêmement réactives, elles permettent de gérer particulièrement bien les variations de la demande et l'absence de prévision. Cependant, dans le contexte de notre problématique, elles ne permettent pas de planifier la distribution des pièces et ne tirent pas avantage de la centralisation de la chaîne d'approvisionnement. Enfin, ces politiques sont généralement déterminées en fonction d'une chaîne d'approvisionnement précise et sont peu robustes aux évolutions (contraintes supplémentaires, modification du réseau) qui pourraient survenir.

2.4.1.2 La distribution des stocks

Les problèmes de distribution de stocks visent à proposer les mouvements de pièces nécessaires à la satisfaction des commandes passées par le client (par le biais des politiques de gestion des stocks par exemple). La gestion de la distribution de stocks nécessite une vue globale du réseau de distribution de la chaîne d'approvisionnement. Toutefois, il ne faut pas confondre cette vision globale avec une centralisation de la chaîne d'approvisionnement. En effet, cette vision globale se traduit par une vision de l'ensemble du graphe qui représente la chaîne d'approvisionnement (nœuds et arcs) mais ne permet pas forcément d'accéder à l'ensemble des informations relatives aux nœuds (niveaux de stock, coût de stockage, ...).

Les problèmes de distribution, bien que n'incluant pas nécessairement un aspect temporel (les problèmes classiques travaillent sur une unique période de temps), peuvent être considérés comme des problèmes de planification. En effet, ils fournissent en sortie un ensemble de mouvements de pièces et l'ordre dans lesquels ces mouvements doivent être exécutés ce qui correspond à la définition d'un plan.

Nous présentons ci-après un exemple de problème de distribution et discutons de son applicabilité à notre problématique.

2.4.1.2.1 Problème de tournées de véhicules

Le problème de tournées de véhicules - en anglais Vehicle Routing Problem (VRP) - est l'un des problèmes d'optimisation combinatoire et de planification les plus étudiés. Il fut pour la

première fois présenté par [Dantzig et Ramser \[1959\]](#). Depuis cette introduction, des milliers d'articles ont été publiés sur ce sujet, proposant différentes méthodes exactes ou approchées pour résoudre ce problème ou l'une de ses variantes.

Dans sa version commune, le VRP est un problème de décision *NP-complet* [[Lenstra et Kan, 1981](#)]. Le VRP peut être défini sur un graphe complet $G = (V, E)$ où $V = 0, 1, \dots, n$ est un ensemble de nœuds et E un ensemble d'arcs. Le nœud 0 est le dépôt principal d'où partent m véhicules identiques de capacité W . Chaque nœud $i > 0$ représente un client avec une demande $q_i > 0$. A chaque arc (i, j) est associé un coût d'acheminement non négatif et symétrique tel que $c_{ij} = c_{ji}$. Le VRP consiste alors à planifier un ensemble de m tournées de véhicules de coût minimal tel que chaque tournée commence et finisse au dépôt principal et que chaque client soit visité une unique fois [[Prins, 2004](#)]. Cette version du VRP étant rarement applicable en réalité, une multitude de variantes ont été développées. Les plus connues d'entre elles sont le CVRP (Capacitated VRP) et le HVRP (Heterogeneous fleet VRP) qui ajoutent des contraintes de capacité sur les véhicules. D'autres extensions traitent des demandes stochastiques (VRPSD) ou incluent le déplacement de personnel entre les sites (DARP, DAFP). Enfin, une variante spécifique que chaque client doit être visité durant une fenêtre de temps précise (VRPTW) [[Pillac et al., 2013](#)].

La question qui nous intéresse est de savoir si un modèle de VRP peut être applicable à notre problématique. De manière simple, le VRP apporte une solution à la distribution de pièces dans une chaîne d'approvisionnement. Le VRP est guidé par les commandes des clients et non par une prévision datée future. Pour satisfaire ces commandes, la détermination des tournées n'est pas contrainte par un réseau d'acheminement (e.g., chaîne multi-échelon) et l'aspect temporaire est négligé dans la majorité des modélisations. De plus, l'objectif principal du VRP est de limiter le coût de transport. Dans notre problématique, les calendriers de tournées sont prédéterminés et les objectifs sont multiples (ruptures de stocks, stockage, réparations). Les deux problèmes ont des objectifs et des contraintes totalement différents qui ne permettent pas de modéliser celui auquel nous sommes confrontés comme un VRP.

2.4.1.2.2 Remarques sur les problèmes de distribution

Les problèmes de distribution de stock dans une chaîne d'approvisionnement sont nombreux et variés. Certaines extensions du VRP par exemple, permettent se rapprocher de certaines contraintes de notre problématique (e.g., problème de tournées avec fenêtres de temps [[Gambardella et al., 1999](#)]). Le principal défaut de ces problèmes de gestion de la distribution de stocks est que, par essence, leur objectif est limité au coût de distribution. Dans ce contexte, la gestion de l'inventaire n'est pas prise en compte ce qui limite l'intérêt pour ces méthodes pour faire face à notre problématique. Une solution pourrait être le couplage des méthodes de gestion des stocks utilisées localement sur les sites avec les méthodes de distribution de stocks. Toutefois,

cette solution n'est pas la plus satisfaisante car elle ne permet pas d'utiliser les avantages de la centralisation de la chaîne d'approvisionnement. D'autres approches permettent une intégration directe de ces deux problématiques comme nous allons le voir en section 2.4.1.3.

2.4.1.3 Intégration de la gestion et de la distribution des stocks

Plusieurs approches visent à intégrer les problématiques de distribution et de gestion des stocks. Ces approches nécessitent d'être appliquées dans une chaîne d'approvisionnement centralisée afin d'avoir à la fois les informations sur le réseau d'approvisionnement et sur les différents niveaux de stock. Ces problèmes sont apparus avec l'émergence du modèle VMI qui démontrait l'importance de la gestion centralisée des chaînes d'approvisionnement (voir section 1.3.3.1). Ils permettent la gestion proactive des chaînes d'approvisionnement en proposant une planification des opérations à réaliser sur une période de temps donnée et s'appuient sur des prévisions de la demande. Nous présentons ici deux problèmes d'intégration de la gestion et de la distribution des stocks.

2.4.1.3.1 Problème de tournées d'inventaire

Le problème de tournées d'inventaire - en anglais Inventory Routing Problem (IRP) - est un problème *NP-complet* [Bertazzi et al., 2002] dédié à l'intégration de 2 aspects de la gestion des chaînes d'approvisionnement qui sont la gestion des stocks et leur distribution [Campbell et al., 1998].

L'IRP est concerné par la distribution d'un produit depuis un dépôt principal vers un ensemble de n clients pour un horizon de temps donné de taille T . Les clients consomment le produit à un taux connu u_i et ont une capacité de stockage maximum C_i . Le niveau de stock du client i est I_i à la période de temps 0. Une flotte de m véhicules de capacité Q est disponible pour la distribution. Le but du problème est alors de minimiser le coût de distribution sur l'horizon de temps tout en évitant les ruptures de stocks [Bertazzi et Speranza, 2012]. Les différences majeures entre un VRP et un IRP sont dues à la gestion centralisée de la chaîne d'approvisionnement. En effet, le distributeur a accès à une prévision de la demande et au niveau de capacité d'inventaire du client. Dans cette configuration, ce n'est pas le client qui va décider quand les pièces seront envoyées par le biais d'une commande mais le distributeur. Les informations connues vont lui permettre d'envoyer les pièces au moment optimal pour couvrir la demande tout en limitant au maximum le coût de transport. On aboutit par conséquent à une situation gagnant-gagnant pour le distributeur et le client.

L'IRP permet de répondre aux questions suivantes :

- Quand envoyer des pièces à un client ?
- En quelle quantité ?
- Quelle route utiliser ?

Ces questions se rapprochent grandement de celles auxquelles nous souhaitons répondre dans notre problématique. L'IRP permet de gérer à la fois l'inventaire et la distribution des pièces. Toutefois, nous notons encore plusieurs différences avec notre problématique. Certaines, telles que le niveau de demande constant sont mineures mais d'autres sont plus importantes.

L'IRP est un problème de tournées, il est donc centré sur la minimisation du coût de transport, bien que la corrélation existante entre stockage et transport permette de gérer l'inventaire de manière indirecte. Dans notre problématique d'autres coûts sont inclus et ne sont pas gérés dans l'IRP. D'autre part, les ruptures de stocks peuvent être autorisées lorsque celles-ci permettent la réduction du coût total alors que dans un IRP la résolution des demandes est une contrainte forte. De plus, l'IRP suppose d'avoir une liberté dans la détermination des tournées et que celles-ci soient effectuées de manière immédiate (le temps d'acheminement n'est pas pris en compte) alors que les routes et calendriers d'acheminement sont prédéterminés dans notre problématique. Au niveau du réseau, l'IRP permet d'atteindre directement les sites clients et comme le VRP, il n'intègre pas de contraintes topologiques. Au contraire, dans notre problématique, il est généralement nécessaire de passer par un site intermédiaire dans lequel sera stockée la pièce avant de l'envoyer vers un site client. Enfin, l'IRP suppose d'avoir un inventaire suffisant au dépôt principal pour satisfaire aux demandes à tout moment (limité uniquement par la capacité des véhicules). Ici, nous disposons dans notre problématique, d'un inventaire limité au dépôt principal qui va varier au cours du temps en fonction des réparations et qui demande une gestion adéquate. L'ensemble de ces différences rend difficile l'adaptation des méthodes dédiées à l'IRP à notre problématique.

2.4.1.3.2 Problème de distribution d'inventaire intégré

Le problème de distribution d'inventaire intégré - en anglais Integrated Inventory Distribution Problem (IIDP) - est un problème *NP-complet* qui vise à l'intégration de la distribution et de la gestion de l'inventaire dans une chaîne d'approvisionnement [Abdelmaguid, 2004]. Cette description du problème nous rappelle l'IRP décrit précédemment. Les 2 problèmes sont en effet très proches. L'IIDP s'intéresse à la distribution de pièces d'un dépôt principal vers n clients. L'horizon de temps du planning est divisé en T périodes de temps (jours, mois, ...). À chaque client i et période de temps t est associé une quantité de demandes d_{it} . À chaque client est associé une capacité maximum de stockage C_i et des coûts de stockage et de rupture de stock

par période de temps et par pièce, h_i et b_i . À chaque période de temps, un véhicule peut livrer C pièces et à chaque route entre deux sites i et i' est associé un coût de transport $tc_{ii'}$. Le but du problème est de minimiser le coût global de la chaîne d'approvisionnement même si pour cela des ruptures de stock se produisent [Abdelmaguid et Dessouky, 2006]. La définition du problème permet d'établir 2 différences principales entre IIDP et IRP. Premièrement, l'IRP considère uniquement le coût de transport tandis que l'IIDP intègre, en plus du coût de transport, le coût de rupture de stock et le coût de stockage. Deuxièmement, l'IRP est basé sur une prévision de la consommation à taux constant. L'IIDP est axé sur une prévision calendaire de la demande. À chaque période de temps est associée une quantité de demandes. Ces différences rapprochent l'IIDP de notre problématique. En effet, de la même manière, nous nous intéressons au coût global de la chaîne d'approvisionnement et pouvons générer des ruptures de stock si cela permet de réduire les coûts. De plus, notre prévision de la demande peut être modélisée de façon similaire à la demande de l'IIDP. Toutefois, certaines différences persistent entre ces problèmes. En effet, l'IIDP est un problème dans lequel les tournées ne sont pas prédéterminées et comme dans le cas de l'IRP, les tournées n'incluent pas un aspect temporel (à chaque période de temps une tournée est effectuée). Cette formulation, n'est pas compatible avec notre problématique où la livraison à un site peut nécessiter un passage par un site intermédiaire et n'est pas forcément immédiate. L'autre principal problème est encore une fois la quantité de pièces disponibles en entrée. Celle-ci n'est limitée que par la capacité du véhicule contrairement à notre problématique où elle peut varier et est déterminée par le stock initial et les réparations. Par conséquent, notre problématique demande un travail de gestion au niveau du dépôt principal qui n'est pas présent dans l'IIDP.

2.4.1.3.3 Remarques sur les problèmes d'intégration

Les problèmes d'intégration de la gestion et de la distribution des stocks intègrent plusieurs objectifs (stockage, transports, ruptures de stock). La gestion de ces différents objectifs doit être adaptée à la chaîne d'approvisionnement traitée pour être efficace. Par exemple, l'IRP est un modèle qui fonctionne dans une chaîne d'approvisionnement à 2 niveaux. Il apparaît primordial d'utiliser un modèle développé pour la structure de la chaîne d'approvisionnement que l'on traite. En effet, adapter ces modèles existants à des chaînes radicalement différentes limiterait sans aucun doute leurs performances. Notons toutefois que si ces modèles ne sont pas applicables en l'état à notre problématique, ils restent intéressants et peuvent nous donner des pistes de recherche. Nous remarquons notamment deux approches différentes dans la satisfaction des objectifs entre l'IIDP et l'IRP. D'une part, l'IIDP propose une approche classique : à chacun des différents objectifs fixés est associé un coût, le but du problème est ensuite de minimiser la somme totale des coûts. D'autre part, l'IRP propose une modélisation basée sur la corrélation entre les objectifs. Cette approche est possible car dans une chaîne d'approvisionnement

tous les objectifs sont fortement liés. Intuitivement, dans notre problématique, les transferts et les réparations de pièces sont liés au stockage car lorsqu'une pièce est déplacée, elle n'est pas stockée. De la même manière, la satisfaction de la demande est directement liée au stockage. En effet, lorsqu'une pièce est utilisée pour répondre à une demande, elle n'est plus stockée. Ces corrélations sont intéressantes et pourraient être utiles pour proposer un modèle adapté à notre problématique.

2.4.2 La gestion en boucle fermée

La gestion de la distribution et des stocks dans une boucle fermée est plus complexe que dans une chaîne d'approvisionnement classique. En effet, dans une boucle fermée, différentes d'activités peuvent intervenir selon le produit traité. La gestion doit être précise pour permettre une bonne synchronisation des activités de réparation et de réhabilitation mais aussi afin de pouvoir réinjecter les produits réparés dans la chaîne classique. Les méthodes proposées pour répondre à cette problématique de gestion sont souvent inspirées des méthodes de gestion classique mais adaptées et développées pour répondre à un problème précis et par conséquent peu génériques [Chung et al., 2008].

2.4.2.1 Les problèmes de gestion de stocks

Les techniques de gestion des stocks en boucle fermée sont inspirées de celles présentées en section 2.4.1.1. Tout comme ceux présentés dans les chaînes d'approvisionnement classiques, ces modèles sont généralement appliqués de manière locale sur un nœud du réseau. Plusieurs applications des politiques de gestion (et du modèle EOQ) existent dans les CLSC. Cette approche fut introduite pour la première fois en boucle fermée pour gérer les pièces défectueuses par Schradly [1967]. Cette proposition fut ensuite étendue à différents cas au fil des années [Koh et al., 2002; Mabini et al., 1992; Nahmiasj et Rivera, 1979]. Comme dans une chaîne d'approvisionnement classique, la finalité des politiques de gestion est de déterminer la quantité optimale de pièces à commander pour satisfaire la demande. Toutefois, dans ce cas particulier, les modèles incluent la possibilité de faire réparer des pièces défectueuses. Il s'agit alors de déterminer également la quantité de pièces à envoyer en réparation pour limiter le coût d'achat des pièces en provenance d'un vendeur externe. Évidemment, les quantités de pièces défectueuses ne sont pas illimitées et sont généralement représentées par un taux. Il faut alors équilibrer les quantités de pièces à réparer et les quantités de pièces à acheter. D'autres paramètres tels que la capacité de stockage ou de réparation peuvent également intervenir et rendre le problème encore plus difficile à gérer. Les modèles proposés souffrent des mêmes contraintes que les systèmes de gestion classique (distribution non gérée, décentralisation, ...) et demandent des modifications pour être appliqués à notre cas concret.

2.4.2.2 Planification des mouvements de stocks

Les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée sont généralement composées de différentes composantes dirigées par des entités différentes avec des incertitudes pouvant survenir en plusieurs points avec un effet coup de fouet très important. Dans ce contexte, la production d'un planning adéquat permettant la combinaison et la synchronisation des différentes activités et qui reste robuste aux incertitudes est complexe et peut s'avérer préjudiciable s'il est mal confectionné. C'est pourquoi les approches à base de planification sont plus rarement étudiées dans ce type de chaîne d'approvisionnement et dédiées aux cas concrets étudiés [Akçali et Cetinkaya, 2011; Dekker et al., 2013; Zeballos et al., 2014]. Fleischmann et al. [2003] s'intéressent par exemple à la planification du démantèlement des pièces et à l'intégration de ces opérations dans la chaîne d'approvisionnement d'IBM. Ils rapportent la difficulté d'application de méthodes proactives telles que les méthodes de planification dans les boucles fermées. Ils expliquent que dans une boucle fermée les défaillances peuvent être difficiles à prévoir et que sans une prévision fiable, il est préférable d'utiliser une méthode réactive à base de politique de gestion. Nous comprenons ici que la planification en boucle fermée ne peut être utilisée que sous des conditions particulières qui sont une centralisation des informations et une prévision fiable des demandes futures.

2.5 Nos choix

Nous l'avons vu, différents problèmes traitent de la gestion et de la distribution des stocks dans les chaînes d'approvisionnement. Nous avons constaté que, lorsqu'il s'agit d'intégrer plusieurs objectifs ou de gérer une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, les méthodes sont généralement dédiées à un problème particulier. Par conséquent, plutôt que de s'essayer à adapter une méthode existante, nous faisons le choix de proposer une nouvelle approche basée sur notre propre modélisation pour résoudre notre problématique. Plusieurs choix doivent être faits au niveau de la modélisation. Le premier est de déterminer quelle approche nous allons appliquer pour gérer la chaîne d'approvisionnement. Nous retenons 2 possibilités :

- Combiner des politiques de gestion des stocks avec des méthodes de distribution. Cette approche ne tire pas complètement parti de la centralisation de la chaîne d'approvisionnement ni de l'intégration des deux approches mais permet de mettre en place des politiques de gestion réactives aux incertitudes.
- Proposer une méthode de planification des mouvements de pièces dans la chaîne d'approvisionnement sur un horizon de temps donné. Cette approche permet d'utiliser la centralisation de la chaîne d'approvisionnement et d'anticiper les demandes. Cependant, elle repose sur une prévision fiable des demandes pour être efficace.

Dans notre problématique, les calendriers d'acheminement sont fixés. Cela limite la flexibilité et la réactivité de la chaîne d'approvisionnement ce qui est un frein à la mise en place de politiques de gestion. De plus, nous considérons d'une part des opérations de maintenance avec une prévision parfaite de la demande et d'autre part des opérations de remplacement des défaillances avec des prévisions de très bonne qualité pour les pièces les plus fréquemment utilisées. Considérant ces arguments, nous optons pour une approche de planification des mouvements. Cette approche devrait permettre de gérer les opérations de maintenance et les pièces les plus utilisées dans la chaîne d'approvisionnement. Concernant les pièces avec une demande trop faible pour être prévue de manière précise, nous proposons d'agréger la demande soit au niveau géographique soit au niveau temporel pour augmenter le niveau de demande et obtenir une prévision de bonne qualité. En effet, une agrégation permet d'augmenter les volumes de pièces traités et facilite une prévision de la demande. Évidemment, une agrégation géographique (e.g., au niveau des hubs) ne permettra pas d'envoyer les pièces directement au site client concerné par les demandes mais permettra de rapprocher géographiquement les pièces nécessaires. Une agrégation temporaire (e.g., prévision par mois) permettra d'envoyer les pièces au site client concerné mais demandera une quantité globale de pièces plus importante pour satisfaire à la prévision.

Nous décidons également de proposer une modélisation générique plutôt que de se limiter à la chaîne d'approvisionnement composée de trois niveaux de BT. Cette décision est motivée par les probables évolutions topologiques de la chaîne d'approvisionnement au cours des prochaines années et également par l'émergence d'un problème similaire au niveau de la filiale française de BT (BT France). Cette filiale a une chaîne d'approvisionnement basée sur la même structure que celle de BT mais intègre en plus des transferts transversaux entre les sites clients et des coûts de transfert. Il faudra par conséquent pouvoir intégrer ces paramètres dans notre modélisation.

Enfin, il nous faut décider de la manière dont nous allons gérer les différents objectifs liés à notre problématique (résolution des demandes, stockage, transferts et réparations). Nous décidons d'intégrer directement tous les objectifs sous forme de coûts plutôt que de les gérer de manière indirecte via la corrélation entre eux. Cela permet d'ajouter ou de supprimer simplement des objectifs. De plus, nous choisissons d'associer un poids à chacun des quatre objectifs afin d'obtenir une fonction coût pondérée. Le but est d'offrir une plus grande flexibilité à l'utilisateur et de lui permettre non seulement d'activer ou de désactiver simplement des objectifs mais également de les hiérarchiser. Nous nommons ce problème de planification le problème de planification tactique de distribution (TDPP) que nous allons traiter comme un problème d'optimisation combinatoire.

2.6 Un système d'aide à la décision

L'ensemble de ces choix va prendre la forme d'un système d'aide à la décision dont le TDPP constitue la partie centrale. Ce système est schématisé sur la figure 2.9.

Ce système est un système de planification périodique. Les plans sont recalculés sur la base d'une fréquence donnée (e.g., quotidienne, hebdomadaire). Ce recalcul des plans permet de mettre en marche les transferts nécessaires à la résolution des demandes tout en permettant des ajustements liés aux possibles incertitudes. Ces plans sont calculés en résolvant une instance statique du problème TDPP. Cette instance est définie par les données et paramètres qui la structurent (topologie, calendriers, coûts, poids de la fonction d'évaluation, horizon de temps) mais prend également en compte le plan précédemment calculé qui va fournir les transferts en cours et les niveaux de stocks actuels.

Nous détaillerons dans les chapitres suivants les différentes composantes de notre système. Nous commencerons par présenter le TDPP dans le chapitre 3 et dans le chapitre 4 les méthodes utilisées pour le résoudre. Dans le chapitre 5, nous reviendrons plus en détails sur l'impact des poids sur la fonction coût et sur les plans générés. Enfin, dans le chapitre 6 nous étudierons la capacité de notre système à gérer les incertitudes pouvant survenir au niveau de la prévision des demandes.

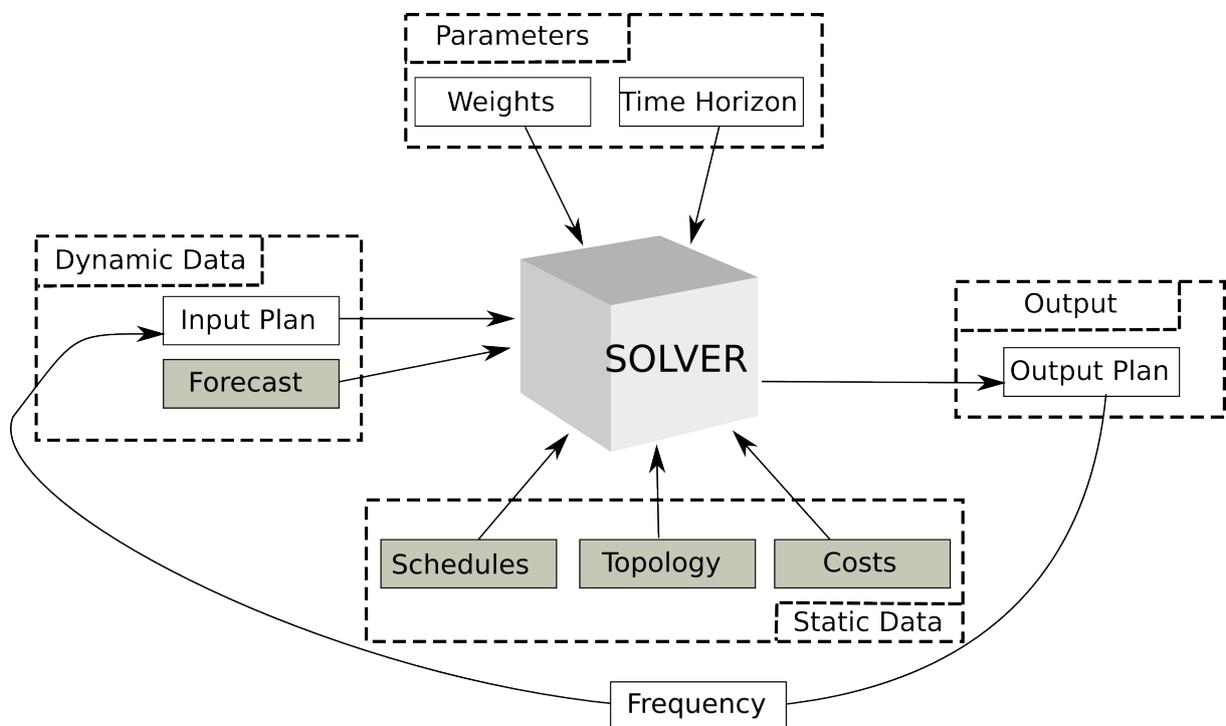


FIGURE 2.9 – Un système d'aide à la décision

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème concret de British Telecom avec ses contraintes opérationnelles et expliqué pourquoi il est nécessaire d'améliorer la gestion de leur chaîne d'approvisionnement avec l'utilisation d'un outil dédié. Nous avons également présenté les approches classiques de gestion d'inventaire dans la chaîne d'approvisionnement et mis en parallèle ces approches avec notre problématique. Enfin, nous avons détaillé les choix de conception que nous ferons dans la suite de ce manuscrit et une ébauche du système complet d'aide à la décision.



3

Définition du problème

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre le Problème de Planification Tactique de Distribution (TDPP). Nous commençons par présenter une formalisation du problème et détaillons les différents paramètres, constantes, variables et contraintes. Nous nous intéressons ensuite à la complexité du problème et proposons deux réductions. La première permet de rapprocher notre problème du problème classique de flot de coût minimum et la seconde démontre que notre problème est *NP-difficile*. Enfin, nous clôturons ce chapitre en présentant différentes utilisations possibles du modèle et une liste d'extensions.

3.2 Modélisation générique

Comme nous l'avons précisé en section 2.5, une des volontés des décideurs de BT est que le système soit fondé sur une modélisation générique de chaîne d'approvisionnement. Cette modélisation générique devra permettre de modéliser la nouvelle chaîne d'approvisionnement de BT UK si cette dernière venait à évoluer mais également de représenter le réseau logistique de BT France.

Dans le modèle que nous proposons, cette généricité est présente sous 3 aspects :

- **Généricité topologique.** Nous proposons un modèle applicable à toutes les formes de chaîne d'approvisionnement.

- **Généricité calendaire.** Notre modèle permet l'utilisation de tous les calendriers possibles qu'ils soient périodiques (hebdomadaire, mensuel, bi-hebdomadaire) ou non. Différents délais d'acheminement selon les trajets empruntés peuvent être également utilisés, ce qui fournit une flexibilité totale.
- **Généricité des entités.** Dans la chaîne d'approvisionnement de BT, on distingue trois types d'entités. Le premier est le centre de distribution qui est lié au réparateur. Le second est le magasin sur lequel peuvent survenir des défaillances. Le troisième est le hub qui est un site intermédiaire et qui n'est pas lié au réparateur et sur lequel il ne peut pas survenir de défaillances. Ces sites peuvent être définis à partir de deux caractéristiques qui sont la présence ou non de liens directs avec le réparateur et la présence ou non de possibles défaillances. C'est pourquoi, dans notre modélisation, nous proposons quatre types de sites correspondant aux quatre combinaisons possibles de ces deux caractéristiques. Les sites peuvent être placés n'importe où sur le réseau quel que soit leur type.

3.3 Modélisation

Nous présentons ici la modélisation du TDPP sous la forme d'un programme mixte en nombres entiers (MIP).

3.3.1 Paramètres et constantes

Le TDPP est défini pour un ensemble de sites L sur un horizon de temps discrétisé T avec $T = 0$ la première période de temps et T_{max} la dernière période de temps. La topologie et les calendriers d'acheminements sont définis sous la forme d'un graphe espace-temps G^* dont les nœuds sont toutes les combinaisons possibles entre les sites et les périodes de temps et les arcs sont les routes prédéterminées entre les sites conformément à la topologie et aux calendriers d'acheminement. Plus précisément, ce graphe peut être divisé en trois sous-graphes G^h , G^f , G^r où les arcs de G^h représentent les routes d'approvisionnement (pièces saines), les arcs de G^f les routes de retour (pièces défaillantes) et les arcs de G^r les routes de réparation. Notons que les nœuds des différents graphes peuvent être fusionnés sur un seul et unique graphe pour simplifier la représentation. La figure 3.1 présente un exemple de graphe espace-temps composé de trois sites et cinq périodes de temps.

Ces paramètres sont définis plus précisément dans le tableau 3.1. Ils définissent la structure de base du problème sur laquelle les constantes, variables, contraintes et objectifs sont définis. Les constantes et variables sont indexées soit sur les sites de la CLSC (e.g., coût de réparation), soit sur les sommets du graphe espace-temps (e.g., niveau d'inventaire par site et période de temps) soit sur ses arcs (e.g., transferts). Nous introduisons la notation x_z^y avec x le nom de la

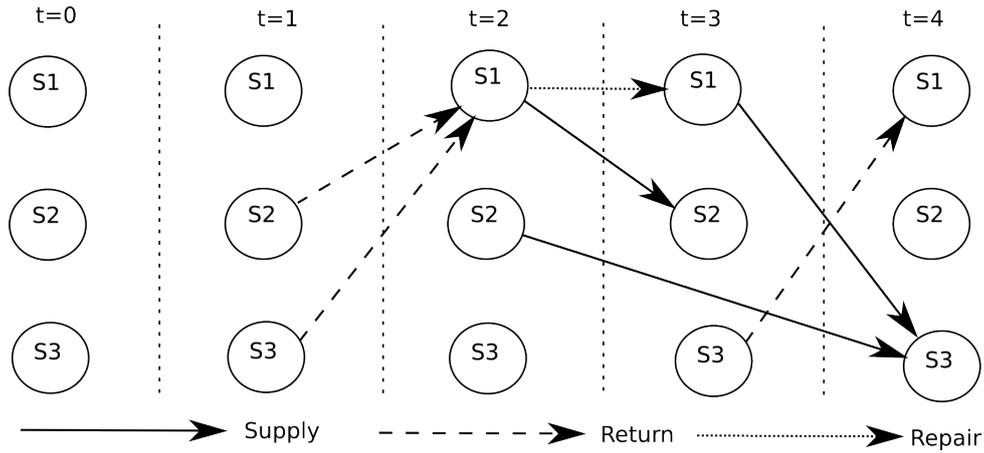


FIGURE 3.1 – Un exemple de graphe espace-temps

TABLE 3.1 – Paramètres d’une instance

Paramètres	
Ensemble de sites	$L : L \subseteq \mathbb{N}$
Horizon de temps	$T : T = \{0, 1, \dots, Tmax\}$
Routes d’approvisionnement	$G^h : G^h = (N^h, A^h)$ avec $N^h : T \times L, A^h \subseteq N^h \times N^h$
Routes de retour	$G^f : G^f = (N^f, A^f)$ avec $N^f : T \times L, A^f \subseteq N^f \times N^f$
Routes de réparation	$G^r : G^r = (N^r, A^r)$ avec $N^r : T \times L, A^r \subseteq N^r \times N^r$

constante (ou de la variable), y l’état des pièces concernées (i.e., saines, défectueuses, réparation, ...) et z les paramètres du graphe espace-temps (i.e., sites, périodes de temps). Les constantes d’une instance sont présentées dans le tableau 3.2. Ces constantes sont la prévision de la demande d par site par période de temps, les différents coûts unitaires μ^* , l’état initial I et les poids ω^* définis par l’utilisateur. Les différents coûts unitaires sont définis par site ou, dans le cas des transferts, par lien entre deux sites. L’état initial représente l’état de la chaîne d’approvisionnement à la période de temps 0. Il définit les états initiaux des stocks s , des pièces en transfert ou en réparation m et des ruptures de stock en cours b .

Nous remarquons qu’une instance du TDPP gère un unique type de pièce. En effet, les experts de BT ne nous ayant pas communiqué de contraintes de dépendance entre les types de pièces, nous considérons que ceux-ci peuvent être gérés indépendamment les uns des autres en associant une instance du problème à chacun.

TABLE 3.2 – Constantes d’une instance

Constantes	
Prévision de la demande	$d : L \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Coûts de stockage	$\mu^{sh}, \mu^{sf} : L \rightarrow \mathbb{R}$
Coût de rupture de stock	$\mu^b : L \rightarrow \mathbb{R}$
Coûts de transfert	$\mu^{mh}, \mu^{mf} : L \times L \rightarrow \mathbb{R}$
Coût de réparation	$\mu^{mr} : L \rightarrow \mathbb{R}$
Poids	$\omega^s, \omega^b, \omega^{mhf}, \omega^{mr} \in \mathbb{N}$
État initial	I

TABLE 3.3 – Variables d’une instance

Variables	
Stockage	$s^h, s^f : L \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Ruptures de stock	$b : L \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Potentiel sain	$p^h : L \times T \rightarrow \mathbb{Z}$
Potentiel défaillant	$p^f : L \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Transferts	$m^h, m^f : L \times L \times T \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Réparations	$m^r : L \times T \times T \rightarrow \mathbb{N}$
Coûts	$c, c^s, c^b, c^{mhf}, c^{mr} \in \mathbb{R}$

3.3.2 Variables

Nous séparons les variables du modèle en deux catégories : les variables de décision (en gras) et les variables auxiliaires. Les premières modélisent les opérations qui définissent un plan (les déplacements de pièces) et les secondes représentent le résultat de ces opérations sur l’état de la chaîne d’approvisionnement. Ces variables sont représentées dans le tableau 3.3.

Pour deux sites l et l' et deux périodes de temps t et t' , les variables de décision $m_{l,l',t,t'}^h$ (respectivement, $m_{l,l',t,t'}^f$) représentent les quantités de pièces saines (resp. défaillantes) transférées depuis le site l vers le site l' , de la période de temps t à la période de temps t' . De la même manière, la variable de décision $m_{l,t,t'}^r$ représente le volume de pièces réparées depuis le site l du jour t au jour t' . Cette opération de réparation permet de transformer les pièces défaillantes en pièces saines via un coût et un temps de réparation et fait le lien entre les deux parties de la chaîne d’approvisionnement. Notons que cette variable ne prend en paramètre qu’un seul site. En effet nous considérons qu’une pièce réparée revient sur le site qui l’a envoyée en réparation. Cette contrainte est spécifique au problème réel de BT. Le modèle pourrait sans modification majeure gérer les réparations d’un site l vers un site l' . Afin de respecter les calendriers et routes d’acheminement, les valeurs des variables de décision qui ne correspondent pas à un arc du

graphe espace-temps sont égales à 0 et ne peuvent pas être modifiées. Nous assurons ainsi la cohérence entre les variables de décision et les calendriers. Les équations (3.1a) à (3.1c) décrivent l'initialisation des variables de décision.

$$((l, t), (l', t')) \notin G^h \Rightarrow m_{l,l',t,t'}^h = 0 \quad (3.1a)$$

$$((l, t), (l', t')) \notin G^f \Rightarrow m_{l,l',t,t'}^f = 0 \quad (3.1b)$$

$$((l, t), (l, t')) \notin G^r \Rightarrow m_{l,t,t'}^r = 0 \quad (3.1c)$$

Nous ajoutons que les valeurs des variables de décision doivent être positives ou nulles. En effet, elles sont associées à des opérations concrètes et ne peuvent par conséquent pas être négatives. Les variables auxiliaires sont calculées directement à partir des variables de décision. Elles représentent l'état de la chaîne d'approvisionnement et les coûts associés à chaque site et période de temps. Étant donné une période de temps t et un site l , les variables $s_{l,t}^h$ (resp. $s_{l,t}^f$) indiquent le niveau de stock de pièces saines (resp. défectueuses) à la fin de la période de temps t . La variable $b_{l,t}$ dénombre les ruptures de stock à la fin de la période de temps t . Notons que cette variable prend en compte les demandes apparues sur la période de temps donnée mais également les ruptures de stock des périodes de temps précédentes qui ne sont toujours pas résolues (ruptures résiduelles).

Les variables $p_{l,t}^h$ (resp. $p_{l,t}^f$) représentent le potentiel sain (resp. défectueux) du site l à la période de temps t . Le potentiel sain $p_{l,t}^h$ est la différence entre les pièces disponibles sur le site l à la période de temps t et les pièces nécessaires pour résoudre les demandes de la période de temps t et les ruptures de stock résiduelles. En d'autres termes, le potentiel représente la quantité de pièces disponibles sur le site l à la fin de la période de temps t et qui peuvent être envoyées à d'autres sites. De la même manière, le potentiel défectueux $p_{l,t}^f$ dénombre la quantité de pièces défectueuses pouvant être envoyées depuis le site l à la fin de la période de temps t . Nous remarquons que le potentiel sain est défini sur \mathbb{Z} . En effet, cette variable peut prendre des valeurs négatives dans le cas où des ruptures de stock sont présentes à la fin de la période donnée t .

Enfin, les quatre variables auxiliaires restantes permettent de modéliser les différents coûts. Le coût total de rupture de stock est décrit par c^b , celui de stockage par c^s , celui de réparation par c^{m^r} et enfin celui de transfert par $c^{m^{hf}}$.

3.3.3 Équations

Nous détaillons ci-après les équations qui permettent de modéliser la chaîne d'approvisionnement.

Les équations (3.2a) et (3.2b) décrivent la gestion des pièces défectives. Elles définissent les contraintes de stock requis induites par le domaine de définition des variables (i.e., une pièce ne peut être transférée que si le niveau du stock à la période de temps origine sur le site origine est positif). Plus spécifiquement, l'équation (3.2b) représente la quantité de pièces défectives qui peut être retournée depuis un site particulier l à la période de temps t . Ces équations font également le lien entre demandes et pièces défectives. En effet, une demande sur un site l à une période de temps t coïncide avec l'ajout d'une pièce défective au stock défectif de l à t .

$$\forall l \in L, t \in T, \quad s_{l,t}^f = p_{l,t}^f - \sum_{t' \in T} m_{l,t,t'}^r - \sum_{\substack{t' \in L, \\ t' \in T}} m_{l,t,t'}^f \quad (3.2a)$$

$$\forall l \in L, t \in T \setminus \{0\}, \quad p_{l,t}^f = s_{l,t-1}^f + \sum_{\substack{t' \in L, \\ t' < t}} m_{l',l,t,t'}^f + d_{l,t} \quad (3.2b)$$

Les équations (3.3a) à (3.3d) sont les contraintes de gestion des pièces saines. Plus spécifiquement, l'équation (3.3c) décrit le calcul du potentiel pour un site et une période de temps donnés. À partir de ce potentiel, les équations (3.3a) et (3.3d) décrivent le niveau de stock et la quantité de ruptures de stock à la fin de la période t . L'équation (3.3b) assure la consistance en vérifiant que la quantité de pièces transférées est inférieure à la quantité disponible. Notons également que ces équations donnent priorité à la résolution de la demande locale. Cette règle de priorité s'ajoute au cœur du problème qui gère le déplacement des pièces et interdit d'envoyer ou de stocker des pièces saines à une période de temps t si, sur le site où elles sont stockées, il y a des ruptures de stock à cette même période t . Cette règle métier est mise en place dans les chaînes d'approvisionnement étudiées. Nous appellerons cette règle "contrainte de consommation locale".

$$\forall l \in L, t \in T, \quad s_{l,t}^h = \max(0, p_{l,t}^h - \sum_{\substack{t' \in L, \\ t' \in T}} m_{l',l,t,t'}^h) \quad (3.3a)$$

$$\forall l \in L, t \in T, \quad \sum_{\substack{t' \in L, \\ t' \in T}} m_{l',l,t,t'}^h \leq \max(0, p_{l,t}^h) \quad (3.3b)$$

$$\begin{aligned} \forall l \in L, t \in T \setminus \{0\}, \quad p_{l,t}^h &= s_{l,t-1}^h + \sum_{t' \in L, t' < t} m_{l',l,t,t'}^h \\ &+ \sum_{t' \in T} m_{l,t,t'}^r - b_{l,t-1} - d_{l,t} \end{aligned} \quad (3.3c)$$

$$\forall l \in L, t \in T, \quad b_{l,t} = \max(0, -p_{l,t}^h) \quad (3.3d)$$

L'équation (3.4e) modélise la fonction coût qui est une somme pondérée des différents coûts calculés par les équations (3.4a) à (3.4d). Tous ces coûts sont des fonctions linéaires basées sur des coûts unitaires spécifiques aux sites ou aux transferts. Par exemple, le coût de rupture de stock pour un site donné est égal à la quantité totale de ruptures de stock multipliée par le coût unitaire d'une rupture de stock sur ce site. Le coût global de rupture de stock est ensuite calculé en faisant la somme des coûts de rupture de stock sur l'ensemble des sites.

$$c^s = \sum_{l \in L, t \in T} (s_{l,t}^h \times \mu_l^{s^h} + s_{l,t}^f \times \mu_l^{s^f}) \quad (3.4a)$$

$$c^b = \sum_{l \in L, t \in T} b_{l,t} \times \mu_l^b \quad (3.4b)$$

$$c^{m^{hf}} = \sum_{\substack{l, l' \in L, \\ t, t' \in T}} (m_{l, l', t, t'}^h \times \mu_{l, l'}^{m^h} + m_{l, l', t, t'}^f \times \mu_{l, l'}^{m^f}) \quad (3.4c)$$

$$c^{m^r} = \sum_{\substack{l \in L, \\ t, t' \in T}} (m_{l, t, t'}^r \times \mu_l^{m^r}) \quad (3.4d)$$

Global min :

$$c = \omega^s \times c^s + \omega^b \times c^b + \omega^{m^{hf}} \times c^{m^{hf}} + \omega^{m^r} \times c^{m^r} \quad (3.4e)$$

3.3.4 Objectifs et plan

L'objectif de la résolution proposée est de minimiser le coût global de la chaîne d'approvisionnement. Ce coût prend la forme d'une valeur numérique qui peut fournir des informations sur la gestion de la chaîne ou permettre la comparaison entre différentes méthodes. Toutefois, le véritable intérêt du modèle pour les gestionnaires de chaîne d'approvisionnement est représenté par les variables de décision. Ces variables de décision vont représenter l'ensemble des opérations qui doivent être exécutées successivement pour obtenir le coût global de la chaîne d'approvisionnement proposé par le modèle. Cette succession chronologique d'opérations est un plan. Ce plan des opérations peut être représenté sous différentes formes. La représentation la plus évidente est la représentation en tableau. Le tableau 3.4 décrit un exemple de plan.

Chaque ligne du tableau décrit une opération à effectuer. Par exemple, la première ligne nous indique qu'il faut retourner 2 pièces du site $S3$ vers le site $S1$ à la période de temps 1 et que cette opération sera achevée à la période de temps 2. Une autre représentation plus graphique est celle du graphe espace-temps utilisé pour définir les calendriers d'acheminement. En effet,

TABLE 3.4 – Un exemple de plan

Plan					
Site		Période de temps		Type	Quantité
Origine	Destination	Début	Fin		
S3	S1	1	2	Retour	2
S3	S1	3	4	Retour	2
S1	S1	2	3	Réparation	1
S1	S2	2	3	Approvisionnement	1
S2	S3	2	4	Approvisionnement	3

un plan correspond à un étiquetage des arcs de ce graphe. Par exemple, l'étiquetage du graphe espace-temps de la figure 3.1 avec le plan précédent est donné en figure 3.2.

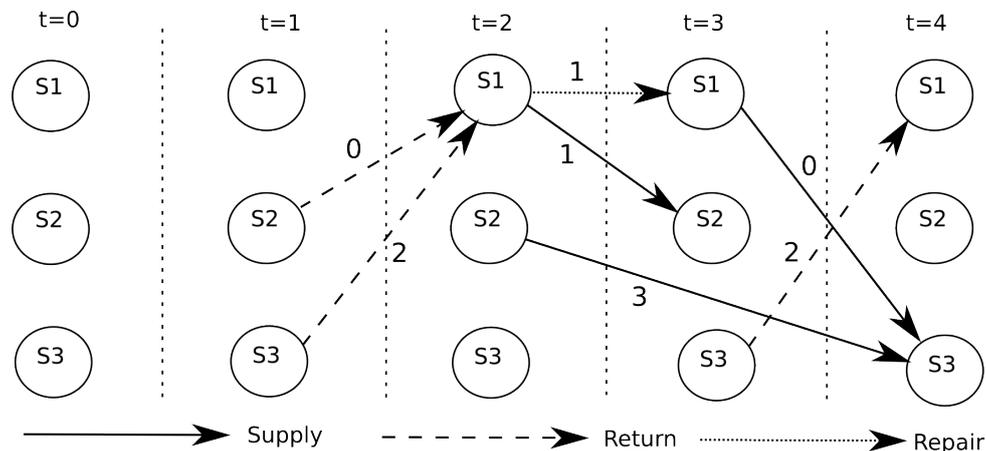


FIGURE 3.2 – Un plan représenté sur un graphe espace-temps

3.4 Complexité du TDPP

Dans cette section, nous nous intéressons à la complexité du TDPP. Dans un premier temps, nous présentons quelques éléments pertinents de la théorie de la complexité. Dans un second temps, nous rapprochons notre problème d'un problème de flot puis établissons sa complexité en présentant une réduction du problème de somme de sous-ensembles.

3.4.1 Théorie de la complexité

En informatique théorique, l'étude de la complexité est relative à la détermination de la quantité de ressources nécessaires (nombre d'opérations réalisées) pour résoudre un problème au moyen d'un algorithme. Cette quantité de ressources est généralement représentée par une estimation

au pire cas déterminée à partir de l'instance la plus difficile du problème considéré [Knuth, 1976]. Nous présentons ici la théorie de la complexité de manière succincte. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer aux ouvrages de Papadimitriou et Steiglitz [1982], Garey et Johnson [1990] et Perifel [2014].

La théorie de la complexité permet de séparer les problèmes en 2 catégories :

- Les problèmes de décision. Ce sont des problèmes auxquels on peut répondre par **oui** ou par **non**.

Exemple : Existe-t-il un emploi du temps à l'université sans conflit de salle ?

- Les problèmes d'optimisation. Ce sont des problèmes concernés par la recherche d'un maximum ou d'un minimum d'une fonction donnée.

Exemple : Recherche du plus court chemin dans un graphe.

Notons que les problèmes d'optimisation peuvent être transformés en un problème de décision équivalent via une recherche dichotomique [Karp, 1972]. Par exemple, le problème d'optimisation de *détermination du plus court chemin entre deux points* est équivalent au problème de décision *existe-il un chemin de longueur inférieure à un nombre donné qui relie ces deux points ?* [Imbrosciano, 2014].

La théorie de la complexité permet de déterminer différentes classes de complexité pour les problèmes de décision. Nous nous limiterons dans ce manuscrit à la description de deux classes de complexité : les classes P et NP .

- La classe P (Deterministic Polynomial). Elle contient l'ensemble des problèmes qui peuvent être résolus par un algorithme polynomial sur une machine déterministe. Ces problèmes peuvent être résolus de manière efficace.
- La classe NP (Non-deterministic Polynomial). Elle contient l'ensemble des problèmes qui peuvent être résolus par un algorithme polynomial sur une machine non déterministe (qui peut exécuter en parallèle un nombre infini d'alternatives).

La classe NP contient les problèmes NP -difficiles et NP -complets.

Définition : Un problème π_1 est NP -difficile si et seulement si, tout problème $\pi_2 \in NP$ se réduit par une réduction many-one en temps polynomial à π_1 .

Définition : Un problème π est NP -complet si et seulement si, π est NP -difficile et $\pi \in NP$.

Autrement dit, si toute solution au problème peut être vérifiée en un temps polynomial et qu'il est NP -difficile alors ce problème est NP -complet.

3.4.2 TDPP comme un problème de flot de coût minimum

Le TDPP peut être transformé en un problème de flot grâce à sa modélisation sous forme d'un graphe espace-temps. Nous présentons le problème de flot à coût minimum - en anglais

Minimum Cost Network Flow Problem (MCNFP) - et démontrons comment nous pouvons transformer le cœur du TDPP vers ce problème de flot.

3.4.2.1 Le Problème de flot de coût minimum

Le MCNFP est un problème classique de flot qui prend place dans un graphe dirigé $I = (N_I, A_I)$ composé de k noeuds [Goldberg et al., 1989; Guisewite et Pardalos, 1990; Pardalos, 1993]. Un vecteur de k éléments π représente le potentiel de chaque noeud. Une valeur de flot $x_{i,j}$ est associée à chaque arc (i, j) et est bornée telle que $a_{i,j} \leq x_{i,j} \leq b_{i,j}$ (cela définit la capacité de l'arc). Cette contrainte est relaxée dans la version sans capacité du problème. Cette valeur est également associée à une fonction coût $c_{i,j}$ telle que le coût total d'un arc est $c_{i,j}(x_{i,j})$.

L'objectif du problème est de minimiser le coût total :

$$\text{global min } \sum_{i,j \in A} c_{i,j}(x_{i,j}) \quad (3.5)$$

sous les contraintes

$$\sum_{(i,k) \in A} x_{i,k} - \sum_{(k,i) \in A} x_{k,i} = \pi_i, \forall i \in N_I \quad (3.6)$$

et

$$0 \leq a_{i,j} \leq x_{i,j} \leq b_{i,j}, (i, j) \in A_I \quad (3.7)$$

La version de ce problème où la fonction coût est concave (e.g., avec des coûts forfaitaires d'ouverture sur les arcs pour transférer la première pièce puis un coût constant pour les autres pièces) est *NP-difficile* contrairement à sa version où la fonction coût est convexe et qui peut être résolue en temps polynomial [Guisewite et Pardalos, 1990].

3.4.2.2 TDPP et MCNFP

Nous décrivons ci-après une réduction many-one du cœur du TDPP sans la contrainte de consommation locale au MCNFP sans capacité [Goldberg et al., 1989]. Nous démontrons ici que sans cette contrainte de consommation nous pouvons établir une réduction vers le MCNFP convexe pouvant être résolu en temps polynomial. Nous réutilisons les notations introduites en section 3.3 pour expliciter la réduction. Cette réduction est basée sur la représentation sous forme de flot des variables auxiliaires de stockage sain et défaillant ainsi que des ruptures de stock. Cela permet d'inclure les objectifs de stockage et de rupture de stock dans la fonction de minimisation du coût des flots. Cette réduction est présentée ci-après :

1. Pour chaque paire (site $l \in L$, période de temps $t \in T$), créer 3 noeuds $n_{l,t}^h$ (noeud stockage sain), $n_{l,t}^b$ (noeud stockage défaillant) et $n_{l,t}^r$ (noeud rupture de stock).

2. Pour chaque nœud, définir la valeur du potentiel π :

$$\forall l \in L \quad \pi_{n_{l,0}^h} = s_{l,0}^h \quad (3.8a)$$

$$\forall l \in L \quad \pi_{n_{l,0}^b} = -b_{l,0} \quad (3.8b)$$

$$\forall l \in L \quad \pi_{n_{l,0}^f} = s_{l,0}^f \quad (3.8c)$$

$$\forall l \in L, t \in T \setminus \{0\} \quad \pi_{n_{l,t}^h} = \sum_{l' \in L, t' \leq 0} m_{l',l,t}^h + \sum_{t' \leq 0} m_{l,t'}^r \quad (3.8d)$$

$$\forall l \in L, t \in T \setminus \{0\} \quad \pi_{n_{l,t}^b} = -d_{l,t} \quad (3.8e)$$

$$\forall l \in L, t \in T \setminus \{0\} \quad \pi_{n_{l,t}^f} = \sum_{l' \in L, t' \leq 0} m_{l',l,t}^f + d_{l,t} \quad (3.8f)$$

Notons que l'équation (3.8d) implique uniquement les variables $m_{l',l,t}^h$ et $m_{l,t'}^r$ telles que $t' \leq 0$. Ces variables sont en fait des constantes et définies par les données de l'état initial.

3. Pour chaque couple de nœuds sains et de nœuds de rupture de stock, $(n_{l,t}^h, n_{l,t}^b)$:

- Si $t > 0$, créer un arc $(n_{l,t-1}^h, n_{l,t}^h)$. Sa valeur représente le **flot de stockage sain**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t-1}^h, n_{l,t}^h)}$ et son coût associé est 0 si $t - 1 = 0$, μ_l^h sinon.
- Si $t > 0$, créer un arc $(n_{l,t-1}^b, n_{l,t}^b)$. Sa valeur représente le **flot de rupture de stock**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t-1}^b, n_{l,t}^b)}$ et son coût associé est 0 si $t - 1 = 0$, μ_l^b sinon.
- Créer un arc $(n_{l,t}^h, n_{l,t}^b)$. Sa valeur représente le **flot de consommation**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t}^h, n_{l,t}^b)}$ et son coût associé est 0.

4. Pour chaque nœud défaillant $n_{l,t}^f$ avec $t > 0$, créer un arc $(n_{l,t-1}^f, n_{l,t}^f)$. Sa valeur représente le **flot de stockage défaillant**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t-1}^f, n_{l,t}^f)}$ et son coût associé est 0 si $t - 1 = 0$, μ_l^f sinon.

5. Créer un nœud résiduel n^g pour assurer la consistance globale d'une instance telle que :

$$\pi_{n^g} = - \sum_{l \in L, t \in T} (\pi_{n_{l,t}^h} + \pi_{n_{l,t}^b} + \pi_{n_{l,t}^f}) \quad (3.9)$$

6. Pour chaque nœud sain $n_{l,t}^h$ avec $t = Tmax$, créer un arc $(n_{l,t}^h, n^g)$. C'est le **flot d'excédent de stockage sain**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t}^h, n^g)}$ et son coût associé est μ_l^h .

7. Pour chaque nœud de rupture $n_{l,t}^b$ avec $t = Tmax$, créer un arc $(n^g, n_{l,t}^b)$. C'est le **flot d'excédent de rupture de stock**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n^g, n_{l,t}^b)}$ et son coût associé est μ_l^b .

8. Pour chaque nœud défaillant $n_{l,t}^f$ avec $t = Tmax$, créer un arc $(n_{l,t}^f, n^g)$. C'est le **flot d'excédent de stockage défaillant**. Nous étiquetons la valeur de cet arc $x_{(n_{l,t}^f, n^g)}$ et son coût associé est μ_l^{sf} .
9. Pour chaque opération d'approvisionnement $m_{l',t,t'}^h$, créer un arc d'approvisionnement $(n_{l,t}^h, n_{l',t'}^h)$. Nous étiquetons sa valeur $x_{(n_{l,t}^h, n_{l',t'}^h)}$ et son coût associé est $\mu_{l,l'}^{mh}$.
10. Pour chaque opération de retour $m_{l',t,t'}^f$, créer un arc de retour $(n_{l,t}^f, n_{l',t'}^f)$. Nous étiquetons sa valeur $x_{(n_{l,t}^f, n_{l',t'}^f)}$ et son coût associé est $\mu_{l,l'}^{mf}$.
11. Pour chaque opération de réparation $m_{l,t,t'}^r$, créer un arc de réparation $(n_{l,t}^f, n_{l',t'}^h)$. Nous étiquetons sa valeur $x_{(n_{l,t}^f, n_{l',t'}^h)}$ et son coût associé est μ_l^{mr} .

La figure 3.3 montre le résultat (sans étiquetage) de la réduction sur l'instance du TDPP présentée en figure 3.1 en une instance du MCNFP.

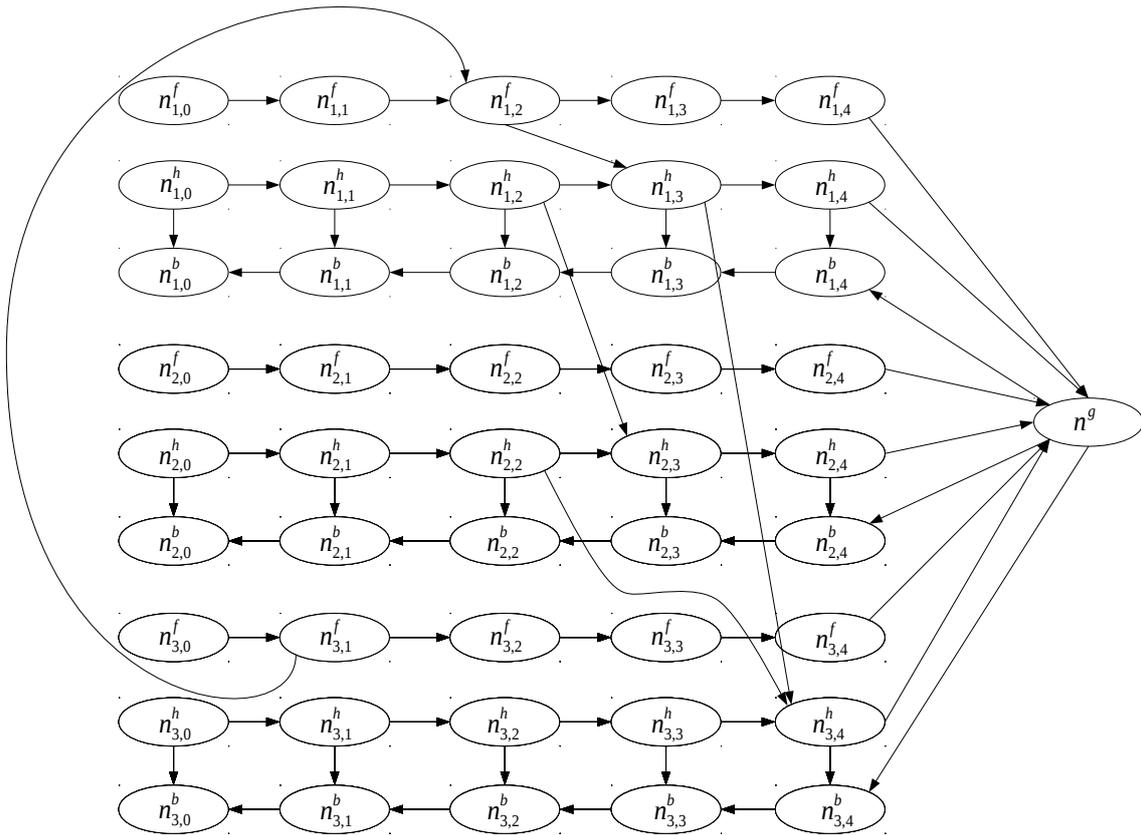


FIGURE 3.3 – Instance du MCNFP obtenue par réduction de l'instance TDPP de la figure 3.1

Cette réduction montre que le cœur du TDPP peut être modélisé en une version convexe du MCNFP. Fontes et Gonçalves [2007] ont démontré que des coûts concaves sont obligatoires

pour que le MCNFP soit *NP-difficile* et que dans le cas contraire le MCNFP était polynomial. Toutefois, la réduction que nous présentons n'inclût pas la contrainte de consommation locale. Pour modéliser cette contrainte, il est nécessaire d'ajouter des fonctions coût concaves et de dupliquer le graphe encore une fois ce qui rend la réduction trop coûteuse pour être réellement intéressante. Nous montrons dans la section suivante que cette contrainte de consommation locale rend notre problème *NP-difficile*.

3.4.3 Réduction du problème de somme de sous-ensembles

Nous démontrons que le TDPP est *NP-difficile* en réduisant le problème de somme de sous-ensembles en un temps polynomial. Le problème de somme de sous-ensembles - en anglais, Subset Sum Problem - est un problème *NP-complet* [Garey et Johnson, 1990] et se définit comme suit : Étant donné un ensemble K fini de z entiers positifs $[y_1..y_z]$ et un entier positif B , existe il un sous-ensemble $K' \subseteq K$ tel que $\sum_{k \in K'} y_k = B$? La réduction proposée intègre la contrainte de consommation locale modélisée par les équations (3.3d), (3.3c), (3.3a) et (3.3b) qui force la consommation des pièces saines disponibles sur un site s'il existe une demande non résolue sur la même période de temps.

Theorem 1. TDPP est *NP-difficile*.

Démonstration. Nous proposons la réduction suivante du problème Subset Sum vers la version décision du TDPP (fonction coût inférieure ou égale à k avec $k \leq 0$) :

1. L'horizon de temps T_{max} est fixé à 3 périodes de temps.
2. Créer 3 ensembles distincts de sites $L1$, $L2$ et $L3$ tels que $L1 = \{1..z\}$, $L2 = \{z+1..3z\}$ et $L3 = \{3z+1..3z+2\}$. Nous définissons $L = L1 \cup L2 \cup L3 = \{1, \dots, 3z+2\}$.
3. Fixer les niveaux de stock initiaux : $\forall l \in L1, s_{l,0}^h = y_l + 1$ et $\forall l \in L2, l \in L3, s_{l,0}^h = 0$.
4. Créer la prévision de la demande :
 $\forall l \in L2, d_{l,1} = 1, d_{3z+1,3} = B$ et $d_{3z+2,3} = \sum_{k=1}^z y_k - B$.
5. Définir les coûts associés aux ruptures de stock :
 $\forall l \in L2, \mu_l^b = 0, \mu_{3z+1}^b = 1$ et $\mu_{3z+2}^b = 1$.
6. Créer 2 routes d'approvisionnement : $\forall l \in L2 m_{l,l+z,1,2}^h$ et $m_{l,l+2z,1,2}^h$.
7. Tous les autres coûts non mentionnés sont fixés à 0.
8. Les routes d'acheminements sont considérées comme pouvant être utilisées à chaque période de temps.

La valeur de la fonction coût est égale à 0 (i.e., toutes les défaillances apparaissant sur $l = 3z+1$ and $l = 3z + 2$ sont satisfaites) si et seulement s'il existe un sous-ensemble $K' \subseteq K$ tel que $\sum_{k \in K'} y_k = B$. \square

L'idée de la réduction est d'empêcher la division des stocks initiaux pour assurer que l'intégralité du stock d'un site $l \in L1$ soit consommé sur un seul et unique site $l' \in L3$. Cette non séparation est assurée par les demandes intermédiaires sur les sites de $L2$. En effet, ces demandes n'ont pas de coût mais elles forcent la consommation d'une pièce (contrainte de consommation locale). Si le stock initial provenant d'un site de $L1$ est divisé en 2, alors 2 pièces seront consommées au niveau intermédiaire et la quantité de pièces disponibles en sortie des sites de $L2$ sera insuffisante pour résoudre l'ensemble des demandes sur les sites de $L3$. Ainsi, la seule solution pour que l'intégralité des défaillances sur les sites de $L3$ soit résolue est de ne pas séparer les stocks. Si toutes ces défaillances peuvent être résolues alors il existe un sous-ensemble $K' \subseteq K$ tel que $\sum_{k \in K'} y_k = B$.

Exemple 1. La figure 3.4 montre l'instance TDPP obtenue par réduction du Subset Sum avec $K = [8; 18; 9; 2]$ et $B = 17$. Dans cet exemple, il existe un sous-ensemble de K dont la somme est égale à B ($8 + 9 = 17$).

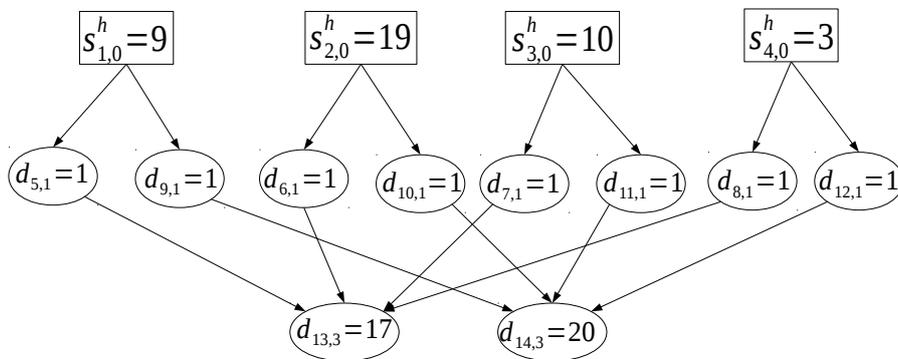


FIGURE 3.4 – Somme de sous-ensembles vers TDPP avec $K = [8; 18; 9; 2]$ et $B = 17$

Nous établissons les volumes de pièces stockées et de demandes selon la réduction proposée. Il s'agit alors de proposer un plan, s'il existe, permettant de satisfaire l'ensemble des demandes des sites de $L3$. La figure 3.5 étiquette les arcs du graphe et présente ce plan. Comme nous pouvons le remarquer, la quantité de pièces entrantes sur les sites de $L3$ correspond au volume de demandes et par conséquent la valeur résultante de ce plan est de 0 selon la fonction coût. Nous en déduisons qu'il existe un sous-ensemble de K dont la somme est égale à B .

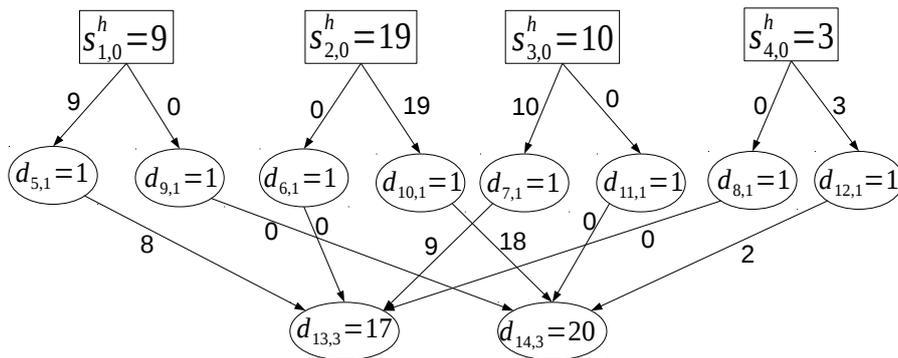


FIGURE 3.5 – Étiquetage du graphe avec $K = [8; 18; 9; 2]$ et $B = 17$

Exemple 2. Prenons maintenant un exemple avec $K = [9; 18; 9; 2]$ et $B = 1$. La figure 3.6 présente la réduction et l'étiquetage d'un plan optimal pour cette instance. Dans ce cas, la défaillance du site 13 peut être résolue mais seulement 35 des 36 défaillances du site 14 sont résolues. Par conséquent, la valeur de la fonction coût est supérieure à 0, l'instance du TDPP en version décision est insatisfiable, il n'existe pas de sous-ensemble de K dont la somme est égale à B .

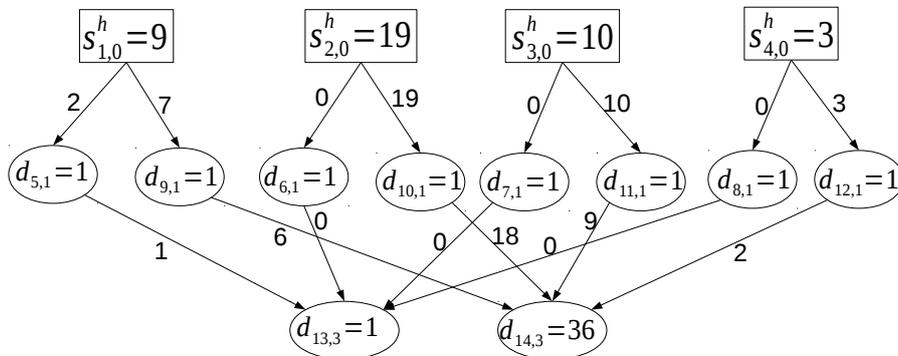


FIGURE 3.6 – Un autre exemple de réduction de la somme de sous-ensembles

3.5 Un modèle d'aide à la décision

3.5.1 Interprétation des résultats

Dans l'état actuel, l'essence du modèle est de fournir aux utilisateurs un plan des opérations à réaliser pour limiter le coût global de la chaîne d'approvisionnement.

Le modèle peut aussi être utilisé comme un outil de simulation et de comparaison. Il peut

permettre de tester de nouvelles topologies, de nouvelles fréquences d'approvisionnement ou encore des niveaux de stock initiaux différents. Un utilisateur peut, par exemple, générer un plan sur sa chaîne d'approvisionnement puis modifier la topologie et comparer le résultat du nouveau plan avec celui généré sur la topologie réelle. Évidemment, cette utilisation du modèle est empirique et ne permettra pas de trouver le réseau de la chaîne d'approvisionnement optimale. Il peut néanmoins fournir aux utilisateurs des informations quant à la nécessité de restructurer la chaîne d'approvisionnement.

De plus, les résultats fournis par le modèle peuvent apporter des informations sur les quantités de pièces utilisées pour gérer la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, si la quantité de pièces défectives stockées dans un site ne descend jamais sous un certain seuil et que les performances en terme de qualité de service sont satisfaisantes, on peut affirmer que ces pièces ne sont pas nécessaires au bon fonctionnement de la chaîne et que l'on pourrait les supprimer pour limiter le coût de stockage. Reprenons le même cas, mais avec cette fois-ci une faible qualité de service, alors cela signifie que ces pièces pourraient être utilisées d'une meilleure manière et qu'elles sont mal localisées. Encore une fois, ces résultats demandent une étude détaillée du plan et sont obtenus de manière empirique. Ils permettent néanmoins d'obtenir des informations importantes pour les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement.

3.5.2 Extensions

Le TDPP est générique topologiquement et temporellement. Toutefois, s'il permet de modéliser de nombreuses structures de chaînes d'approvisionnement, il n'est pas applicable à tous les problèmes de gestion. En effet, comme nous l'avons déjà vu, ces problèmes sont concrets et incluent généralement des contraintes particulières. Nous présentons ici quelques propositions qui nous paraissent pertinentes dans le contexte de la gestion de chaînes d'approvisionnement et qui permettraient d'étendre le TDPP à de nouvelles applications.

Dans la modélisation proposée, le TDPP est limité à 3 opérations possibles (approvisionnement, retour, réparation) et suppose une quantité constante de pièces. Nous pourrions introduire d'autres opérations au modèle pour permettre de faire varier la quantité totale de pièces circulant dans la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, il semble raisonnable d'inclure les opérations de vente et d'achat de pièces. L'opération d'achat, plus coûteuse que l'opération de réparation permettrait d'obtenir avec un délai moindre une pièce saine et ainsi de résoudre des défaillances qui ne pourraient l'être si l'on devait attendre une réparation. L'opération de vente quant à elle permettrait d'évacuer des pièces saines ou défectives de la chaîne d'approvisionnement et de récupérer de la valeur. La figure 3.7 présente une chaîne d'approvisionnement incluant un vendeur et un acheteur.

De la même manière, notre modèle est actuellement restreint à la gestion des opérations de maintenance et de remplacement des défaillances. D'autres opérations pourraient être simple-

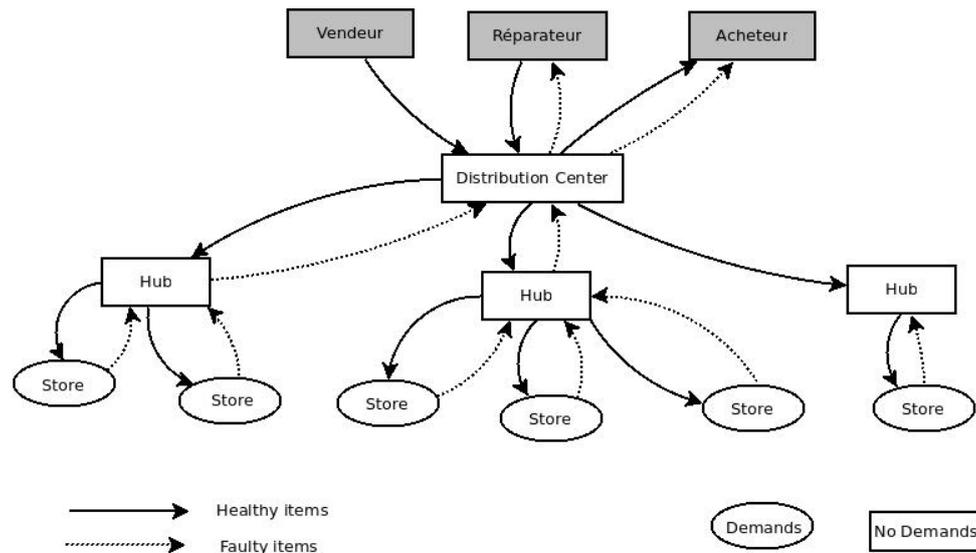


FIGURE 3.7 – Une chaîne d’approvisionnement avec un acheteur et un vendeur

ment ajoutées au modèle telles que les opérations d’installation (i.e., l’approvisionnement d’une pièce vers un nouveau site) ou les opérations de démantèlement (i.e., les pièces défectueuses ne sont pas remplacées). Ces opérations peuvent être facilement modélisées par l’ajout de deux matrices de constantes, l’une définissant les demandes d’installation (on doit satisfaire la demande mais on ne récupère pas de pièce défectueuse) et l’autre les demandes de démantèlement (on récupère une pièce défectueuse mais on ne doit pas satisfaire la demande).

Une autre contrainte commune dans les chaînes d’approvisionnement est la gestion de la capacité. Dans le TDPP cette contrainte de capacité peut être appliquée à différents niveaux (quantités transférées, quantités réparées, quantités stockées). Ces contraintes de capacités peuvent être modélisées par l’ajout de matrices et d’inégalités bien qu’elles ajoutent de la complexité au problème.

Le modèle peut également être étendu pour prendre en compte la notion de stock de sécurité. Deux approches sont possibles pour modéliser ce stock. La première considère que l’un des buts du modèle n’est plus d’éviter les ruptures de stock mais d’éviter que le niveau de stock descende sous un seuil qui est le stock de sécurité. Cette approche ne demande pas de modifications importantes du modèle. Il suffit d’ajouter une matrice correspondant au stock de sécurité et qu’une rupture de stock est produite dès lors que la différence entre niveau de stock et stock de sécurité est inférieure à 0. La seconde méthode demande plus de modifications. Elle consiste à considérer le stock de sécurité comme un objectif à part entière. Ainsi, nous ajouterons un coût au modèle pour exprimer le non-respect du stock de sécurité, ce coût étant moindre que celui d’une défaillance non résolue. Cette méthode a l’avantage de prioriser les objectifs : on satisfait d’abord les défaillances et si possible on maintient le niveau du stock de sécurité.

D’autres extensions peuvent être considérées. Par exemple, les pièces non réparables pourraient

être prise en compte en utilisant un taux de casse. Le modèle pourrait également supporter les dépendances entre pièces et les pièces interchangeables. Enfin, nous pourrions envisager l'intégration de nouveaux types de coûts. Par exemple, des coûts concaves avec des frais forfaitaires pour l'envoi de la première pièce lors d'un transfert.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une modélisation générique sous forme de MIP du problème de planification tactique de distribution d'inventaire en boucle fermée (TDPP). Nous avons présenté deux réductions. La première, partielle, permet d'établir un lien entre un problème de flot polynomial et le cœur du TDPP. La seconde réduction démontre que le TDPP est un problème *NP-difficile* en réduisant le problème de somme de sous-ensembles vers le TDPP. Enfin, nous avons présenté une liste d'extensions possibles au modèle qui permettrait de modéliser une variété plus grande de chaînes d'approvisionnement en intégrant différentes contraintes concrètes.



4

Résolution du TDPP

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes de résolution que nous proposons pour résoudre le problème TDPP. Nous commençons par brièvement présenter les approches classiques d'optimisation. Nous détaillons ensuite une méthode d'optimisation exacte et exposons les défauts de ce type d'approche. Par la suite, nous décrivons une première métaheuristique qui nous servira de base pour la métaheuristique Best Improving Sequence (BIS). Cette méthode constitue la méthode de résolution utilisée dans notre système d'aide à la décision. Enfin, nous détaillons plusieurs expérimentations pour étudier et comparer les performances de notre méthode. Nous évaluons également l'impact du paramétrage de la pondération de la fonction coût sur le type de plan obtenu et les politiques de mise en œuvre sous-jacentes.

4.2 Méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation combinatoire consiste à déterminer la meilleure solution S^* parmi les solutions réalisables Ω . Classiquement pour un problème de maximisation, avec f la fonction coût associée, on a : $S^* = \max_{S \in \Omega} (f(S))$.

Plusieurs approches sont possibles pour résoudre ce type de problème et de nombreuses taxonomies classifient ces approches de manière différente. Une vision classique est de regrouper ces techniques en 2 catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées. Les méthodes exactes sont des méthodes qui garantissent l'optimalité de la meilleure solution trouvée

[Puchinger et Raidl, 2005]. L'approche exacte la plus simple est d'explorer toutes les solutions existantes et de garder la meilleure. Toutefois, cette approche peut se révéler rapidement limitée et n'est pas applicable à des problèmes très difficiles. En effet, ces problèmes sont caractérisés par un espace de recherche de taille exponentielle et une recherche exhaustive ne permet pas le passage à l'échelle. D'autres approches exactes permettent de limiter l'exploration de l'espace de recherche tout en assurant l'optimalité (e.g., branch and bound, relaxation Lagrangienne, branch and cut, branch and price, ...) [Nemhauser et Wolsey, 1988]. Toutefois, ces méthodes exactes rencontrent des difficultés pour résoudre des instances de taille importante sur des problèmes difficiles.

Dans ce contexte, les méthodes approchées offrent une alternative intéressante permettant d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps raisonnable. Nous détaillons plus précisément le fonctionnement de ces méthodes approchées en section 4.4.

4.3 Une méthode exacte pour TDPP

La première approche que nous proposons pour résoudre TDPP est une approche exacte. Cette approche s'appuie sur l'optimisation mathématique. Dans notre cas, le problème est constitué de variables entières, de variables réelles et de contraintes linéaires. Nous choisissons alors une approche basée sur la Programmation Mixte en Nombres Entiers (MIP). Ces approches sont connues pour être particulièrement performantes pour résoudre des problèmes modélisés sous forme de graphes. Elles sont notamment employées pour résoudre des problèmes de tournées ou d'ordonnancement.

Le MIP que nous proposons est directement basé sur la modélisation exposée dans le chapitre 3 aussi il ne sera pas détaillé dans cette section. Notons toutefois que les équations (3.3a) et (3.3b) utilisent la fonction \max et ne sont pas linéaires en l'état. Cependant, l'égalité $r = \max(x, y)$ peut être linéarisée de la façon suivante [Vielma, 2015] : Avec M un très grand nombre et δ une variable binaire alors $r \geq x; r \geq y; r \leq x + \delta \times M$ et $r \leq y + (1 - \delta) \times M$ assure $r = \max(x, y)$.

Cette modélisation MIP permet d'obtenir la solution optimale au TDPP. Cependant, nous verrons en section 4.6.3.1 que le temps de résolution augmente drastiquement lorsque la taille des instances augmente.

4.4 Les méthodes de résolution approchées

Une solution pour résoudre des instances de grande taille en un temps raisonnable est l'emploi de méthodes approchées telles que les métaheuristiques.

Les métaheuristiques sont des méthodes génériques permettant d'apporter des solutions aux problèmes d'optimisation. Elles sont définies par [Glover et Kochenberger \[2006\]](#) comme étant "des méthodes qui orchestrent une interaction entre des procédures d'amélioration locales et des stratégies de plus haut niveau afin de créer un processus capable de s'échapper d'optima locaux et d'accomplir une recherche robuste dans un espace de solutions". Nous comprenons ici que les métaheuristiques travaillent sur un ensemble de solutions (appelé espace de recherche) et qu'elles alternent généralement 2 phases :

- **Intensification** : on améliore la qualité de la solution actuelle en utilisant une procédure d'amélioration locale. Lorsque la solution actuelle n'est plus améliorable, on considère que l'on est dans un optimum local.
- **Diversification** : on modifie, sans nécessairement l'améliorer, la solution actuelle pour se déplacer dans l'espace de recherche. Cette phase permet d'explorer l'espace de recherche et de sortir d'un optimum local.

Au cours des années, de nombreuses métaheuristiques ont été proposées. Elles offrent des procédures pour trouver des optima locaux de bonne qualité et pour explorer l'espace de recherche de manière intelligente. D'une métaheuristique à l'autre, les stratégies de diversification et d'intensification vont varier et l'exploration de l'espace de recherche sera plus ou moins étendue. Plusieurs classifications des métaheuristiques existent. La figure 4.1 présente une classification connue qui sépare les métaheuristiques en 2 grandes catégories : les méthodes à base de populations et les méthodes à base de solutions.

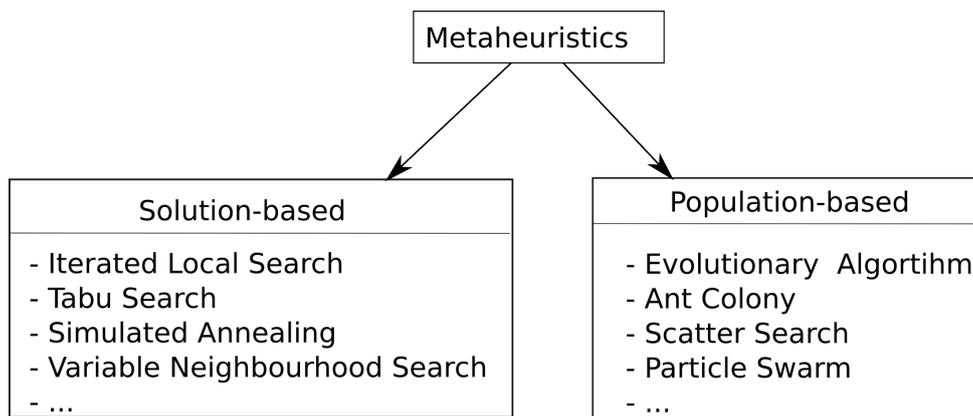


FIGURE 4.1 – Une classification simple des métaheuristiques.

Pour ce qui concerne TDPP, nous nous intéressons plus particulièrement aux méthodes à base de solutions. Ces méthodes sont classiquement définies par un espace de recherche, une fonction de voisinage, une fonction d'évaluation et un choix d'heuristiques.

Espace de recherche et fonction d'évaluation

L'espace de recherche définit l'ensemble des solutions Ω réalisables. La qualité de ces solutions est évaluée par une fonction d'évaluation : $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$.

Fonction de voisinage

La fonction de voisinage est une fonction N qui associe un sous-ensemble de Ω à toute solution $\omega \in \Omega$, $N : \Omega \rightarrow 2^\Omega$. Une solution $\omega' \in N(\omega)$ est dite voisine de ω . La transition d'une solution ω à une solution voisine ω' est appelée *mouvement*. Dans le cas du TDPP nous présentons 2 fonctions de voisinage qui seront détaillées respectivement en sections 4.5.1 et 4.5.3.

Choix d'heuristiques

Ces heuristiques distinguent les différentes méthodes. Elles incluent les processus de diversification qui permettent de parcourir l'espace de recherche. Elles incluent également le processus de sélection qui permet de choisir quel voisin sélectionner pour passer d'une solution à une autre.

Nous utiliserons dans ce manuscrit la méthode Iterated Local Search (ILS) qui s'appuie sur la recherche locale.

Recherche Locale

Classiquement, la recherche locale combine un voisinage avec une méthode de sélection pour intensifier la recherche. Les méthodes de sélection du voisin sont multiples. Les plus connues sont les suivantes :

- Meilleur améliorant. Le meilleur voisin (celui qui améliore le plus la solution courante) est sélectionné. Si plusieurs voisins fournissent la meilleure amélioration alors la sélection est faite aléatoirement parmi ces voisins. Par conséquent, l'ensemble du voisinage doit être évalué pour sélectionner ce voisin. Cette méthode de sélection est la plus coûteuse en ressources.
- Premier améliorant. Le premier voisin évalué qui améliore la solution courante est sélectionné. L'ordre d'évaluation des voisins peut être aléatoire ou suivre une stratégie. Dans le pire cas où il n'existe pas de voisin améliorant, cette méthode devra évaluer l'ensemble du voisinage.
- Aléatoire. Un voisin est sélectionné aléatoirement sans vérifier s'il améliore ou non la solution courante.

Un compromis entre performance et qualité serait intuitivement le choix du premier améliorant. Toutefois, la méthode de sélection est primordiale et doit être choisie avec attention selon le problème et le voisinage utilisés. L'algorithme 1 décrit le fonctionnement de la recherche locale.

L'algorithme 2 décrit le fonctionnement de Iterated Local Search (ILS).

Algorithm 1 L'algorithme de Recherche Locale pour un problème de minimisation

Procédure RechercheLocale :

Input: SolutionInitiale ω_0 ;

```

1:  $\omega^* \leftarrow \omega_0$ 
2:  $\omega \leftarrow \omega_0$ 
3: repeat
4:    $\omega \leftarrow \text{Selection}(N(\omega))$ 
5:   if  $F(\omega) \leq F(\omega^*)$  then
6:      $\omega^* \leftarrow \omega$ 
7:   end if
8: until condition de fin ;

```

Algorithm 2 L'algorithme Iterated Local Search

Procédure IteratedLocalSearch :

```

1:  $\omega_0 \leftarrow \text{SolutionInitiale}$  ;
2:  $\omega^* \leftarrow \text{RechercheLocale}(\omega_0)$  ;
3: repeat
4:    $\omega' \leftarrow \text{Perturbation}(\omega^*)$ 
5:    $\omega^{*'} \leftarrow \text{RechercheLocale}(\omega')$ 
6:    $\omega^* \leftarrow \text{Acceptation}(\omega^*, \omega^{*'})$  ▷ critère d'acceptation de la solution
7: until condition de fin ;

```

4.5 Nos métaheuristiques

Pour présenter nos métaheuristiques, nous utilisons les notations proposées en section 3.3. Les métaheuristiques que nous présentons travaillent sur des actions unitaires (cela assure le transfert ou la réparation d'une seule pièce). Ce choix est motivé par le fait que nous ne travaillons pas nécessairement sur des volumes de pièces importants et que, dans ce cas, il est obligatoire d'être précis pour éviter la perte de pièces.

Les actions unitaires sont :

- L'action de retour $B_{l,l',t,t'}$ avec $((l, t), (l', t')) \in G^f$ qui se traduit par l'incrémenta-tion des variables $m_{l,l',t,t'}^f$ et $s_{l',t'}^f, \forall t'' \geq t'$ ainsi que la décrémentation de $s_{l,t}^f, \forall t'' \geq t$.
- L'action de réparation $R_{l,l,t,t'}$ avec $((l, t), (l, t')) \in G^{mr}$ qui se traduit par l'incrémenta-tion des variables $m_{l,t,t'}^r$ et $s_{l,t'}^h, \forall t'' \geq t'$ ainsi que la décrémentation de $s_{l,t}^f, \forall t'' \geq t$.
- L'action d'approvisionnement $A_{l,l',t,t'}$ avec $((l, t), (l', t')) \in G^h$ qui se traduit par l'incrémenta-tion des variables $m_{l,l',t,t'}^h$ et $s_{l',t'}^h, \forall t'' \geq t'$ (modulo la consommation éventuelle de la pièce pour résoudre une défaillance) ainsi que la décrémentation de $s_{l,t}^h, \forall t'' \geq t$.

Nous notons M l'ensemble des actions unitaires. Nous introduisons la notation $*$ pour représenter un paramètre quelconque d'une action unitaire restant cohérente avec les contraintes topologiques et calendaires. Par exemple, $A_{l,*,t,*} \in M$ représente une action d'approvisionnement avec pour origine le site l et la période de temps t quels que soient le site et la période de temps destination tant qu'ils restent cohérents avec le réseau. De la même manière, $A_{*,*,t,*} \in M$ représente une des actions d'approvisionnement possible.

Un plan solution P correspond à un étiquetage du graphe G^* . Il peut également être représenté sous la forme d'un multiensemble d'actions unitaires¹. Nous utiliserons cette représentation dans la suite du manuscrit. Notons qu'un plan P vide (sans actions) peut se noter $P = \emptyset$ et que l'ajout d'une action unitaire $X_{l,l',t,t'}$ à un plan P résulte en un nouveau plan P' tel que $P' = P \cup \{X_{l,l',t,t'}\}$. Les deux métaheuristiques que nous présentons en section 4.5.1 et 4.5.3 utilisent cette représentation. Par conséquent, l'espace de recherche est défini par : $\Omega = 2^{\mathcal{M}}$ où \mathcal{M} est l'ensemble des plans réalisables (i.e., cohérents avec les contraintes du problème). La fonction d'évaluation est définie selon la fonction coût présentée en équation (3.4e).

Pour définir nos métaheuristiques, nous avons besoin d'introduire de nouvelles variables. Nous définissons la variable pseudo-booléenne $a_{l,t}^f$ qui décrit si l'envoi d'une pièce défaillante est réalisable depuis le site l à la période de temps t . Cet envoi est possible uniquement si le stock défaillant à la période t est suffisant et s'il ne vient pas s'opposer à une action prévue ultérieurement. Cette variable est calculée par l'équation (4.1) :

$$\forall l \in L, t \in T, a_{l,t}^f = \begin{cases} 1 & \text{si } s_{l,t}^f > 0 \text{ et } \forall t' \in [t, Tmax], \sum_{\substack{l' \in L, \\ t' > t}} m_{l,l',t,t'}^f > 0 \rightarrow s_{l,t}^f \geq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

¹Si une même route est empruntée 10 fois au même moment, l'action unitaire correspondante sera présente 10 fois dans le plan.

De la même manière, nous définissons la variable pseudo-booléenne $a_{l,t}^h$ qui décrit si l'envoi d'une pièce saine est réalisable depuis le site l à la période de temps t . Cet envoi est réalisable uniquement s'il ne vient pas s'opposer à une action prévue ultérieurement. Notons que pour vérifier si cet envoi est possible, nous vérifions le stock présent à la période de temps t et aux périodes de temps où d'autres actions sont prévues. Il est possible que l'envoi de la pièce produise des ruptures de stock sur certaines périodes de temps si cela ne s'oppose pas à d'autres mouvements du plan déjà prévus. Dans tous les cas, un envoi réalisable (i.e., $a_{l,t}^h = 1$) garantit le respect de la contrainte de consommation locale et la non annulation d'actions ultérieures prévues par le plan. Cette variable est calculée par l'équation (4.2) :

$$\forall l \in L, t \in T, a_{l,t}^h = \begin{cases} 1 & \text{si } s_{l,t}^h > 0 \text{ et } \forall t' \in]t, Tmax], \sum_{\substack{v' \in L, \\ t' > t}} m_{l,v',t'}^h > 0 \rightarrow s_{l,t'}^h \geq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

4.5.1 Une première métaheuristique

Nous présentons dans cette section la première métaheuristique proposée. Cette méthode est naïve mais elle permet d'identifier les points clés du problème et d'aboutir à une seconde proposition plus performante.

4.5.1.1 Idée

Les variables de décision de notre problème représentent des actions qui déplacent les pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Il apparaît naturel de définir un voisinage qui travaille sur ces actions. Dans cette première approche nous choisissons de nous abstraire de la gestion des retours de pièces défectueuses. Nous appliquons un processus de retour automatique qui renvoie dès que possible les pièces défectueuses vers le centre de distribution le plus proche. Le voisinage proposé s'intéresse alors uniquement à la gestion des actions d'approvisionnement et de réparation. Nous utiliserons dans cette section l'exemple de chaîne d'approvisionnement présenté en figure 4.2. Cette chaîne est composée de deux niveaux : un centre de distribution qui répare les pièces en une période de temps et deux magasins. Les magasins ont chacun une demande et le centre de distribution possède au début de l'horizon de temps une pièce saine et une pièce défectueuse. Nous faisons l'hypothèse des coûts suivants : 1 pour le stockage, 10 pour réparer et 100 pour une rupture de stock.

Voisinage

Le voisinage défini ici considère uniquement les actions réalisables, c'est-à-dire consistantes avec le réseau mais aussi satisfaisant les contraintes de stocks (une action ne peut être réalisée

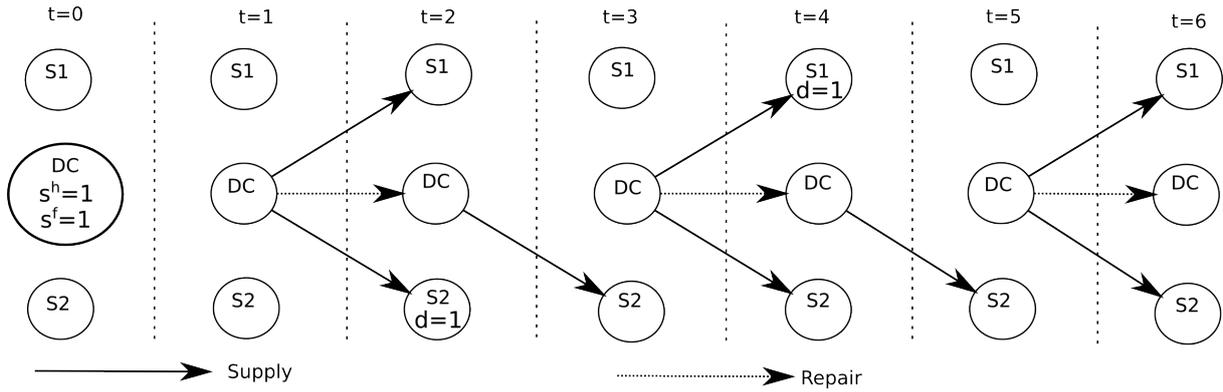


FIGURE 4.2 – Un exemple de chaîne d'approvisionnement à deux niveaux.

que si le stock disponible du site d'origine est supérieur à 0 et que cela ne viole pas la contrainte de consommation locale). Nous définissons un *mouvement* entre 2 plans comme pouvant être l'application :

- d'une action d'approvisionnement unitaire $A_{l,l',t,t'}$ avec $a_{l,t}^h = 1$.
- d'une action de réparation unitaire R_{l_1,l_1,t_1,t_2} suivie d'une action d'approvisionnement unitaire A_{l_1,l_2,t_3,t_4} avec $a_{l_1,t_1}^f = 1$, $t_2 \leq t_3$ et $\forall t \in [t_2, \dots, t_3], b_{l_1,t} = 0$

Il peut sembler étrange de considérer dans notre structure de voisinage la combinaison d'actions réparation et approvisionnement. Cela est dû au fait que la fonction d'évaluation indiquant l'impact d'un *mouvement* est définie sur la fonction coût (le coût global du plan). Or, l'impact d'une action de réparation seule est généralement négatif (si le coût de réparation est supérieur à celui de stockage). Il faut alors combiner cette action de réparation à une action d'approvisionnement pour évaluer et différencier l'impact des différentes actions possibles de réparation. Plus formellement, la fonction de voisinage N d'un plan P se définit de la manière suivante :

$$N(P) = \{P' | P' = P \cup \{A_{l_1,l_2,t_1,t_2} | a_{l_1,t_1}^h = 1\}\} \cup \\ \{P' | P' = P \cup \{R_{l_1,l_1,t_1,t_2} | a_{l_1,t_1}^f = 1\}\} \cup \\ \{A_{l_1,l_2,t_3,t_4}\} \text{ avec } t_2 \leq t_3 \text{ et } \forall t \in [t_2, \dots, t_3], b_{l_1,t} = 0\}$$

Considérons l'exemple proposé en figure 4.2, l'action de réparation R_{DC,DC,t_1,t_2} évaluée de manière unique a un impact de -15 (-5 de coût de stockage, -10 de coût de réparation) ce qui signifie que cette action seule n'apporte rien au plan. Cette action est pourtant intéressante et nécessaire à l'obtention d'un plan de bonne qualité. En la combinant avec l'action d'approvisionnement $A_{DC,S1,t_3,t_4}$, l'impact évalué est alors de 295 (300 pour les 3 périodes de temps de rupture de stock évitées, -10 de réparation et 5 de stockage évité).

Sélection

Nous choisissons d'utiliser la stratégie de sélection du meilleur améliorant. Ce choix est motivé par l'algorithme utilisé. En effet, dans le TDPP, les pièces sont limitées et nous ne permettons pas de revenir sur des actions unitaires déjà effectuées. Ainsi, il est essentiel que chaque action unitaire soit choisie avec soin pour aboutir à un plan de qualité.

L'algorithme 3 présente l'ILS complète. L'algorithme présenté est une ILS classique. No-

Algorithm 3 ILS - première métaheuristique

Procedure Search :

Input: Les constantes du problème, un nombre de restarts, un plan P_0

Output: Un plan

```

1:  $P^* \leftarrow P_0$ 
2: repeat
3:    $P \leftarrow P_0$ 
4:   repeat
5:     Choisir  $P' \in N(P)$  tel que  $F(P') = \max_{x \in N(P)} F(x)$            ▷ meilleur voisin
6:     if  $F(P') \leq F(P)$  then
7:        $P \leftarrow P'$ 
8:     end if
9:   until Pas d'amélioration possible
10:  if  $F(P) \leq F(P^*)$  then
11:     $P^* \leftarrow P$ 
12:  end if
13: until nombre de restarts atteint ;
14: return  $P^*$ 

```

tons toutefois que l'algorithme ne comporte pas réellement de processus de diversification. En effet, la seule différence qui peut apparaître entre deux recherches locales intervient au niveau de la sélection du meilleur voisin : si plusieurs voisins améliorent de manière égale la solution alors la sélection est aléatoire parmi ces voisins. Nous n'avons pas proposé de processus de diversification pour cet algorithme car les difficultés majeures qu'il rencontre (voir section 4.5.2) sont flagrantes et nous avons préféré proposer une nouvelle métaheuristique.

4.5.2 Difficultés

Les difficultés rencontrées par la métaheuristique naïve nous imposent le développement d'une nouvelle proposition. En effet, cette métaheuristique ne fonctionne efficacement que sur des chaînes d'approvisionnement composées de deux niveaux : la portée d'un *mouvement* est limitée à une (approvisionnement) ou deux (réparation puis approvisionnement) actions unitaires. Cette portée n'est pas suffisante et ne permet pas de guider correctement la recherche dans des chaînes d'approvisionnements constituées de plusieurs niveaux. Prenons l'exemple de la chaîne d'approvisionnement présentée en figure 4.3 avec les coûts suivants : 1 pour le stockage au

centre de distribution, 5 pour stocker sur $S1$, $S2$ et $S3$, 10 pour réparer et 100 pour une rupture de stock. Intuitivement le choix le plus intéressant pour satisfaire l'unique demande est de pro-

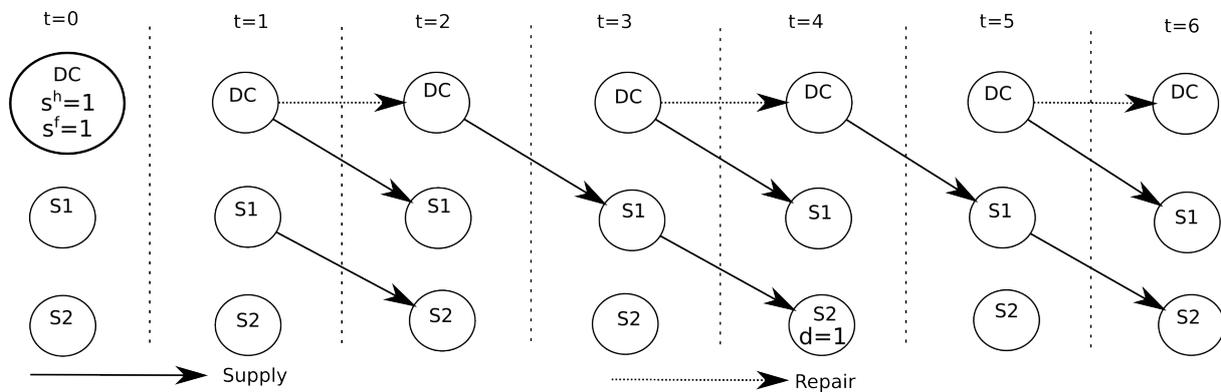


FIGURE 4.3 – Un exemple de chaîne d'approvisionnement à 3 niveaux.

céder à l'action $A_{DC,S1,t2,t3}$ suivie de l'action $A_{S1,S2,t3,t4}$. Toutefois, l'ILS que nous proposons ne permet pas ces mouvements. En effet, l'application de l'action $A_{DC,S1,t2,t3}$ seule dégrade le plan (car le stockage sur $S1$ et $S2$ est plus coûteux que sur le centre de distribution). Ainsi, cette action ne sera pas effectuée et ne permettra pas d'appliquer l'action suivante qui, elle, améliorerait le plan. On comprend ici la faiblesse de l'approche face à des chaînes d'approvisionnements plus complexes.

Un autre problème de cette proposition est la non gestion des actions de retour. En effet, si on peut imaginer une gestion du retour automatique (par exemple, au plus vite) dans une chaîne d'approvisionnement simple, il serait intéressant d'inclure cette gestion si notre solution venait à être appliquée à une chaîne d'approvisionnement qui inclût plusieurs réparateurs.

Enfin, dans cette métaheuristique, les réparations ne peuvent être effectuées que si elles sont couplées avec une action d'approvisionnement. Cette vision peut être erronée. En effet, dans certaines chaînes d'approvisionnement, toutes les pièces sont réparées puis stockées ce qui ne serait pas un fonctionnement possible avec cette méthode.

D'autres problèmes interviennent plus localement dans le choix des *mouvements* effectués et peuvent mener à un optimum local. Notre seconde proposition présentée en section 4.5.3 apportera des réponses à ces problèmes.

4.5.3 La métaheuristique Best Improving Sequence

Nous présentons dans cette section la métaheuristique Best Improving Sequence (BIS) qui constitue l'algorithme de résolution utilisé par notre solveur. Nous introduisons l'algorithme 4 qui décrit le fonctionnement global de cette métaheuristique. Nous détaillons dans la suite de cette section les différentes composantes de la métaheuristique BIS. Notons que la méthode

BIS est basée sur une structure de données spécifique qui associe à chaque action unitaire un triplet de valeurs (GainC, Next, GainI). Ces valeurs seront décrites dans la suite de ce chapitre de même que la mise à jour de la structure de données.

Algorithm 4 L'algorithme BIS

Input: Les constantes du problème, un nombre de restarts, un plan initial P_0

Output: Un Plan

```

1:  $P^* \leftarrow P_0$ 
2:  $\alpha \leftarrow 0$ 
3: while Nombre de restarts non atteint do
4:    $P \leftarrow P_0$ ;
5:   Construire une séquence  $seq$  avec l'algorithme 6 et les paramètres  $P$  et  $\alpha$ ;
6:   while  $seq \neq seq_\emptyset$  do ▷  $seq_\emptyset$  est la séquence vide
7:      $P \leftarrow P \cup seq$ 
8:     Reconstruire une séquence  $seq$  avec l'algorithme 6 et les paramètres  $P$  et  $\alpha$ ;
9:   end while
10:  if  $F(P) \leq F(P^*)$  then
11:     $P^* \leftarrow P$ 
12:  end if
13:   $\alpha$  croît selon une suite arithmetico-géométrique
14: end while
15: Retourner  $P^*$ 

```

Séquence

Pour permettre de travailler sur des chaînes d'approvisionnement complexes, la méthode BIS s'appuie sur la notion de séquence d'actions. Une séquence, notée seq , est un n-uplet d'actions unitaires composé d'actions de retour, de réparation et d'approvisionnement appliquées à un plan. Une séquence est contrainte telle que :

1. Les actions de retour doivent être antérieures aux actions de réparation qui doivent être elles-mêmes antérieures à celles d'approvisionnement.
2. Une action succédant à une autre action ne peut commencer qu'à une période de temps supérieure ou égale à celle de fin de l'action précédente. Il ne doit pas y avoir de rupture de stock sur cette période de temps pour respecter la contrainte de consommation locale et assurer la continuité de la séquence.
3. Une action succédant à une autre action a pour site origine, le site destination de l'action précédente.
4. Le niveau de stock sur le site qui initie la première action doit être suffisant pour permettre l'application de la séquence sans empêcher le déroulement d'autres mouvements ultérieurs déjà prévus par le plan (et par conséquent respecte la contrainte de consommation locale sur le site initial).

Le nombre d'actions composant une séquence seq est noté $|seq|$. Notons que ce nombre est borné par l'horizon de temps entre 0 et $Tmax - 1$. Le cas particulier de la séquence vide (de taille 0) est noté seq_{\emptyset} .

Nous divisons les séquences en différentes catégories selon le type d'action (approvisionnement, réparation, retour) qui initie la séquence.

L'ensemble des séquences d'approvisionnement, noté SEQ_A , contient l'ensemble des séquences applicables à un plan de la forme :

$$\begin{aligned}
 seq &= (A_{l_1, l'_1, t_1, t'_1}, \dots, A_{l_n, l'_n, t_n, t'_n}) \text{ avec } n = |seq| \text{ et } n > 0 \\
 \text{tel que :} \\
 \forall i \in [1..n[&, l'_i = l_{i+1}, t'_i \leq t_{i+1} \\
 a_{l_1, t_1}^h &= 1 \\
 \forall i \in]1..n] &, b_{l_i, t_i} = 0
 \end{aligned}$$

L'ensemble des séquences de réparation, noté SEQ_R , contient l'ensemble des séquences applicables à un plan de la forme :

$$\begin{aligned}
 seq &= (R_{l_1, l_1, t_1, t'_1}, A_{l_2, l'_2, t_2, t'_2}, \dots, A_{l_n, l'_n, t_n, t'_n}) \text{ avec } n = |seq| \text{ et } n > 0 \\
 \text{tel que :} \\
 l_1 &= l_2, t'_1 \leq t_2 \\
 \forall i \in [2..n[&, l'_i = l_{i+1}, t'_i \leq t_{i+1} \\
 a_{l_1, t_1}^f &= 1 \\
 \forall i \in]1..n] &, b_{l_i, t_i} = 0
 \end{aligned}$$

L'ensemble des séquences de retour, noté SEQ_B , contient l'ensemble des séquences applicables à un plan de la forme :

$$\begin{aligned}
 seq &= (B_{l_1, l'_1, t_1, t'_1}, \dots, B_{l_{m-1}, l'_{m-1}, t_{m-1}, t'_{m-1}}, R_{l_m, l_m, t_m, t'_m}, A_{l_{m+1}, l'_{m+1}, t_{m+1}, t'_{m+1}}, \dots, A_{l_n, l'_n, t_n, t'_n}) \\
 \text{avec } n &= |seq| \text{ et } n > 0 \\
 \text{tel que :} \\
 \forall i \in [1..m[&, l'_i = l_2, l'_i = l_{i+1}, t'_i \leq t_{i+1}, l_m = l'_{m+1}, t'_m \leq t_{m+1} \\
 \forall i \in [m+1..n[&, l'_i = l_{i+1}, t'_i \leq t_{i+1} \\
 a_{l_1, t_1}^f &= 1 \\
 \forall i \in [m+1, \dots, n] &, b_{l_i, t_i} = 0
 \end{aligned}$$

L'ensemble de toutes les séquences applicables à un plan est noté SEQ tel que : $SEQ = \{seq_{\emptyset}\} \cup SEQ_A \cup SEQ_R \cup SEQ_B$.

Voisinage

Nous définissons le voisinage à partir de la notion de séquence. Un *mouvement* entre un plan P et son voisin P' correspond à l'application d'une séquence à P . Ainsi la fonction de voisinage N peut être définie comme suit :

$$N(P) = \{P \cup S \mid S \in SEQ\}$$

Sélection

Pour les raisons déjà évoquées dans la section 4.5.1, nous choisissons de réutiliser la méthode du meilleur améliorant. Toutefois, pour appliquer cette méthode, il est nécessaire d'évaluer l'impact de toutes les séquences existantes. Ces évaluations peuvent se révéler rapidement coûteuses. En effet, il s'agira d'évaluer à chaque sélection, l'ensemble des séquences possibles. Pour faciliter et limiter ces évaluations nous utilisons une structure de données particulière.

Pour alléger les définitions à venir, nous introduisons plusieurs fonctions. Ces fonctions permettent de calculer l'impact (en nombre de périodes de temps) de l'ajout ou du retrait d'une pièce saine sur les niveaux de stock et sur les résolutions (ou créations) de ruptures de stock, pour un site donné et un intervalle de périodes de temps. Cela permettra d'estimer les gains et pertes engendrés par une action unitaire :

$$\forall l \in L, t \in T, t' > t, \quad ddStr(l, t, t') = card_{t' > t'' \geq t} (b_{l, t''} > 0) // \text{gain en ruptures de stock - site destination}$$

$$\forall l \in L, t \in T, t' > t, \quad dd(l, t, t') = card_{t' > t'' \geq t} (s_{l, t''}^h = 0) // \text{perte en ruptures de stock - site origine}$$

$$\forall l \in L, t \in T, t' > t, \quad dhs(l, t, t') = card_{t' > t'' \geq t} (b_{l, t''} = 0) // \text{perte en stockage - site destination}$$

$$\forall l \in L, t \in T, t' > t, \quad dhsStr(l, t, t') = card_{t' > t'' \geq t} (s_{l, t''}^h > 0) // \text{gain en stockage - site origine}$$

Notre structure est basée sur les gains potentiels pouvant être amenés par une séquence. Nous entendons par gain potentiel l'amélioration maximale que l'application d'une unique séquence peut apporter à la solution courante.

Nous commençons par proposer une fonction permettant d'estimer le gain maximum apporté par une action composant une séquence. Cette fonction nous servira à construire une séquence. En effet, lors de la construction d'une séquence, elle permettra d'évaluer le gain apporté par chacune des actions ultérieures pouvant faire suite à cette séquence et facilitera alors la sélection. Nous la notons $gainC(X_{*,*,*,*})$ avec $X_{*,*,*,*} \in M$ ($X_{*,*,*,*}$ est une action unitaire quelconque du type approvisionnement, retour ou réparation). Le calcul de ces gains peut être fait simplement de manière récursive. En effet, deux cas sont possibles. Soit une action est une action terminale d'une séquence, soit elle est suivie par une autre action. Dans le premier cas, le

gain apporté est simplement calculable sur le site destination de l'action. Dans le second cas, le gain maximum apporté est le meilleur gain apporté par une action suivante modulo les coûts sur le site intermédiaire entre les deux actions (qui est le site destination de la première action). Le $gainC$ maximum est simplement le meilleur gain parmi les deux cas. Notons que cette fonction est dépendante du type de l'action sur laquelle on travaille et qu'elle assure la continuité des séquences et le respect de la contrainte de consommation locale :

$$\begin{aligned}
gainC(A_{l,l',t,t'}) &= \max(-\mu_{l,l'}^{m^h} * \omega^{m^{hf}} + ddStr(l', t', Tmax + 1) * \mu_{l'}^b * \omega^b - dhs(l', t', Tmax + 1) * \mu_{l'}^{s^h} * \omega^s, \\
&\quad \max(\{gainC(A_{l',*,t'',*}) - \mu_{l,l'}^{m^h} * \omega^{m^{hf}} - dhs(l', t', t'') * \mu_{l'}^{s^h} * \omega^s \\
&\quad \quad + ddStr(l', t', t'') * \mu_{l'}^b * \omega^b | t'' \geq t', b_{l',t''} = 0\})) \\
gainC(R_{l,l,t,t'}) &= \max(-\mu_l^{m^r} * \omega^{m^r} + ddStr(l, t', Tmax + 1) * \mu_l^b * \omega^b - dhs(l, t', Tmax + 1) * \mu_l^{s^h} * \omega^s, \\
&\quad \max(\{gainC(A_{l,*,t'',*}) - \mu_l^{m^r} * \omega^{m^r} - dhs(l, t', t'') * \mu_l^{s^h} * \omega^s \\
&\quad \quad + ddStr(l, t', t'') * \mu_l^b * \omega^b | t'' \geq t', b_{l,t''} = 0\})) \\
gainC(B_{l,l',t,t'}) &= \max(-\mu_{l,l'}^{m^f} * \omega^{m^{hf}} - (Tmax - t') * \mu_{l'}^{s^f} * \omega^s, \\
&\quad \max(\{gainC(B_{l',*,t'',*}) - \mu_{l,l'}^{m^f} * \omega^{m^{hf}} - (t'' - t') * \mu_{l'}^{s^f} * \omega^s | t'' \geq t'\}), \\
&\quad \max(\{gainC(R_{l',l',t'',*}) - \mu_{l,l'}^{m^f} * \omega^{m^{hf}} - (t'' - t') * \mu_{l'}^{s^f} * \omega^s | t'' \geq t'\}))
\end{aligned}$$

Pour éviter de retester toutes les actions ultérieures à la dernière action de la séquence en cours de construction nous associons dans notre structure, lors de l'évaluation du gain, à chaque action $X \in M$ une action suivante notée $next(X_{*,*,*,*})$ correspondant à la plus améliorante si une telle action existe et la valeur $NULL$ sinon.

Une fois notre structure initialisée, nous pouvons construire une séquence. Toutefois, nous devons encore choisir l'action initiant cette séquence. Nous introduisons la fonction $gainI(X_{*,*,*,*})$ avec $X_{*,*,*,*} \in M$ une action unitaire qui permet d'évaluer le gain global d'une action si celle-ci initie une séquence. En effet, ce gain diffère de la fonction $gainC$ puisque le site origine de l'action initiant la séquence est le seul site à réellement perdre une pièce. Ainsi, il est nécessaire d'inclure dans ce calcul l'impact de la perte de cette pièce sur le stockage et sur les défaillances du site origine. Comme pour la fonction $gainC$, le calcul de la fonction varie selon le type d'action :

$$\begin{aligned}
 \text{gainI}(A_{l,v',t,t'}) &= \begin{cases} -1 \text{ si } a_{l,t}^h = 0 \\ \text{gainC}(A_{l,v',t,t'}) + \text{dhsStr}(l,t,Tmax+1) * \mu_l^{s^h} * \omega^s - \text{dd}(l,t,Tmax+1) * \mu_l^b * \omega^b \text{ sinon} \end{cases} \\
 \text{gainI}(R_{l,l,t,t'}) &= \begin{cases} -1 \text{ si } a_{l,t}^f = 0 \\ \text{gainC}(R_{l,l,t,t'}) + (Tmax-t+1) * \mu_l^{s^f} * \omega^s \text{ sinon} \end{cases} \\
 \text{gainI}(B_{l,v',t,t'}) &= \begin{cases} -1 \text{ si } a_{l,t}^f = 0 \\ \text{gainC}(B_{l,v',t,t'}) + (Tmax-t+1) * \mu_l^{s^f} * \omega^s \text{ sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Nous notons que la fonction *gainI* associe une amélioration négative aux actions qui sont incohérentes avec le plan (i.e., qui ne peuvent initier aucune séquence du voisinage du plan). Ces actions ne seront par conséquent pas sélectionnées.

Prenons l'exemple de chaîne d'approvisionnement présentée en figure 4.4. Cette chaîne simple est composée de trois sites et uniquement d'actions d'approvisionnement. Les coûts utilisés sont 10 par période de temps pour une défaillance non résolue et 1 par période de temps pour le stockage pour tous les sites. Nous étiquetons sur le graphe chaque action avec un triplet(GainC,Next,GainI) correspondant à notre structure de données. Le calcul peut donc être réalisé simplement de manière anti-chronologique. Cet étiquetage permet également de construire la séquence la plus améliorante. Ici, deux séquences peuvent être sélectionnées si l'on choisit la séquence la plus améliorante selon le gain global (*gainI*) : $(A_{DC,S1,t1,t2}, A_{S1,S2,t3,t4})$ et $(A_{DC,S1,t2,t3}, A_{S1,S2,t3,t4})$.

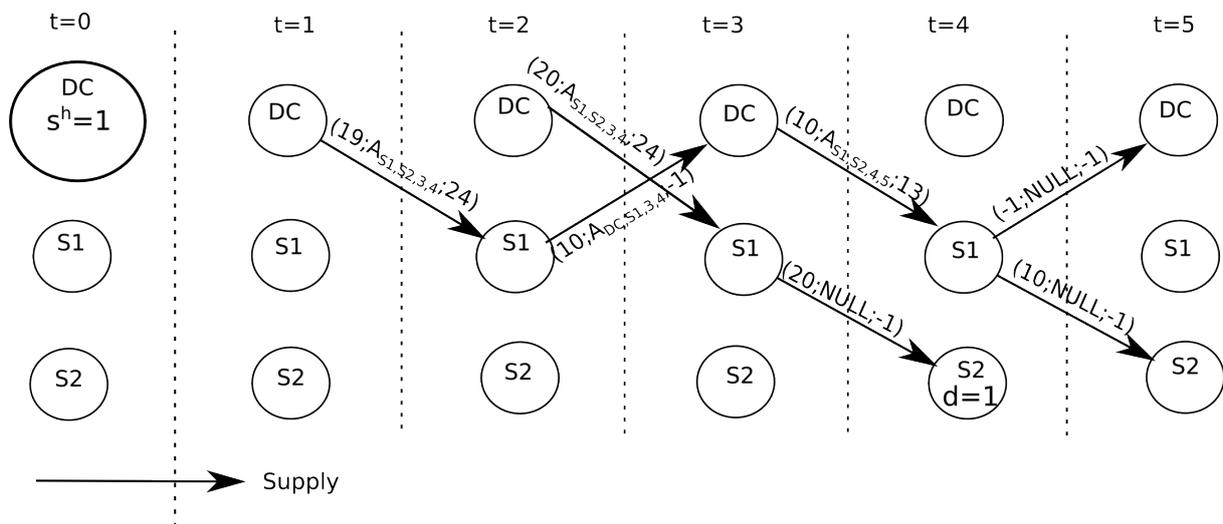


FIGURE 4.4 – Étiquetage du gain sur un graphe.

Nous précisons que les valeurs de la structure de données sont calculées intégralement durant la phase d'initialisation. Elles sont partiellement remises à jour après l'application d'une

séquence d'actions. Cette mise à jour sera détaillée dans la suite de cette section. Nous proposons l'algorithme 5 basé sur les fonctions présentées précédemment qui décrit le processus de sélection et de construction d'une séquence. Cet algorithme retourne une séquence vide s'il n'existe pas d'action avec un gain global positif ($GainI$). Notons que la ligne 3 assure la sélection par meilleur améliorant. Si le meilleur gain est produit par plusieurs actions, la sélection est aléatoire parmi ces actions. Remarquons également que la ligne 6 décrit une affectation qui modifie les valeurs des variables l, l', t, t' .

Algorithm 5 Construction de séquence

Input: Un plan P

Output: Une séquence seq

- 1: $seq \leftarrow seq_0$ ▷ Initialisation
 - 2: **if** $\max(gainI(X_{*,*,*,*})) > 0$ **then**
 - 3: Choisir une action $Y_{l,l',t,t'}$ telle que $gainI(Y_{l,l',t,t'}) \geq gainI(X_{*,*,*,*})$
 - 4: **repeat**
 - 5: Ajouter $Y_{l,l',t,t'}$ à seq
 - 6: $Y_{l,l',t,t'} \leftarrow Next(Y_{l,l',t,t'})$
 - 7: **until** $Y_{l,l',t,t'} = Null$
 - 8: Retourner seq ;
 - 9: **end if**
-

Diversification

La sélection proposée auparavant permet d'intensifier la recherche. Toutefois, il est souvent nécessaire d'introduire un processus de diversification pour permettre l'exploration de l'espace de recherche.

Prenons l'exemple présenté en figure 4.5. Pour simplifier, nous considérons ici un plan

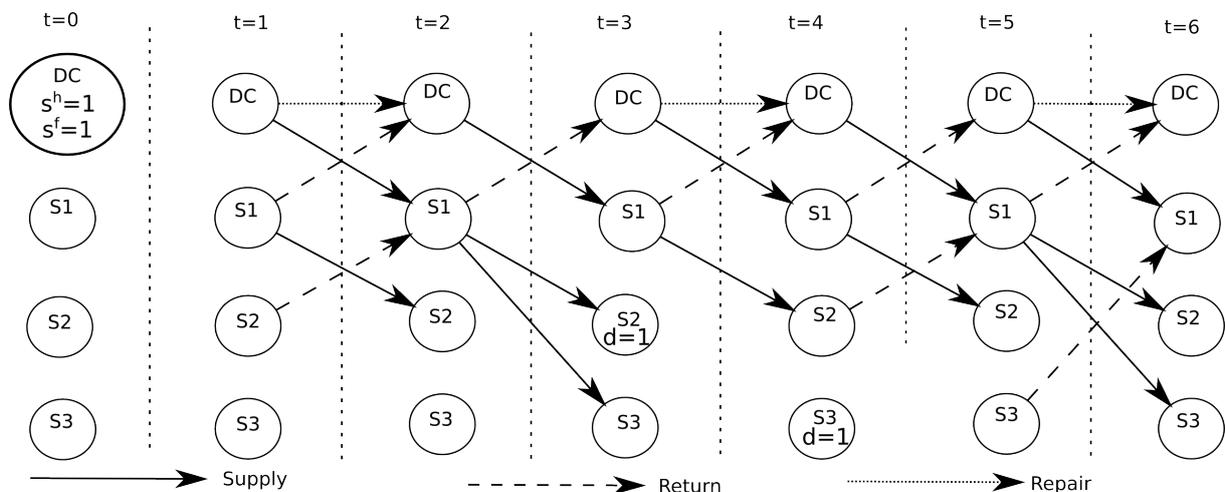


FIGURE 4.5 – Un autre exemple de chaîne d'approvisionnement à 3 niveaux.

initial vide et comme unique objectif la résolution des demandes. La séquence la plus améliorante est la séquence $(A_{DC,S1,t1,t2}, A_{S1,S2,t2,t3})$ qui permet d'éviter 4 périodes de temps de rupture de stock. Une fois cette séquence appliquée, la plus améliorante est la séquence $(R_{DC,DC,t1,t2}, A_{DC,S1,t4,t5}, A_{S1,S3,t5,t6})$ qui permet d'éviter une période de temps de rupture de stock (au total, le plan permet d'éviter 5 périodes de temps de rupture de stock). Toutefois, l'enchaînement de ces deux séquences ne résout pas la défaillance sur $S3$. Une solution alternative est d'appliquer les séquences $(A_{DC,S1,t1,t2}, A_{S1,S3,t2,t3})$ et $(R_{DC,DC,t1,t2}, A_{DC,S1,t2,t3}, A_{S1,S2,t3,t4})$ qui permettent d'éviter au total 6 périodes de temps (3 chacune) de rupture de stock. Ce cas montre l'intérêt d'un processus de diversification.

Nous introduisons une probabilité α dans notre algorithme de sélection et de construction de séquence. Cette probabilité va nous permettre d'introduire une variation dans notre mécanisme de sélection. En effet, à chaque choix de sélection d'une action, que ce soit l'action initiale de la séquence ou une action composant la séquence, nous permettons soit de sélectionner une autre action améliorante (pas forcément la meilleure), soit de mettre fin à la séquence en cours avec une probabilité α . Si ce choix intervient au niveau d'une action composant une séquence, le choix alternatif est fait parmi les autres actions pouvant faire suite à la séquence. Cette probabilité α évolue au cours des restarts de l'algorithme et suit la suite algébri-co-géométrique suivante avec n le nombre de restarts, P_0 la probabilité initiale et v un paramètre :

$$\alpha = 1 - ((1 - v)^n \times (1 - P_0))$$

Nous présentons en section 4.6.2 la configuration choisie pour les paramètres de la suite et justifions notre approche. L'angle proposé ici s'inscrit dans l'esprit du Variable Neighbourhood Search (VNS) [Hansen et al., 2010] avec un voisinage qui va augmenter à chaque lancement de l'algorithme. Cette approche peut aussi faire penser au recuit simulé [Kirkpatrick et al., 1983] qui, contrairement à nous, évolue d'un voisinage large pour aboutir à un voisinage de plus petite taille.

L'algorithme 6 décrit le processus de sélection et de construction avec intégration de la diversification.

Mise à jour de la structure de données

L'ajout d'une séquence au plan (i.e., l'application d'une séquence d'actions) impacte les gains pouvant être apportés par les différentes actions. Dans ce contexte, il est nécessaire de mettre à jour la structure de données. La méthode la plus simple est de recalculer l'ensemble des gains de toutes les actions comme fait lors de l'initialisation. Toutefois, ce recalcul peut être coûteux. De plus, nous observons que l'application d'une séquence n'impacte pas l'ensemble des sites et des périodes de temps et que, par conséquent, la mise à jour de la structure de données peut être partielle et ainsi limiter les opérations de mise à jour. Nous proposons l'algorithme 7 qui décrit

Algorithm 6 Construction de séquence avec diversification**Input:** Un plan P , une probabilité α **Output:** Une séquence seq

```

1:  $seq \leftarrow seq_{\emptyset}$  ▷ Initialisation
2: if  $max(gainI(X_{*,*,*})) > 0$  then
3:    $p \leftarrow Aleatoire(0, 1)$  ▷ une valeur aléatoire entre 0 et 1
4:   if  $p \geq \alpha$  then
5:     Choisir une action  $Y_{l,v,t,t'}$  telle que  $gainI(Y_{l,v,t,t'}) \geq gainI(X_{*,*,*})$ 
6:   else
7:     Choisir une action  $Y_{l,v,t,t'}$  telle que  $gainI(Y_{l,v,t,t'}) > 0$ 
8:   end if
9:   repeat
10:    Ajouter  $Y_{l,v,t,t'}$  à  $seq$ 
11:     $p \leftarrow Aleatoire(0, 1)$ 
12:    if  $p \geq \alpha$  then
13:       $Y'_{l,v,t,t'} \leftarrow Next(Y_{l,v,t,t'})$ 
14:    else
15:      Choisir une action  $Y'_{l,v,t,t'}$  avec  $gainC(Y'_{l,v,t,t'}) > 0$  et  $Y'_{l,v,t,t'}$  pouvant succéder
      à  $Y_{l,v,t,t'}$  ou mettre fin à la séquence avec  $Y'_{l,v,t,t'} \leftarrow NULL$ 
16:    end if
17:     $Y_{l,v,t,t'} \leftarrow Y'_{l,v,t,t'}$ 
18:  until  $Y_{l,v,t,t'} = Null$ 
19:  Retourner  $seq$ ;
20: end if

```

la mise à jour du $gainC$ des actions unitaires après l'application d'une séquence seq à un plan. Le $gainC$ d'une action peut être modifié pour deux raisons. La première est due aux variations de stocks sur le site sur lequel l'action aboutit (demandes résolues, demandes créées, ...). On mettra donc à jour le $gainC$ des actions qui aboutissent sur l'un des sites de la séquence. La seconde est la modification du $gainC$ d'une action succédant possiblement à l'action évaluée. Nous mettrons également à jour les $gainC$ des actions qui aboutissent sur un site qui initie une action dont le $gainC$ a été mis à jour. En effet, le $gainC$ étant calculé récursivement la modification d'une valeur peut se propager à d'autres actions qui n'étaient pas impactées directement par la séquence. Notons que le parcours antichronologique dans l'algorithme limite la propagation et les recalculs. L'algorithme est présenté dans une version simplifiée. En réalité, il est possible de limiter encore plus les calculs en jouant avec les types d'actions. En effet, l'application d'une séquence composée uniquement d'actions de retour par exemple, ne pourra jamais impacter le gain apporté par une action d'approvisionnement. Notons également que, en pratique, si une action $X_{l,v,t,t'}$ voit la valeur de son $gainC$ modifiée alors la valeur de l'étiquetage de l'action suivante $Next(X_{l,v,t,t'})$ est également mise à jour. D'autre part, il est possible de limiter également les recalculs sur les actions aboutissant sur les sites intermédiaires de la séquence. En effet, le $gainC$ d'une action ultérieure à la modification entraînée par la séquence

sur un site intermédiaire ne sera pas modifié.

Algorithm 7 Mise à jour du *gainC* dans la structure de données

Input: Un plan P , une séquence seq de taille n

```

1:  $ToUp \leftarrow \emptyset$  ▷ Un ensemble vide pour stocker des sites
2: forall  $X_{l,l',t,t'} \in seq$ 
3:    $ToUp \leftarrow ToUp \cup \{l\} \cup \{l'\}$ 
4: end forall
5:  $m \leftarrow M$  ▷  $M$  est l'ensemble des actions unitaires cohérentes avec le graphe espace-temps
6: while  $m \neq \emptyset$  do
7:    $Y_{l,l',t,t'} \leftarrow \operatorname{argmax}_{X_{l'',l''',t'',t'''} \in m}$  ▷ antichronologique
8:   if  $l' \in ToUp$  then
9:     if  $GainC(Y_{l,l',t,t'})$  différent de son ancienne valeur then
10:      Mettre à jour  $GainC(Y_{l,l',t,t'})$ 
11:       $ToUp \leftarrow ToUp \cup \{l\}$ 
12:    end if
13:   end if
14:   Supprimer  $Y_{l,l',t,t'}$  de  $m$ 
15: end while

```

Une fois les valeurs de *gainC* mises à jour, il est nécessaire de mettre à jour les valeur du *gainI*. Cette mise à jour est moins complexe et basée sur la mise à jour du *gainC*. En effet, le *gainI* est mis à jour pour toutes les actions initiées sur un site inclus dans la dernière séquence appliquée (site qui a connu des variations de niveau de stock). Le *gainI* est également mis à jour pour toutes les actions dont le *gainC* s'est vu mis à jour. Cette mise à jour assure la consistance des valeurs des gains des actions avec l'état de la chaîne d'approvisionnement après application d'une séquence et permet de limiter les calculs. Toutefois, notons que si la topologie et les calendriers d'acheminement sont particulièrement denses, notre méthode de mise à jour peut revenir à faire une mise à jour globale de la structure de données, une séquence pouvant impacter l'ensemble des actions.

Complexité

Avec la structure de données utilisée, la sélection d'une séquence revient à choisir l'action unitaire qui initie la séquence. Ainsi la taille du voisinage (sans diversification) est au pire linéaire en le nombre d'arcs présents dans le graphe espace-temps. De la même manière, la mise à jour du gain est réalisée par un parcours anti-chronologique sur les arcs et est également linéaire en fonction du nombre d'arcs du graphe espace-temps.

4.6 Expérimentations

Nous présentons dans cette section les instances utilisées dans ce manuscrit. Nous détaillons ensuite une étude du paramètre de diversification de la métaheuristique et concluons cette section en comparant la métaheuristique avec le MIP et en donnant des intuitions sur l'impact des différents poids de la fonction coût.

4.6.1 Instances utilisées

Nous présentons ici les instances utilisées pour réaliser les expérimentations de ce manuscrit. Nous décrivons principalement la structure des instances et quelques-unes des entrées qui restent les mêmes indépendamment des expérimentations. D'autres paramètres varient d'une expérimentation à une autre. Ils seront détaillés dans les sections concernées (e.g., nombre de sites). Les instances du problème sont notamment définies par leur topologie. Nous proposons de travailler sur trois cas d'étude :

- *Tree* : topologie inspirée du cas réel de BT présenté au chapitre 2. La topologie est arborescente et composée d'un centre de distribution qui approvisionne des hubs qui à leur tour approvisionnent des magasins. Cette topologie est très fortement contrainte et ne permet pas de déplacer les pièces saines stockées dans les magasins.
- *Clique* : les magasins situés sous un même hub sont tous interconnectés par des routes d'approvisionnement. De plus, on ajoute également des routes d'approvisionnement des magasins vers le centre de distribution via les hubs. Cette topologie est plus flexible que la topologie *Tree*.
- *Complete* : tous les sites de la chaîne d'approvisionnement sont interconnectés par des routes d'approvisionnement et de retour. C'est la chaîne d'approvisionnement la plus flexible possible.

La figure 4.6 représente les trois topologies que nous proposons.

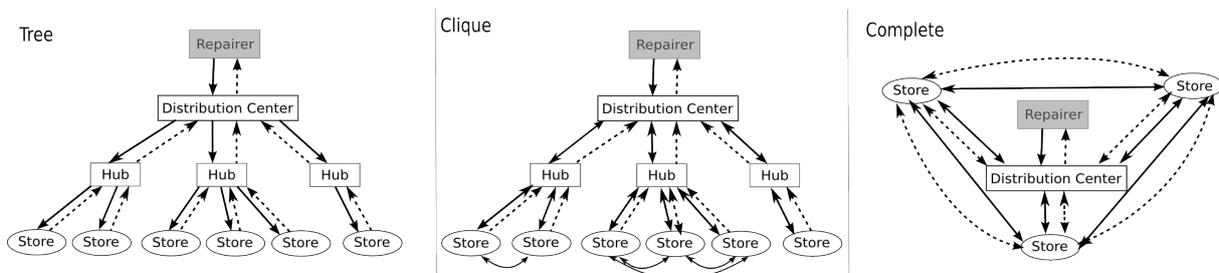


FIGURE 4.6 – Les topologies des instances utilisées.

Pour toutes les instances, le temps de transfert d'une pièce entre deux sites est fixé à une période de temps, le temps de réparation est fixé à trois périodes de temps et les pièces peuvent être envoyées en réparation à chaque période de temps mais uniquement depuis le centre de distribution. Les fréquences de transfert inter-niveau (centre de distribution-hubs et hubs-magasins) pour les topologies *Tree* et *Clique* sont, comme dans le cas réel de BT, de cinq périodes de temps. Les fréquences de transfert intra-niveau (magasin-magasin) sont fixées à une période de temps. La topologie *Complete* est la chaîne d'approvisionnement la plus flexible possible, les fréquences de transfert sont toutes fixées à une période de temps.

Selon les expériences réalisées, nous ferons varier la quantité de défaillances prévues sur l'horizon de temps. Les niveaux de stock initiaux et leur distribution varieront également mais seront corrélés à la quantité totale de demande. Les schémas de niveaux de stock sont les suivants :

- High : la quantité de pièces saines en stock est égale à la quantité de demandes prévues sur l'horizon de temps.
- Med : la quantité de pièces saines en stock est égale à la moitié de la quantité de demandes prévues sur l'horizon de temps.
- Low : il n'y a pas de pièce saine stockée.

Nous remarquons que ces schémas n'incluent pas de pièces défaillantes à l'état initial. Nous faisons ce choix afin de pouvoir étudier le fonctionnement de nos méthodes sans biais. Les schémas de distribution sont les suivants :

- DC : toutes les pièces sont stockées au centre de distribution.
- Stores : toutes les pièces sont réparties aléatoirement dans les magasins.
- Mix : Une moitié des pièces est stockée au centre de distribution et l'autre moitié des pièces est répartie aléatoirement dans les magasins.

Ces deux schémas déterminent sept types (classes) d'instances possibles. En effet, lorsque le niveau de stock est Low, il n'y a pas de pièces disponibles dans la chaîne d'approvisionnement donc le schéma de distribution n'a aucun impact. Ce schéma provoque des ruptures de stock qui ne pourront être satisfaites que lorsque les pièces défaillantes correspondantes seront réparées.

Nous notons enfin que toutes les expérimentations proposées dans ce manuscrit sont menées sur une machine dotée d'un processeur *i5-3380M@2.90GHz avec 8GB de RAM*.

Le MIP utilise le solveur *CPLEX 12.6*. *CPLEX* est un solveur de référence pour la programmation mathématique produit par *IBM ILOG* intégrant des algorithmes de résolution très efficaces.

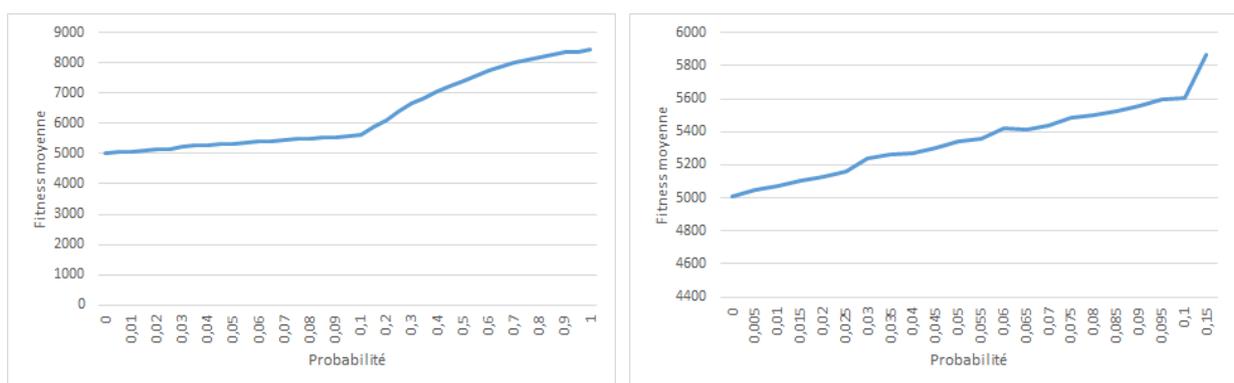
4.6.2 Diversification

Un paramètre essentiel de notre métaheuristique est la probabilité de diversification. En effet, notre métaheuristique ne permettant pas de revenir sur des actions effectuées, le choix de chacune des actions est primordial. Intuitivement, si la valeur du paramètre de diversification est trop faible, celle-ci ne sera pas suffisante pour éviter les optima locaux. À l’opposé, une diversification trop importante entraînera sans doute la métaheuristique vers des actions inutiles qui ne permettront pas d’atteindre des solutions de bonne qualité. Dans cette section, nous étudions l’impact de la probabilité et expliquons à travers cette étude pourquoi nous choisissons de la faire varier selon une suite arithmético-géométrique.

Nous conduisons une série d’expérimentations sur différentes instances basées sur les schémas présentés en section 4.6.1 avec différents niveaux de demande. Pour chacune de ces instances, nous faisons varier la probabilité de diversification de 0 à 1 avec un pas de 0.005 entre 0 et 0.1 puis un pas de 0.05 entre 0.1 et 1 et effectuons 30 exécutions de notre solveur sans restarts pour cette probabilité fixe.

Nous présentons quelques graphes qui représentent l’évolution de la valeur de fitness globale d’un plan en fonction de la probabilité de diversification. Les résultats obtenus sont similaires sur toutes les instances testées.

Deux principaux comportements se dégagent de ces expérimentations. Le premier apparaît sur des instances simples avec, par exemple, beaucoup de pièces en stock, une topologie *Tree* et des coûts de stockage, de rupture de stock, de réparation et de transport équivalents. Cette configuration rend particulièrement aisée la création du plan optimal via la résolution de l’ensemble des demandes. Le graphe 4.7(a) présente l’évolution de la valeur de fitness pour une probabilité variant de 0 à 1. Le graphe 4.7(b) fait un zoom sur l’évolution entre 0 et 0.15.



(a) Évolution globale.

(b) Zoom.

FIGURE 4.7 – Évolution de la fitness sur une instance simple.

Comme nous pouvons le constater, les meilleurs résultats sont obtenus avec le paramètre de diversification le plus faible. En effet, sur des instances simples, la diversification ne fait que

dégrader la qualité des solutions obtenues et n'est pas intéressante.

Sur des instances plus complexes, avec une topologie comme *Clique* ou *Complete* avec des coûts disparates selon les objectifs et un volume initial de pièces saines limité, les résultats obtenus sont différents. Un exemple de résultat est représenté sur la figure 4.8.

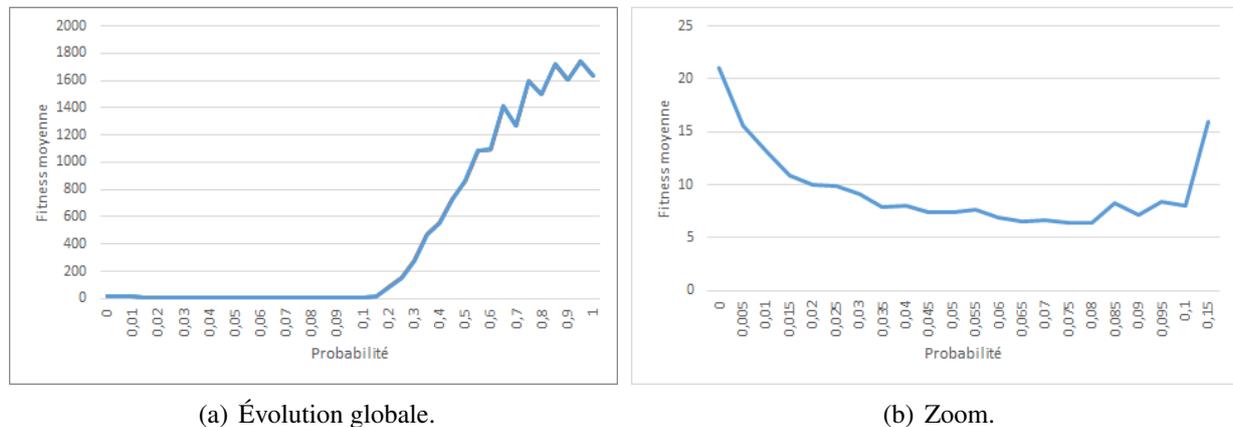


FIGURE 4.8 – Évolution de la fitness sur une instance plus complexe.

Ici, la diversification apporte un gain de fitness. En effet, les moyennes de fitness les plus intéressantes sont obtenues entre 0,04 et 0,1. Ce phénomène est similaire sur les autres instances plus complexes que nous avons testées.

Ainsi, selon la complexité de l'instance traitée, il est nécessaire d'apporter plus ou moins de diversification. Dans l'objectif de balayer un espace plus vaste de solutions intéressantes, nous avons choisi d'augmenter la probabilité de diversification appliquée à notre métaheuristique à chaque restart. Cette probabilité est définie selon la suite présentée en section 4.5.3. Il faut ensuite configurer cette suite pour que la probabilité varie entre deux bornes adaptées. Empiriquement, il semble adéquat de définir la borne inférieure à 0 et la borne supérieure à 0, 1. Ainsi, nous fixons la probabilité initiale P_0 à 0. Il est ensuite aisé de déterminer v pour borner la probabilité avec un nombre n de restarts connu. Par exemple, avec n fixé à 100 alors il suffit de fixer la valeur de v à 0,001 pour assurer une probabilité variant entre 0 et 0, 1.

4.6.3 Évaluation des méthodes sur le cas réel

Nous présentons ici une comparaison des méthodes et proposons d'étudier l'impact de la distribution et des niveaux de stock sur des instances inspirées du cas réel. Nous donnerons ensuite quelques résultats sur l'impact de la pondération de la fonction coût. Les instances étudiées adoptent donc la topologie *Tree* et sont composées de 1 DC, 9 hubs et 15 magasins pour les instances *Small* et de 1 DC, 33 hubs et 66 magasins pour les instances *Large*. Ces instances sont de petite taille comparées à la taille réelle de la chaîne d'approvisionnement mais permettent d'étudier le comportement de nos méthodes. L'horizon de temps est fixé à 60 périodes de temps

et les défaillances apparaissent toutes les 5 périodes de temps dans les magasins. Nous introduisons également dans ces expériences une période de transition de 7 périodes de temps qui coïncide avec la durée maximale nécessaire pour envoyer une pièce du DC vers un magasin. Nous ne générons pas de défaillances durant cette période car celles-ci devraient être résolues grâce aux plans générés précédemment et introduiraient un biais dans l'évaluation de la qualité de nos méthodes.

Comme dans le cas réel, nous décidons d'ignorer le coût de transfert et fixons une hiérarchie entre les autres coûts pour respecter la réalité. Ainsi une rupture de stock coûte 1000 par période de temps, une réparation coûte 100, le stockage d'une pièce dans un hub ou dans un magasin coûte 10 et le stockage d'une pièce au DC coûte 1.

Les poids utilisés dans ces expérimentations sont représentés par un triplet $\langle \omega^b, \omega^{m^r}, \omega^s \rangle$. Nous avons arbitrairement décidé d'allouer un temps de résolution maximum d'une heure pour le MIP. Cette décision se justifie par le fait que l'outil doit pouvoir être utilisé fréquemment par les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement et que ceux-ci ne peuvent se permettre d'attendre plusieurs heures pour obtenir un résultat. Dans le cas où le MIP ne termine pas dans le temps imparti, nous retournons la meilleure borne trouvée.

4.6.3.1 Résultats

Le tableau 4.1 présente les résultats obtenus avec le MIP et la métaheuristique BIS. Les deux premières colonnes décrivent les schémas de l'instance utilisée (High, Med, Low et DC, Mix, Stores). La troisième colonne décrit la pondération utilisée. Les expérimentations ont été faites sur toutes les combinaisons d'activation et de désactivation des poids possibles. Les colonnes restantes décrivent les résultats obtenus par les deux méthodes évaluées sur les deux tailles d'instances (*small* et *large*) : *MIP - Fitness* est la meilleure borne retournée par le MIP, *MIP - Time* est le temps d'exécution du MIP en millisecondes, *BIS - Fitness* est la moyenne des résultats retournés par la métaheuristique BIS sur 100 restarts, *BIS - s.d* l'écart type de la méthode BIS et *BIS - Time* le temps moyen d'exécution de la métaheuristique en millisecondes. Notons que si la colonne *MIP - Time* contient un '-' cela signifie que le MIP a atteint la limite de temps sans retourner une valeur. Une valeur en gras dans la colonne *BIS - Fitness* signifie que la valeur moyenne retournée par la méthode BIS est inférieure à celle retournée par le MIP.

Nous comparons maintenant les résultats obtenus par nos deux méthodes. Premièrement, nous notons que, dans toutes les expériences réalisées, la méthode BIS atteint au moins une fois la meilleure borne retournée par le MIP. Ces résultats valident le bon fonctionnement de la métaheuristique sur des instances définies sur une topologie *Tree*. L'écart type reste faible et démontre la robustesse de notre approche. Dans la majorité des cas, la métaheuristique est au moins 100 fois plus rapide que le MIP. Nous remarquons également que plus la taille des instances est importante, plus le MIP rencontre des difficultés. En effet, il atteint la limite

TABLE 4.1 – Comparaison entre le MIP et la métaheuristique BIS

	Weights	Small					Large				
		MIP		BIS (Meta)			MIP		BIS (Meta)		
		Fitness	Time	Fitness	s.d.	Time	Fitness	Time	Fitness	s.d.	Time
DC	<1,0,0>	0	4554	0	0	17	0	57000	0	0	220
	<0,1,0>	0	3205	0	0	3	-	-	0	0	42
	<0,0,1>	22725	4175	22726	6	8	99990	20500	99998	14	121
	<0,1,1>	23085	4555	23086	2	6	101574	23100	101581	13	80
	<1,1,0>	0	3562	2	14	15	0	32480	29	57	221
	<1,0,1>	25500	4554	25658	199	20	112200	-	113073	702	280
	<1,1,1>	25860	5870	25964	163	18	113784	-	114258	382	256
High Mix	<1,0,0>	0	2125	0	0	11	0	26220	0	0	147
	<0,1,0>	0	2085	0	0	3	0	10780	0	0	40
	<0,0,1>	31253	1182	31253	0	5	133862	2980	133869	50	70
	<0,1,1>	31613	1008	31613	1	3	135446	2840	135446	0	41
	<1,1,0>	100	3134	113	33	10	0	29500	12	35	143
	<1,0,1>	33423	2696	33573	193	14	143562	-	144348	587	191
	<1,1,1>	33880	4134	33959	169	12	145146	-	145508	389	164
Sites	<1,0,0>	0	1072	0	0	5	27000	2730	27000	0	69
	<0,1,0>	0	820	0	0	3	0	2070	0	0	40
	<0,0,1>	58005	943	58005	0	6	256128	2030	256128	0	62
	<0,1,1>	58365	791	58365	0	3	257712	2030	257712	0	40
	<1,1,0>	1700	1329	1708	27	4	35600	3430	35625	48	71
	<1,0,1>	58565	1332	58585	59	6	285983	3510	286053	108	95
	<1,1,1>	60574	1423	60590	59	5	295909	3930	295995	137	78
DC	<1,0,0>	0	5105	0	0	15	0	38000	0	0	221
	<0,1,0>	0	15161	0	0	3	-	-	0	0	40
	<0,0,1>	18326	7597	18327	2	8	80751	35410	80757	11	110
	<0,1,1>	18686	6863	18687	2	6	82335	31500	82343	18	82
	<1,1,0>	8300	-	8306	24	19	36300	-	36336	67	221
	<1,0,1>	21101	6321	21275	212	20	92961	-	93839	691	285
	<1,1,1>	29512	-	29650	192	19	129756	-	130237	379	252
Med Mix	<1,0,0>	0	3120	0	0	13	0	25680	0	0	185
	<0,1,0>	0	9871	0	0	3	0	120500	0	0	40
	<0,0,1>	19407	1620	19408	6	6	88669	18250	88675	29	85
	<0,1,1>	19767	1569	19767	1	4	90253	14240	90272	55	54
	<1,1,0>	8300	-	8303	17	13	36300	-	36315	38	188
	<1,0,1>	22112	4543	22323	278	17	100339	-	101192	608	237
	<1,1,1>	30523	-	30623	130	15	-	-	137643	451	215
Sites	<1,0,0>	31000	2542	31000	0	10	93000	11730	93000	0	148
	<0,1,0>	0	1536	0	0	3	0	4480	0	0	39
	<0,0,1>	25895	1261	25895	0	4	114648	6051	114648	0	63
	<0,1,1>	26255	1514	26255	0	3	116232	3900	116232	0	43
	<1,1,0>	39300	-	39303	17	12	129300	-	129310	36	148
	<1,0,1>	59100	3458	59141	78	13	217263	19240	217482	228	171
	<1,1,1>	67511	-	67564	81	12	254058	-	254342	281	163
Low	<1,0,0>	2625000	-	2625090	319	6	11550000	-	11550700	1923	94
	<0,1,0>	0	744	0	0	3	0	2000	0	0	40
	<0,0,1>	15045	1291	15045	0	4	66198	8410	66198	0	65
	<0,1,1>	15405	1408	15405	0	3	67782	8140	67782	0	40
	<1,1,0>	2635500	-	2635540	196	6	11603200	-	11596400	409	96
	<1,0,1>	2641620	-	2641710	289	7	11623128	-	11623500	1063	104
	<1,1,1>	2652165	-	2652160	2	7	11669526	-	11669900	1285	102

de temps dans 10 cas sur les instances *Small* et dans 18 cas sur les instances *Large*. Sur ces mêmes instances, le MIP échoue également dans 3 cas à retourner une borne et retourne dans un cas une borne supérieure à la moyenne retournée par la métaheuristique BIS. Ces résultats confirment la difficulté du MIP à passer à l'échelle lorsque la taille du réseau croît. Au

contraire, la métaheuristique continue de fournir des bons résultats dans un temps raisonnable.

À travers ces expérimentations, nous nous intéressons également à l'impact des schémas de distribution et des niveaux de stock initiaux. Pour chaque instance, nous étudions les plans générés au travers de métriques représentant l'évolution de différents indicateurs au cours du temps. Ces indicateurs représentent la quantité de défaillances non résolues (Backorders) (incluant les ruptures résiduelles), le volume de pièces saines et défectueuses stockées dans le centre de distribution et dans les autres sites (DC healthy stocks, DC faulty stocks, Site healthy stocks, Site faulty stocks) et la quantité de réparations effectuées (Repair) au cours du temps. Comme on pouvait s'y attendre, le volume de pièces High domine le schéma Med qui domine le schéma Low quand le poids sur la résolution des défaillances est activé. En effet, une quantité importante de pièces permet toujours de résoudre plus facilement l'ensemble des demandes. Les graphes (a), (b) et (c) de la figure 4.9 décrivent l'évolution des différentes métriques avec des distributions et pondérations similaires mais avec des niveaux de stock initiaux différents.

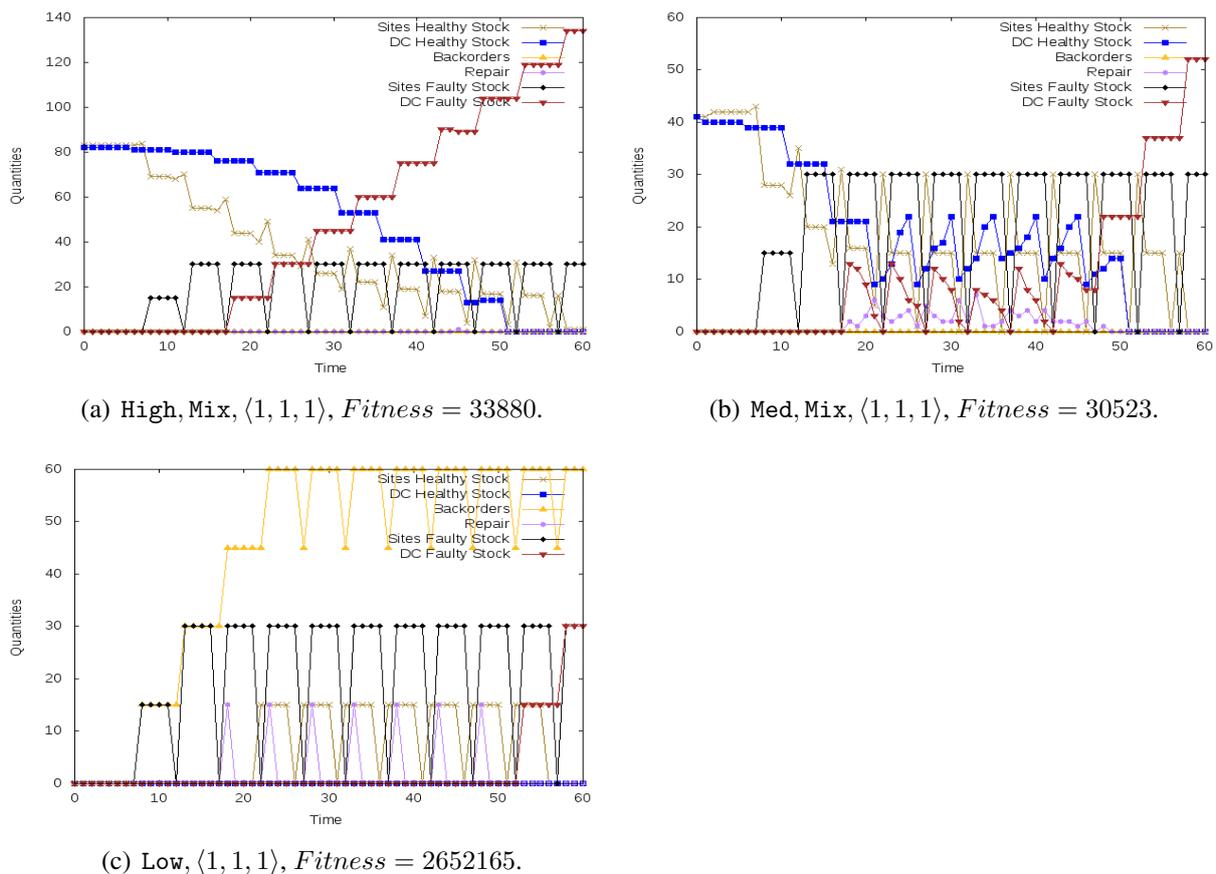


FIGURE 4.9 – Évolution des métriques.

La distribution joue également un rôle important. En effet, les résultats montrent que la

distribution DC domine la distribution Mix qui domine la distribution Stores. Ce résultat est particulièrement vrai avec la topologie étudiée qui ne permet pas le renvoi de pièces saines vers le centre de distribution. Ainsi, si une pièce est mal positionnée, elle ne permet pas de résoudre des défaillances se produisant sur d'autres sites. Nous verrons dans les chapitres suivants que les topologies *Clique* et *Complete* apportent une flexibilité permettant de surmonter ce problème.

Notons également que les résultats retournés par les instances utilisant les volumes de pièces High et Med sont proches. En effet, si dans certains cas le positionnement des pièces ne permet pas de résoudre toutes les demandes avec le schéma Med, un positionnement adéquat permet de résoudre l'ensemble des défaillances. Cela souligne l'importance du positionnement et le fait que si celui-ci est de bonne qualité alors la quantité de pièces circulant dans la chaîne d'approvisionnement peut être réduite.

4.6.3.2 Pondération

Les résultats fournis dans le tableau et l'étude des différentes métriques permet également de s'intéresser à l'impact de la pondération sur le plan résultant. L'utilisation classique du système pour minimiser le coût réel de la chaîne d'approvisionnement est réalisée avec un poids équivalent pour tous les objectifs. Toutefois, nous cherchons à montrer que l'activation ou la désactivation de certains poids peuvent mener à une gestion différente des stocks et des transferts de pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Ces activations et désactivations de poids vont entraîner des comportements spécifiques des pièces dans la chaîne d'approvisionnement qui peuvent être intéressants pour les gestionnaires.

Prenons l'exemple des graphes (a), (b), (c) et (d) de la figure 4.10 qui représentent l'évolution des métriques sur une même instance avec des pondérations différentes.

La pondération $\langle 1, 0, 0 \rangle$ a pour unique objectif de résoudre les défaillances. Cette pondération est détaillée sur le graphe 4.10(a). L'objectif de résolution des défaillances est parfaitement satisfait. Il est difficile de tirer des conclusions de cette pondération. En effet, les réparations et le stockage n'étant pas pénalisés, des réparations peuvent être effectuées même si elles ne sont pas nécessaires. De la même manière, certaines pièces défaillantes sont retournées au centre de distribution tandis que d'autres restent stockées dans les magasins.

La pondération $\langle 1, 0, 1 \rangle$ active le poids de stockage, et modifie l'objectif qui est maintenant de minimiser les ruptures de stock et le stockage. Cette pondération est représentée sur le graphe 4.10(b). Cette pondération permet de résoudre l'ensemble des défaillances. Les coûts utilisés (le stockage au centre de distribution est moins cher que sur les autres sites) entraînent des comportements qui peuvent être intéressants pour les gestionnaires. En effet, l'ensemble des pièces défaillantes sont retournées au centre de distribution puis réparées (une réparation permet d'éviter du stockage). Par la suite, seules les pièces saines nécessaires à la résolution de défaillances sont envoyées vers les magasins. Notons également que sont utilisées en priorité

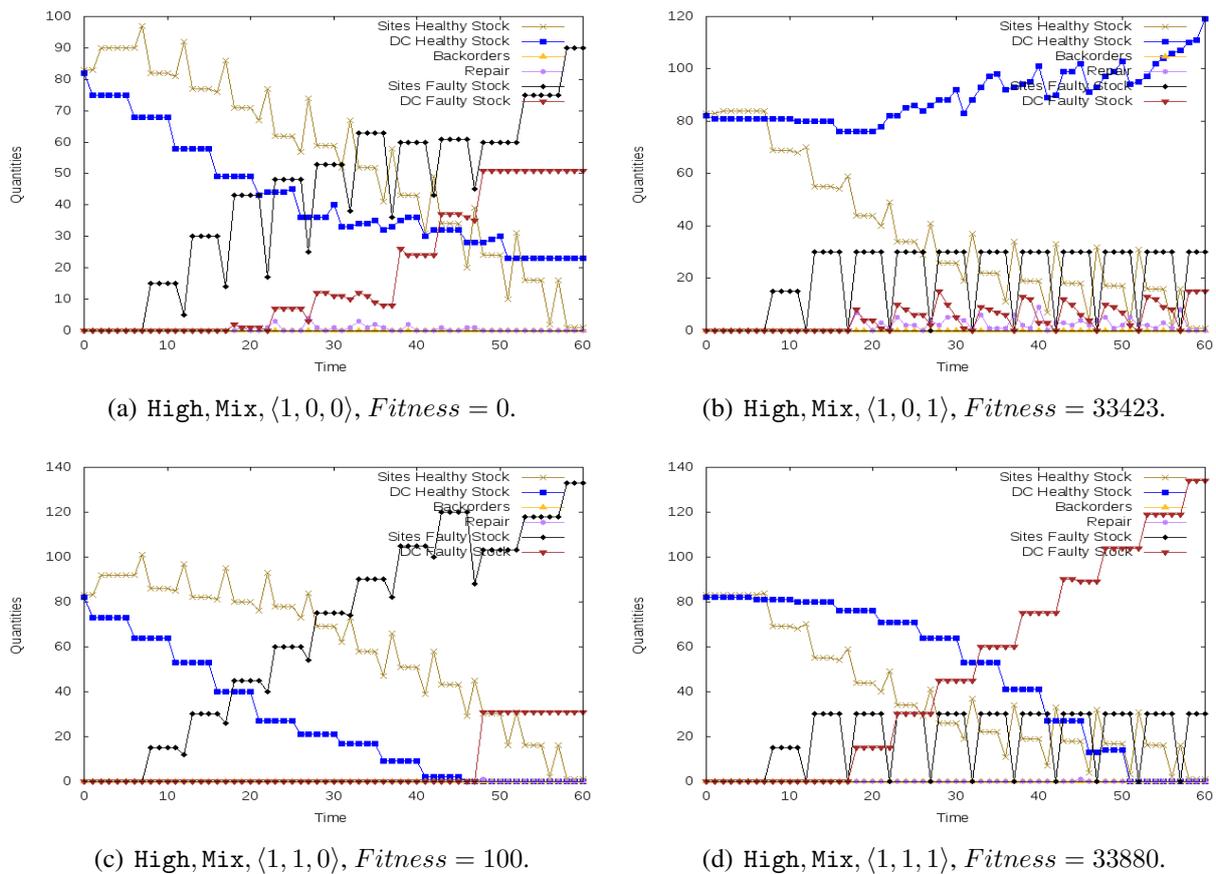


FIGURE 4.10 – Impact de la pondération.

les pièces saines préalablement stockées dans les magasins.

La pondération $\langle 1, 1, 0 \rangle$ active les poids associés aux ruptures de stock et aux réparations. Elle est représentée par le graphe 4.10(c). Cette pondération permet de résoudre les défaillances en minimisant les réparations. Ainsi comme on peut s'en apercevoir, une seule réparation est effectuée, réparation obligatoire pour éviter une rupture de stock. D'autre part, notons également que très peu de pièces défaillantes sont retournées vers le centre de distribution. Ceci est dû à notre méthode BIS. En effet, les séquences qui sont basées sur le retour d'une pièce défaillante doivent inclure une action de réparation pour résoudre une défaillance et être améliorante. De fait, elles sont moins améliorantes que les actions consistant à approvisionner les magasins directement avec des pièces saines. Quand l'objectif de stockage n'est pas pris en compte, le retour de pièces défaillantes n'est envisageable que lorsque le stock de pièces saines au centre de distribution est vide.

La dernière pondération $\langle 1, 1, 1 \rangle$ active les trois poids et minimise ainsi les ruptures de stock, les réparations et le stockage. Toutes les défaillances sont résolues. Pour éviter le stockage, les pièces saines stockées sur les magasins sont utilisées en priorité avant d'approvisionner des pièces depuis le centre de distribution. Toujours dans ce même objectif, l'ensemble

des pièces défectueuses sont retournées vers le centre de distribution mais ne seront réparées que si nécessaire à la résolution d'une défaillance.

Ces comportements de la chaîne d'approvisionnement sont intéressants mais restent limités par le mécanisme d'activation et de désactivation des poids. Nous proposerons dans le chapitre 5 une stratégie de hiérarchisation possible des différents poids et analyserons les impacts de cette hiérarchie sur les différents objectifs et sur le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie centrale de notre système d'aide à la décision. Nous avons succinctement détaillé notre première proposition et expliqué ses faiblesses. Nous avons ensuite explicité la métaheuristique BIS qui constitue la méthode de résolution intégrée à l'outil. Nous avons détaillé le voisinage utilisé ainsi que le système de sélection et de diversification auquel il est couplé. Nous avons également mis en exergue notre structure d'évaluation du gain d'une séquence et précisé le système de mise à jour de ce gain.

Nous avons proposé des expériences pour valider le processus de diversification utilisé dans la méthode BIS et avons comparé cette méthode avec la modélisation mathématique formalisée dans le chapitre 3. Ces résultats valident l'efficacité en terme de qualité et de temps d'exécution de la métaheuristique sur des instances fortement inspirées du cas réel de BT. Enfin, nous avons brièvement présenté l'impact de la pondération sur les résultats et sur le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement.

Nous avons pris le parti d'étudier le comportement du système dans la suite de ce manuscrit pour fournir un système complet. En effet, si la méthode présentée est performante et représente la base de notre système, il serait toutefois intéressant d'étudier les résultats obtenus par d'autres approches telles que les algorithmes mémétiques.



5

Pondération et politiques de gestion

5.1 Introduction

Les gestionnaires de chaîne d’approvisionnement font souvent face à des cas nécessitant une politique de pilotage particulière des flux. Dans notre modèle, ces politiques spécifiques peuvent être obtenues par pondération des objectifs de la fonction coût. Toutefois, la corrélation entre les différents objectifs conjuguée aux différents coûts unitaires rend la pondération complexe et le système difficile à contrôler pour les utilisateurs.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de calcul automatique des poids qui permet de hiérarchiser les objectifs. Nous associons empiriquement à cette hiérarchisation des politiques de coûts (basées sur des indicateurs quantitatifs) et des politiques opérationnelles (qualitatives). Le but est ici de permettre à l’utilisateur d’imposer l’application de ces politiques par une configuration automatique du système. Ainsi, la phase de paramétrage devient transparente pour l’utilisateur et permet une utilisation plus complète du système.

5.2 Politiques de gestion

Une politique de gestion peut être définie au sens managérial du terme comme un ensemble de principes et de lignes directrices choisies pour faire fonctionner une entreprise.

Dans l’approche que nous présentons, nous distinguons deux types de politiques : les politiques de coûts et les politiques opérationnelles.

5.2.1 Les politiques de coûts

Les politiques de coûts sont basées sur un point de vue purement quantitatif. L'utilisateur ne s'intéresse pas réellement au plan produit mais uniquement aux mesures de performances correspondantes aux différents objectifs de la fonction coût. Ces politiques de coûts peuvent être appliquées suite à des décisions économiques ou stratégiques et avoir du sens pour les experts. Par exemple, suite à un conflit avec le réparateur l'utilisateur pourrait vouloir cesser de réparer des pièces. Dans notre approche, nous souhaitons permettre à l'utilisateur de hiérarchiser strictement les différents objectifs.

Établir le paramétrage associé à cette hiérarchisation peut s'avérer difficile à cause des différences de coûts unitaires qui peuvent apparaître d'un site à un autre. Nous proposons en section 5.3 une approche pour calculer les différents poids associés à une hiérarchie des objectifs. Une hiérarchie complète de ces coûts peut être par exemple de minimiser le coût de rupture de stock puis de réparation suivi du stockage et enfin de transfert.

5.2.2 Les politiques opérationnelles

Les politiques opérationnelles sont, quant à elles, axées sur la manière dont le plan est obtenu et sur le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement qui en découle. En pratique, les utilisateurs sont généralement intéressés par la satisfaction d'un objectif particulier puis par le comportement des pièces pour satisfaire cet objectif. Ces comportements définissent les opérations et décisions privilégiées. Ils peuvent être, par exemple, d'éviter de réparer les pièces défectueuses, de privilégier la consommation locale, de retourner les pièces défectueuses vers un centre de distribution ou au contraire de les conserver dans les sites.

Ainsi, nous décidons d'offrir une alternative à la hiérarchisation purement quantitative en permettant à l'utilisateur du système de choisir un objectif principal (dénommé objectif primaire) puis de choisir le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement pour atteindre cet objectif.

5.3 Relation d'ordre entre les poids

Dans notre approche, le seul levier permettant de contrôler le système et le comportement des pièces repose sur la pondération des différents objectifs de la fonction coût (détaillée en équation 3.4e). Les coûts unitaires pouvant varier d'une instance à une autre, il peut être difficile pour un utilisateur de déterminer une pondération qui garantisse une hiérarchisation entre les différents objectifs. Pour prioriser un objectif par rapport à un autre, il faut que la satisfaction du premier objectif soit toujours plus bénéfique en termes de fitness que la satisfaction du second.

Étant donnés deux objectifs o_1 et o_2 , nous définissons une relation d'ordre entre ces objectifs notée $>_R$ telle que $o_1 >_R o_2$ signifie qu'il est toujours plus intéressant de minimiser l'objectif o_1 que l'objectif o_2 .

Plus formellement avec s, s' deux solutions et f_1 la fonction d'évaluation pondérée associée à o_1 et f la fonction pondérée d'évaluation globale alors

$$o_1 >_R o_2 \equiv \forall s, s' : f_1(s) < f_1(s') \rightarrow f(s) < f(s')$$

Cette relation d'ordre peut être assurée par un calcul récursif des poids associés aux objectifs tel que avec n objectifs classés par importance de 1 à n alors $\forall i \in [i+1, \dots, n], w_{i-1} = \alpha_i * w_i$ où α_i est une valeur suffisamment grande pour assurer cette relation d'ordre. Le tableau 5.1 donne une borne possible pour chacun des objectifs avec max le coût unitaire maximum associé à un objectif.

TABLE 5.1 – Borne α associées aux différents objectifs

Objectif	Borne
Demandes (b)	$\alpha_b = \sum_{l \in L, t \in T} (d_{l,t}) \times Tmax \times max_b$
Réparation (m^r)	$\alpha_{m^r} = (\sum_{l \in L, t \in T} (d_{l,t}) + \sum_{l \in L} (s_{l,0}^f) + \sum_{l, l' \in L, t' \in T, t \leq 0} (m_{l, l', t, t'}^f)) \times max_{m^r}$
Stockage(s)	$\alpha_s = (\sum_{l \in L, t \in T} (d_{l,t}) + \sum_{l \in L} (s_{l,0}^f + s_{l,0}^h) + \sum_{l, l' \in L, t' \in T, t \leq 0} (m_{l, l', t, t'}^f + m_{l, l', t, t'}^h)) \times Tmax \times max_s$
Transfert(m^{hf})	$\alpha_{m^{hf}} = (\sum_{l \in L, t \in T} (d_{l,t}) + \sum_{l \in L} (s_{l,0}^f + s_{l,0}^h) + \sum_{l, l' \in L, t' \in T, t \leq 0} (m_{l, l', t, t'}^f + m_{l, l', t, t'}^h)) \times Tmax \times max_{m^{hf}}$

Par exemple, la relation d'ordre $m^r >_R s$ (sans s'intéresser aux autres objectifs) privilégiera la non-réparation avant toute considération de stockage. Concrètement, cela signifie que réparer une pièce coûtera plus (en terme de fitness) que de stocker toutes les pièces possibles sur l'ensemble de l'horizon de temps.

Cette relation d'ordre peut être partielle ou totale. Dans ce dernier cas on obtient une hiérarchisation stricte des objectifs. Par exemple, si les objectifs sont classés par priorité dans l'ordre rupture de stock, réparation, stockage, transfert alors la relation d'ordre complète sera : $b >_R m^r >_R s >_R m^{hf}$.

5.4 Points clés et modélisation

Dans la section précédente, nous avons proposé une méthode pour hiérarchiser strictement les différents objectifs. Il nous faut maintenant nous intéresser à l'impact des différentes relations d'ordre possibles et à leur rapport avec les politiques de gestion. En effet, bien qu'il soit possible d'établir un lien direct entre une politique de coûts et une relation d'ordre entre les poids (il suffit d'établir une relation d'ordre correspondant à la hiérarchisation de la politique de coûts), il apparaît plus complexe de faire un lien entre relation d'ordre et politique opérationnelle.

Pour étudier ce lien, nous proposons de mener une étude expérimentale des 24 différentes hiérarchies strictes possibles pour déterminer le comportement des pièces dans la chaîne d’approvisionnement.

La topologie peut également impacter les comportements possibles des pièces dans la chaîne d’approvisionnement. Elle devra être prise en compte dans les expériences menées. Intuitivement, nous comprenons qu’une topologie flexible sera plus permissive dans les comportements qui pourront être générés qu’une topologie très contrainte. Ainsi, avec une même relation d’ordre, les politiques opérationnelles générées pourraient être différentes selon la topologie de la chaîne d’approvisionnement.

Dans nos expérimentations, nous investiguerons l’impact des 24 différentes relations d’ordre possibles avec différentes topologies et observerons les politiques opérationnelles correspondantes. La finalité de ces expériences est de pouvoir associer à un couple (topologie, relation d’ordre) un comportement des pièces dans la chaîne d’approvisionnement. Une fois cette association réalisée, nous serons en mesure de réaliser l’étape inverse, c’est-à-dire fournir un couple (topologie, comportement) à partir duquel le système pourra automatiquement déduire la relation d’ordre adéquate et par conséquent les poids associés aux différents objectifs. De plus, si l’utilisateur se place dans le cas d’une politique de coûts (il fournit lui-même la relation d’ordre) le système sera en mesure de lui fournir des indications sur le comportement attendu des pièces dans la chaîne d’approvisionnement. La figure 5.1 résume l’objectif de nos expérimentations.

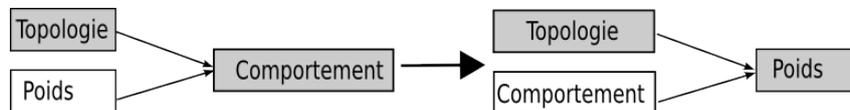


FIGURE 5.1 – Objectif des expérimentations

5.5 Expérimentations

5.5.1 Mise en place

Dans nos expérimentations nous proposons d’étudier les 24 relations d’ordre possibles avec les différentes instances présentées dans la section 4.6.1. Nous conduirons nos expérimentations sur les trois topologies présentées et rappelées en figure 5.2.

La topologie *Complete* est plus flexible que la topologie *Clique*, elle-même plus flexible que la topologie *Tree*. Ainsi, si notre intuition se confirme, la topologie *Complete* devrait permettre une plus grande variété de politiques opérationnelles. Les chaînes d’approvisionnement que nous étudions sont de petite taille (1 centre de distribution, 9 hubs et 15 magasins). Nous justifions ce choix par le fait que la taille de la chaîne n’impactera pas le comportement des pièces.

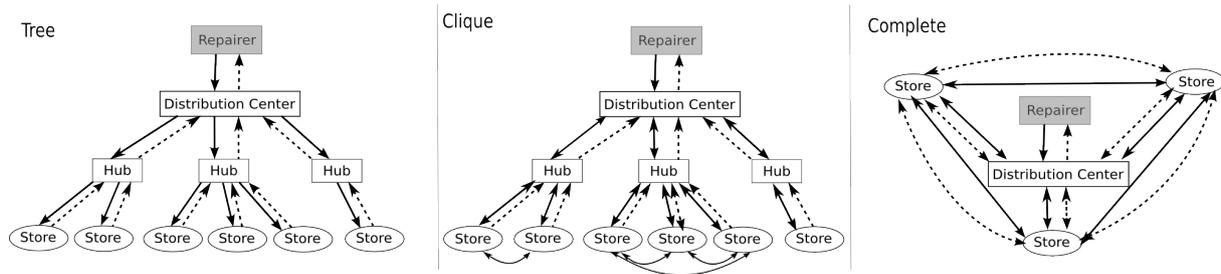


FIGURE 5.2 – Topologies

En effet, les relations d'ordre vont déterminer les comportements des pièces dans la chaîne d'approvisionnement indépendamment de la taille de cette dernière. Ainsi, si une pondération peut être associée à une politique pour une chaîne d'approvisionnement de petite taille, elle le sera également pour une chaîne de même type de taille plus importante. Pour assurer la validité de notre approche avec différents niveaux et distribution des pièces initiales, les expérimentations ont été conduites sur tous les schémas de distribution (DC, Stores, Mix) et de niveaux (High, Med, Low) que nous avons générés.

En ce qui concerne les coûts unitaires, les coûts inter-objectifs peuvent être différents (pour deux objectifs différents le coût unitaire peut varier). Cette différence sera absorbée par la relation d'ordre entre les objectifs. Dans les expériences présentées, les coûts unitaires intra-objectifs sont identiques quels que soient les sites et les périodes de temps (le coût unitaire d'un objectif particulier ne varie pas). Nous faisons cette hypothèse pour éviter un biais dans l'étude de l'impact des relations d'ordre. Dans ce contexte, nous notons que si une légère variation n'impacte pas les résultats obtenus, une hétérogénéité importante des coûts intra-objectifs peut modifier les résultats obtenus. Nous discuterons ce point dans la section 5.6.

Pour mener nos expérimentations, nous utilisons la métaheuristique BIS présentée en section 4.5.3 à laquelle nous allouons 1000 restarts.

5.5.2 Résultats

Dans le chapitre précédent, nous nous intéressions principalement au coût global des plans générés. Ici, nous cherchons plutôt à étudier les plans selon la relation d'ordre utilisée. Il nous faut donc mettre en place différentes mesures afin de pouvoir déduire le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement.

Les premières mesures que nous proposons sont axées sur les différents objectifs. Pour chaque instance, nous allons mesurer par période de temps et par site les quantités moyennes de ruptures de stock, de pièces stockées (saines et défectueuses), de réparations, de retours et d'approvisionnements. Ces mesures vont nous permettre de comparer l'impact des différentes pondérations sur des instances similaires et vont également nous apporter des informations sur le comportement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement.

Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus pour les 24 relations d'ordre sur une instance avec les schémas High et Mix sur la topologie *Tree*. Spécifiquement, la seconde colonne représente la pondération utilisée, et les différentes mesures sont décrites de la troisième à la huitième colonne. Les résultats présentés ici sont extraits d'une instance particulière, toutefois

TABLE 5.2 – Résultats sur la topologie *Tree* avec les schémas High et Mix

Politique	Relation d'ordre	Ruptures	Réparations	Stockage	Transferts	Approvisionnements	Retours
1	$b >_R s >_R m^r >_R m^{hf}$	0	0,080	6,021	0,449	0,259	0,190
2	$b >_R s >_R m^{hf} >_R m^r$						
3	$b >_R m^r >_R s >_R m^{hf}$	0	0,001	6,407	0,301	0,111	0,190
4	$b >_R m^r >_R m^{hf} >_R s$						
5	$b >_R m^{hf} >_R s >_R m^r$	0	0,001	6,596	0,112	0,111	0,001
6	$b >_R m^{hf} >_R m^r >_R s$						
7	$s >_R b >_R m^r >_R m^{hf}$						
8	$s >_R b >_R m^{hf} >_R m^r$						
9	$s >_R m^r >_R b >_R m^{hf}$	0	0,080	6,021	0,449	0,259	0,190
10	$s >_R m^r >_R m^{hf} >_R b$						
11	$s >_R m^{hf} >_R b >_R m^r$						
12	$s >_R m^{hf} >_R m^r >_R b$						
13	$m^r >_R b >_R s >_R m^{hf}$						
15	$m^r >_R s >_R b >_R m^{hf}$	0,002	0	6,413	0,299	0,109	0,190
16	$m^r >_R s >_R m^{hf} >_R b$						
14	$m^r >_R b >_R m^{hf} >_R s$	0,002	0	6,603	0,109	0,109	0
17	$m^r >_R m^{hf} >_R b >_R s$	0,939	0	7,649	0	0	0
18	$m^r >_R m^{hf} >_R s >_R b$						
19	$m^{hf} >_R b >_R s >_R m^r$						
20	$m^{hf} >_R b >_R m^r >_R s$						
21	$m^{hf} >_R s >_R b >_R m^r$	0,939	0	7,649	0	0	0
22	$m^{hf} >_R s >_R m^r >_R b$						
23	$m^{hf} >_R m^r >_R b >_R s$						
24	$m^{hf} >_R m^r >_R s >_R b$						

nous retrouvons des résultats similaires sur les autres instances (en termes de regroupement et de comparaison entre les relations d'ordre). Ces résultats sont intéressants principalement sur 2 aspects. Premièrement, nous remarquons qu'ils illustrent parfaitement la relation d'ordre appliquée. En effet, en comparant les différentes relations d'ordre nous notons que l'objectif primaire (le plus important) est toujours minimisé. La hiérarchie entre les objectifs restants (les objectifs secondaires) détermine les comportements des pièces pour atteindre l'objectif primaire. Par exemple, les politiques 1 à 3 partagent le même objectif primaire mais la hiérarchie entre les objectifs secondaires aboutit à des résultats différents. Cependant, nous pouvons remarquer que différentes politiques produisent des résultats similaires. Par exemple, toutes les politiques où l'objectif principal est de minimiser les transferts (politiques 19 à 24) produisent les mêmes résultats. En effet, pour limiter les transferts, l'unique possibilité est de ne déplacer aucune pièce.

Cela aboutit à des résultats similaires quelle que soit la hiérarchie entre les objectifs secondaires.

Pour confirmer les résultats obtenus avec les métriques mesurées sur les objectifs, nous introduisons de nouvelles mesures. Plutôt que de porter sur les objectifs, ces mesures porteront sur les opérations effectuées et permettront de mieux refléter le comportement des pièces dans la chaîne d’approvisionnement. En effet, à chaque période de temps une pièce saine peut être soit consommée (pour résoudre une demande), stockée sur le site ou transférée vers un autre site. De la même manière, une pièce défectueuse peut être stockée, réparée ou transférée. Nous exprimons ces mesures sous forme de pourcentage pour chaque type d’opération (nous séparons gestion des pièces saines et gestion des pièces défectueuses). À partir de ces pourcentages, nous pouvons comparer le comportement des pièces pour différentes pondérations pour une instance particulière ou pour une topologie particulière. Le tableau 5.3 présente les moyennes des différents pourcentages pour la topologie *Tree* sur l’ensemble des pondérations. La seconde colonne présente la pondération utilisée abstraite sous forme de relation d’ordre, de la troisième à la cinquième les pourcentages moyens des opérations sur les pièces défectueuses et de la sixième à la huitième les pourcentages moyens des opérations sur les pièces saines. Enfin, la neuvième colonne représente la classification de la pondération utilisée. En effet, nous avons remarqué avec les résultats précédents que certaines pondérations peuvent être regroupées ensemble. Nous validons cette hypothèse en classifiant les pondérations avec l’utilisation de la méthode de clustering *k*-means. Nous fixons *k* à 4 arbitrairement pour donner les tendances de comportement sur chacune des opérations évaluées. Pour chaque mesure, nous classifions les pondérations puis nous regroupons les pondérations qui sont classées de manière similaire sur l’ensemble des mesures. Cette classification aboutit aux mêmes regroupements que ceux observés sur les mesures basées sur les objectifs.

L’ensemble des résultats permet d’associer certains comportements avec des relations d’ordre. Par exemple, les politiques 17 à 24 où les coûts de transferts sont particulièrement élevés aboutissent à une conservation totale des pièces défectueuses stockées sur les sites. Pour ces mêmes politiques, la gestion des pièces saines est caractérisée par l’absence d’approvisionnement et par la consommation de quelques pièces (celles situées originellement sur les magasins). En d’autres termes, ces politiques sont caractérisées par une absence de retour et d’approvisionnement et par une consommation locale des pièces.

Malgré ces résultats, il peut rester difficile d’évaluer l’impact de certaines politiques. Dans ce cas, il est possible d’analyser plus précisément les différentes politiques en étudiant l’évolution des mesures au cours du temps. La figure 5.3 décrit l’évolution des différentes mesures pour les politiques 1 ($b >_R s >_R m^r >_R m^{hf}$) et 4 ($b >_R m^r >_R m^{hf} >_R s$) pour une instance sur la topologie *Tree* avec les schémas High et Mix. Plus spécifiquement, les graphes 5.3(a) et 5.3(b) présentent l’évolution des mesures sur les objectifs (moyenne par site) et les graphes 5.3(c) et 5.3(d) présentent l’évolution des mesures sur les opérations (moyenne par site). Les deux

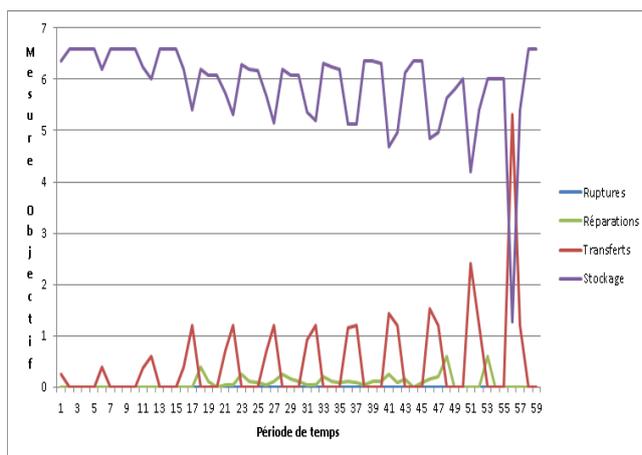
TABLE 5.3 – Pourcentage moyen selon le type d’opération sur la topologie *Tree*

Politique	Relation d’ordre	Pièces Défaillantes			Pièces Saines			Classe
		Stockage	Retour	Répar.	Stockage	Appro.	Conso.	
1	$b >_R s >_R m^r >_R m^{hf}$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
2	$b >_R s >_R m^{hf} >_R m^r$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
3	$b >_R m^r >_R s >_R m^{hf}$	0,87	0,106	0,02	0,85	0,09	0,06	2
4	$b >_R m^r >_R m^{hf} >_R s$	0,93	0,045	0,02	0,84	0,10	0,06	3
5	$b >_R m^{hf} >_R s >_R m^r$	0,93	0,045	0,02	0,84	0,10	0,06	3
6	$b >_R m^{hf} >_R m^r >_R s$	0,93	0,045	0,02	0,84	0,10	0,06	3
7	$s >_R b >_R m^r >_R m^{hf}$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
8	$s >_R b >_R m^{hf} >_R m^r$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
9	$s >_R m^r >_R b >_R m^{hf}$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
10	$s >_R m^r >_R m^{hf} >_R b$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
11	$s >_R m^{hf} >_R b >_R m^r$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
12	$s >_R m^{hf} >_R m^r >_R b$	0,77	0,163	0,07	0,85	0,10	0,05	1
13	$m^r >_R b >_R s >_R m^{hf}$	0,94	0,064	0	0,92	0,04	0,04	4
15	$m^r >_R s >_R b >_R m^{hf}$	0,94	0,064	0	0,92	0,04	0,04	4
16	$m^r >_R s >_R m^{hf} >_R b$	0,94	0,064	0	0,92	0,04	0,04	4
14	$m^r >_R b >_R m^{hf} >_R s$	1,00	0	0	0,92	0,04	0,04	5
17	$m^r >_R m^{hf} >_R b >_R s$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
18	$m^r >_R m^{hf} >_R s >_R b$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
19	$m^{hf} >_R b >_R s >_R m^r$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
20	$m^{hf} >_R b >_R m^r >_R s$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
21	$m^{hf} >_R s >_R b >_R m^r$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
22	$m^{hf} >_R s >_R m^r >_R b$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
23	$m^{hf} >_R m^r >_R b >_R s$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6
24	$m^{hf} >_R m^r >_R s >_R b$	1,00	0	0	0,98	0	0,02	6

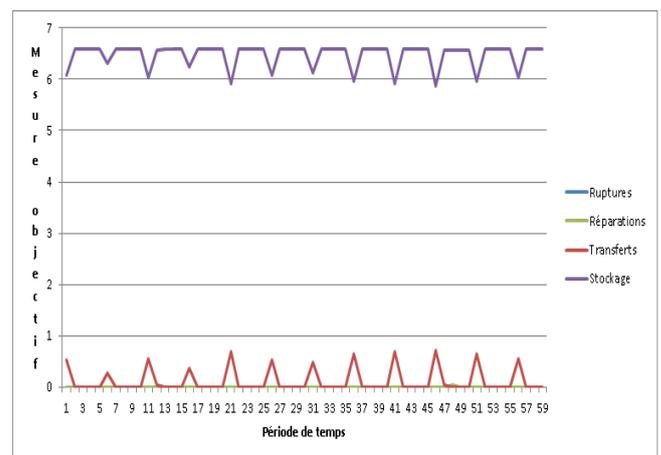
graphes sont complémentaires pour chaque politique et permettent d’obtenir différentes informations. Il convient d’être particulièrement prudent avec les mesures de pourcentage. En effet, ces mesures dépendent de la quantité de pièces présentes dans la chaîne d’approvisionnement. Ainsi, la résolution d’une demande à un moment où 9 pièces restent stockées sera représentée par un pourcentage de consommation de 10% alors que la résolution de cette même demande moment où 1 unique pièce reste stockée résultera en un pourcentage de consommation de 50%. Pour assurer les observations, il est alors parfois nécessaire d’analyser les autres mesures. Pour les deux politiques étudiées, l’objectif principal est de minimiser les ruptures de stock. Cet objectif est parfaitement rempli et facilement visualisable sur les graphes 5.3(a) et 5.3(b) où il n’y a aucune rupture de stock. La gestion du stockage et des transferts est, quant à elle, plus facile à discerner sur les graphes 5.3(c) et 5.3(d) où les opérations sur les pièces saines sont séparées de celles sur les pièces défaillantes et où les résultats sont exprimés en pourcentages d’actions plus simples à interpréter que les quantités.

Ici, nous pouvons remarquer un pourcentage élevé de retours des pièces défaillantes et de réparations pour la politique 1 tandis que le pourcentage de stockage défaillant est quasiment

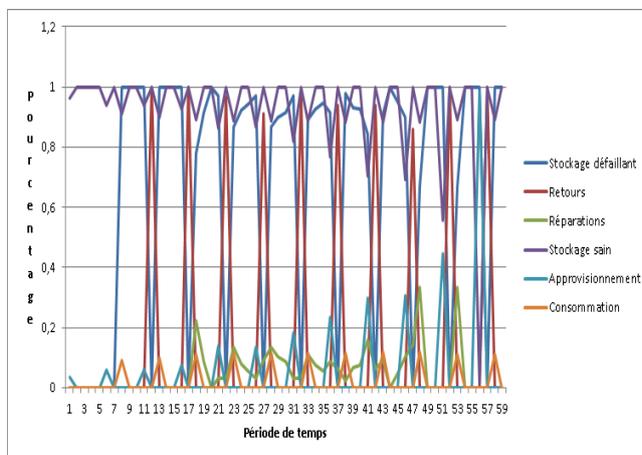
de 100% sur l'horizon de temps pour la politique 4. Ainsi, on peut en déduire que la première politique va engendrer le retour et la réparation des pièces défectueuses alors que la seconde va conserver les pièces défectueuses dans les magasins. De la même manière, on discerne un envoi de pièces saines élevé pour la politique 1 alors que la politique 4 envoie uniquement les pièces saines correspondantes aux demandes futures. Ainsi, on peut en déduire que la politique 1 va provoquer un envoi des pièces saines du centre de distribution vers les magasins alors que la politique 4 enverra uniquement les quantités nécessaires et conservera les autres pièces saines au centre de distribution.



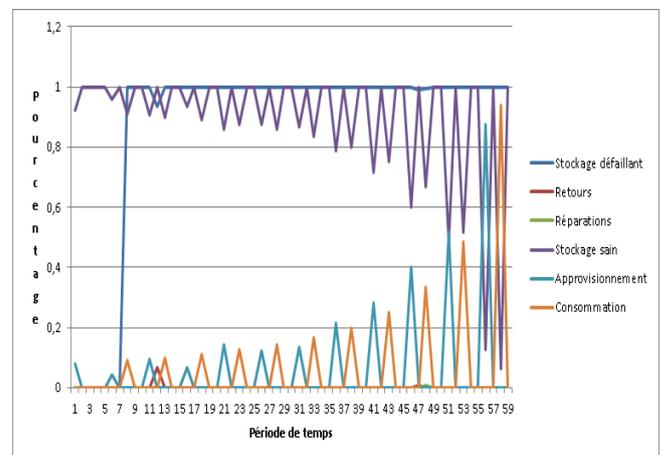
(a) Mesure objectifs - politique 1.



(b) Mesure objectifs - politique 4.



(c) Mesure pourcentages - politique 1.



(d) Mesure pourcentages - politique 4.

FIGURE 5.3 – Évolution des métriques sur l'horizon de temps sur la topologie *Tree* avec les schémas High et Mix

L'étude des différents résultats sur les différentes topologies permet d'établir de manière empirique différentes politiques opérationnelles associées aux différentes relations d'ordre. Ces résultats sont résumés dans les tableaux 5.4 et 5.5 avec les trois topologies proposées et l'ensemble des relations d'ordre. La première colonne présente l'objectif primaire associé à la

relation d'ordre étudiée, la seconde la topologie, la troisième la relation d'ordre sur les objectifs secondaires, la quatrième le comportement des pièces induit par les objectifs secondaires et la cinquième le comportement des pièces imposé par l'objectif primaire. Nous adoptons ici une présentation particulière en séparant l'objectif primaire des objectifs secondaires. De plus, nous exprimons sous forme de conjonction de relations les relations d'ordre entre les objectifs secondaires. Ainsi, par exemple, la première ligne du tableau 5.4 correspond aux deux relations d'ordre suivantes : $b >_R s >_R m^{hf} >_R m^r$ et $b >_R s >_R m^r >_R m^{hf}$. Notons également que la relation d'ordre entre les objectifs secondaires peut aussi être totalement dominée par l'objectif primaire et ainsi ne jamais impacter les résultats. Dans ce cas, la relation d'ordre est remplacée par un '-'.

Nous précisons également que les comportements exprimés dans ces tableaux sont le résultat d'une étude empirique et qu'ils sont l'aboutissement d'une interprétation des données obtenus lors des expérimentations.

La décision de séparer l'objectif principal de l'objectif secondaire est explicable par l'impact majeur du choix de cet objectif principal. En effet, cet objectif va être associé à un comportement majeur qui sera réalisé, peu importe la relation d'ordre entre les objectifs secondaires. Au contraire les comportements mineurs associés à la relation d'ordre entre les objectifs secondaires sont plus indicatifs et ne s'exprimeront que s'ils ne s'opposent pas au comportement majeur. Par exemple, si nous prenons la seconde ligne, le comportement majeur est de résoudre les demandes et le comportement mineur de conserver les pièces là où elles sont. Dans ce cas, si une pièce doit être déplacée pour résoudre une demande, elle le sera même si cela est contraire au comportement mineur. De plus, ces comportements restent dépendants de l'instance de la chaîne d'approvisionnement. Ils sont conditionnés par les calendriers et niveaux de stock.

Nous pouvons faire plusieurs remarques sur les résultats obtenus. Tout d'abord, nous pouvons noter que les résultats confirment notre intuition sur la flexibilité des topologies. En effet, moins les topologies sont contraintes plus elles permettent de politiques. La topologie *Complete* est ouverte à onze politiques différentes contre neuf pour la topologie *Clique* et huit pour la topologie *Tree*. Nous pouvons également souligner que certaines de ces politiques sont robustes topologiquement c'est-à-dire que des relations d'ordre identiques aboutissent à des comportements identiques sur les topologies différentes. En effet, parmi les vingt politiques opérationnelles présentées (comportements primaire et secondaire), quatre sont communes aux trois différentes topologies.

D'un point de vue plus concret, parmi toutes ces politiques certaines paraissent plus pertinentes pour gérer une chaîne d'approvisionnement que d'autres. Par exemple, certains des comportements présentés décrivent quelles pièces doivent être utilisées pour résoudre les demandes (e.g., pièces stockées dans les magasins, pièces envoyées depuis le centre de distribution, ...). Ces comportements semblent intéressants et utiles aux gestionnaires. Au contraire,

TABLE 5.4 – Récapitulatif des politiques opérationnelles

Objectif primaire	Topologie	Relation d'ordre	Comportement mineur	Comportement majeur		
Ruptures de stock	Tree	$(s >_R m^{hf}) \wedge (s >_R m^r)$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces défectives réparées Pièces saines approvisionnées aux magasins	Demandes résolues		
		$(m^{hf} >_R s)$	Pièces conservées où elles sont			
		$(s >_R m^{hf}) \wedge (m^r >_R s)$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces défectives non réparées Pièces saines approvisionnées aux magasins			
	Clique	$(s >_R m^{hf}) \wedge (s >_R m^r)$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces défectives réparées Pièces saines constamment transférées			
		$(m^{hf} >_R s)$	Pièces conservées où elles sont			
		$(m^r >_R s >_R m^{hf})$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces défectives non réparées Pièces saines constamment transférées			
	Complete	$(s >_R m^{hf} >_R m^r)$	Pièces défectives constamment transférées Pièces défectives réparées Pièces saines constamment transférées			
		$(s >_R m^{hf}) \wedge (m^r >_R m^{hf})$	Pièces défectives constamment transférées Pièces défectives non réparées Pièces saines constamment transférées			
		$(m^{hf} >_R s)$	Pièces conservées où elles sont			
	Réparations	Tree	$(s >_R m^{hf})$		Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces saines approvisionnées aux magasins Demandes résolues (en utilisant les pièces saines initiales)	Pièces défectives non réparées
			$(m^{hf} >_R s) \wedge (m^{hf} >_R b)$		Pièces conservées où elles sont Demandes résolues (en utilisant les pièces initialement situées dans les magasins uniquement)	
			$(b >_R m^{hf} >_R s)$		Pièces défectives conservées là où elles sont Pièces saines approvisionnées uniquement pour résoudre des demandes	
Clique		$(s >_R m^{hf}) \wedge (s >_R b)$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces saines constamment transférées jusqu'à ce qu'elles permettent la résolution de demandes			
		$(m^{hf} >_R s) \wedge (m^{hf} >_R b)$	Pièces conservées où elles sont Demandes résolues (en utilisant les pièces initialement situées dans les magasins uniquement)			
		$(b >_R m^{hf} >_R s)$	Pièces défectives conservées où elles sont Pièces saines approvisionnées uniquement pour résoudre des demandes			
		$(b >_R s >_R m^{hf})$	Pièces défectives retournées au centre de distribution Pièces saines constamment transférées à moins de devoir être stockées pour résoudre une demande			
Complete		$(s >_R m^{hf}) \wedge (s >_R b)$	Pièces défectives constamment transférées Pièces saines constamment transférées jusqu'à ce qu'elles permettent la résolution de demandes			
		$(m^{hf} >_R s) \wedge (m^{hf} >_R b)$	Pièces conservées où elles sont Demandes résolues (en utilisant les pièces initialement situées dans les magasins uniquement)			
		$(b >_R m^{hf} >_R s)$	Pièces défectives conservées où elles sont Pièces saines approvisionnées uniquement pour résoudre des demandes			
		$(b >_R s >_R m^{hf})$	Pièces défectives constamment transférées Pièces saines constamment transférées à moins de devoir être stockées pour résoudre une demande			

TABLE 5.5 – Récapitulatif des politiques opérationnelles

Objectif primaire	Topologie	Relation d'ordre	Comportement mineur	Comportement majeur
Stockage	Tree	-		Pièces défectueuses retournées au centre de distribution Pièces saines approvisionnées aux magasins Pièces défectueuses réparées Demandes résolues
	Clique	-		Pièces défectueuses retournées au centre de distribution Pièces défectueuses réparées Pièces saines constamment transférées jusqu'à ce qu'elles permettent la résolution de demandes
	Complete	$(m^r >_R b) \wedge (m^r >_R m^{hf})$	Pièces défectueuses non réparées	Pièces défectueuses constamment transférées Pièces saines constamment transférées jusqu'à la résolution d'une demande
		$(m^{hf} >_R m^r)$	Pièces défectueuses réparées	
$(b >_R m^r >_R m^{hf})$		Pièces défectueuses réparées si nécessaires à la résolution d'une demande		
Transferts	Tree	-		Pièces conservées où elles sont
	Clique	-		Demandes résolues (en utilisant les pièces initialement situées dans les magasins uniquement)
	Complete	-		

certaines comportements semblent complètement inappropriés dans une perspective industrielle. Notamment, toutes les politiques qui induisent un comportement qui aboutit à garder les pièces en mouvement dans la chaîne d'approvisionnement semblent irréalisable. En effet, elles permettent en théorie d'éviter des coûts de stockage mais sont inconcevables d'un point de vue économique et opérationnel.

Nous pouvons également faire quelques remarques sur le positionnement des poids dans la relation d'ordre. En effet, selon leur positionnement, ces poids ne vont pas avoir le même impact sur le comportement. Si l'objectif primaire est de minimiser le stockage ou les transferts alors la relation d'ordre entre les objectifs secondaires n'est pas importante. D'autre part, nous pouvons aussi remarquer que les objectifs de stockage et de transfert sont contradictoires. Si la minimisation des transferts est plus importante que le stockage alors les pièces seront conservées là où elles sont sinon elles seront constamment déplacées dans la chaîne d'approvisionnement. De la même manière, dans le cas où la minimisation des ruptures de stock et du stockage est plus importante que celle des transferts alors les demandes seront généralement résolues, soit dans le but de minimiser les ruptures de stock, soit d'évacuer des pièces de la chaîne d'approvisionnement (la résolution d'une rupture de stock permet de faire sortir une pièce du circuit). Dans ce cas, le positionnement du poids de réparation va définir si les demandes peuvent être résolues uniquement en utilisant des pièces saines ou si les pièces défectueuses peuvent également être réparées puis utilisées. Enfin, excepté pour la topologie *Complete*, l'ordre entre les objectifs de transfert et de réparation peut être ignoré. Cela peut s'expliquer par le fait que les réparations et les transferts ne sont pas des opérations directement corrélées (les réparations n'impactent pas

les transferts et vice-versa).

5.6 Discussion

Les tableaux 5.4 et 5.5 est crucial du point de vue de notre système d'aide à la décision. Cela ajoute à notre outil la fonctionnalité qui permet aux gestionnaires de choisir des politiques opérationnelles en complément des politiques de coûts. Les gestionnaires ont juste à renseigner la topologie de leur chaîne d'approvisionnement. Ils peuvent ensuite sélectionner l'objectif primaire ou le comportement majeur souhaité. Une fois ce choix réalisé, ils pourront choisir les comportements mineurs ou l'ordre des objectifs secondaires parmi les différentes possibilités proposées dans notre table. Le système pourra alors générer de manière automatique les poids adaptés.

Il est toutefois important de modérer les résultats présentés. En effet, toutes les chaînes d'approvisionnement ne rentrent pas dans ce tableau. Nous avons limité nos expérimentations à 3 topologies différentes et à des cas où la variabilité des coûts intra-objectif est faible.

Nous proposons des solutions pour répondre à ces deux problématiques. La gestion d'une nouvelle topologie est plutôt simple, cela requiert uniquement de conduire une nouvelle vague d'expérimentations afin de déduire les différents comportements associés aux différentes relations d'ordre. On pourrait également imaginer la mise en place d'un système d'apprentissage permettant d'associer des comportements à des relations de manière automatique. Une variation importante des coûts intra-objectif pourrait être gérée de la même manière mais les comportements déduits ne seraient valables que pour cette variation spécifique. Pour éviter ce problème nous suggérons la séparation des objectifs en cas de variation importante. En effet, nous pouvons supposer que de manière générale des coûts largement différents sont liés à des objectifs différents. Par exemple, une variabilité commune est une différence de coût de stockage entre le centre de distribution et les autres sites de la chaîne d'approvisionnement. Dans ce cas l'objectif de stockage peut être séparé en deux et la fonction coût sera modifiée telle que décrite dans l'équation (5.1) où w^{ss} et c^{ss} (respectivement w^{sd} et c^{sd}) sont le poids et le coût associé aux sites (resp. au centre de distribution).

$$c = w^{ss} \times c^{ss} + w^{sd} \times c^{sd} + \omega^b \times c^b + \omega^{m^{hf}} \times c^{m^{hf}} + \omega^{m^r} \times c^{m^r} \quad (5.1)$$

La séparation des objectifs peut également être utile pour définir des politiques spécifiques même si la variabilité intra-objectif est faible. Reprenons la fonction coût présentée en équation (5.1). Cette modification de la fonction couplée à la relation d'ordre $b >_R w^{ss} >_R w^{sd}$ permettra de modéliser la politique classique juste-à-temps [Monden, 1983] ce qui n'est pas possible uniquement avec les 4 objectifs originaux.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la pondération pour faire émerger des comportements spécifiques des pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Particulièrement nous avons proposé une méthode basée sur des relations d'ordre stricte afin de hiérarchiser les objectifs. Cette hiérarchisation a pour finalité de faciliter la prise en main de l'outil pour utiliser des politiques de coûts. De plus, nous avons empiriquement associé à ces relations d'ordre stricte des politiques opérationnelles de gestion des pièces dépendantes de la topologie de la chaîne d'approvisionnement utilisée. Cela étend l'intérêt de notre système d'aide à la décision car la délicate pondération de la fonction coût peut maintenant être automatisée pour répondre à une politique de coût ou à une politique opérationnelle.



6

Robustesse et mise en place des plans

6.1 Introduction

Dans les chapitres 3 et 4, nous avons formalisé le problème du TDPP et proposé une approche pour générer une solution de bonne qualité sous forme de plan pour répondre au problème. Ce plan permet de définir les opérations à réaliser sur un horizon de temps donné. Cependant, la gestion de la chaîne d’approvisionnement n’est pas limitée à la période d’application d’un plan. Une fois un plan appliqué en partie ou en totalité, les gestionnaires doivent générer un nouveau plan pour faire suite au plan précédent et gérer les imprévus ainsi que les nouvelles demandes. Nous nommons plans roulants ces plans successifs. Si, intuitivement, l’application de ces plans roulants paraît aisée, cela demande en réalité de faire plusieurs choix (fréquence d’application, chevauchement entre les plans).

Ce chapitre détaille notre travail en cours et présente les résultats préliminaires obtenus. Nous commencerons par présenter les différents paramètres qui influent les plans roulants. Nous investiguerons la possibilité d’utiliser les plans roulants pour faire face aux incertitudes et formulerons des hypothèses sur la manière de les employer à cette fin. Enfin, nous présenterons des résultats sur différentes expériences pour confirmer empiriquement les intuitions présentées.

6.2 Application des plans

Les plans que notre système produit sont des plans qui prennent place au niveau tactique. Ils définissent des opérations à réaliser sur un horizon de temps. L'intérêt de la planification tactique est multiple. Comme nous l'avons déjà explicité dans le chapitre 2, la planification tactique permet principalement de tirer parti des informations sur le futur et d'anticiper les demandes en déplaçant les pièces en amont. Au niveau opérationnel, l'application d'un plan se traduit par la réalisation à chaque période de temps des actions planifiées. Nous ajoutons que la planification tactique facilite également la gestion opérationnelle. En effet, cela permet de mieux organiser les différentes tâches qui doivent être effectuées (e.g., préparation des pièces, étiquetage, emballage, préparation des camions, ...) pour réaliser correctement les opérations planifiées. Intuitivement, un horizon de planification long permet d'anticiper les demandes et de faciliter la gestion opérationnelle de la chaîne d'approvisionnement.

Toutefois, cet horizon de temps est limité par les informations pouvant être obtenues sur la chaîne d'approvisionnement (e.g., durée des prévisions, durée des calendriers, date d'expiration des contrats de réparation, ...). Ainsi, une fois la durée d'un plan expirée, il est nécessaire de recalculer un nouveau plan qui s'appliquera sur l'état de la chaîne d'approvisionnement après l'application du plan précédent. Dans notre système, nous considérons que les plans sont calculés à une fréquence particulière (hebdomadaire, mensuelle, bi-mensuelle, ...) représentée par le paramètre *Frequency* dans la figure 6.1 qui présente le fonctionnement global du système.

Intuitivement, le nouveau plan $p2$ doit être calculé après l'application du plan $p1$ tel que la fréquence de recalcul f soit égale à l'horizon de temps T_{max} d'un plan. Ainsi, toutes les périodes de temps $t \in [1, \dots, 2 \times T_{max}]$ sont couvertes soit par $p1$, soit par $p2$. Cette fréquence est illustrée par la figure 6.2.

Si cette approche est réaliste et permet de planifier les opérations pour l'ensemble des périodes de temps, elle n'est pas optimale.

Prenons le cas où une demande est prévue à la première période de temps du second plan. Cette demande, pour être résolue, pourrait nécessiter l'approvisionnement d'une pièce saine. Cependant, l'ensemble des opérations permettant cet approvisionnement ne seront initiées, au pire cas, qu'au début du second plan, ce qui provoquera une rupture de stock sur une durée égale au temps d'approvisionnement. Pour résoudre cette problématique, nous proposons de faire chevaucher les plans en augmentant la fréquence de planification permettant ainsi la mise en mouvement des pièces nécessaires pour le début du plan suivant. Ainsi, un plan pourra être divisé en deux parties : une partie *opérationnelle* qui correspondra à la partie réalisée en réalité et une partie *chevauchement* qui correspondra au début du plan suivant et permettra de mettre en mouvement les pièces nécessaires pour le futur. La durée de cette partie de chevauchement est égale à l'horizon de temps d'un plan moins la fréquence de recalcul des plans. La figure 6.3

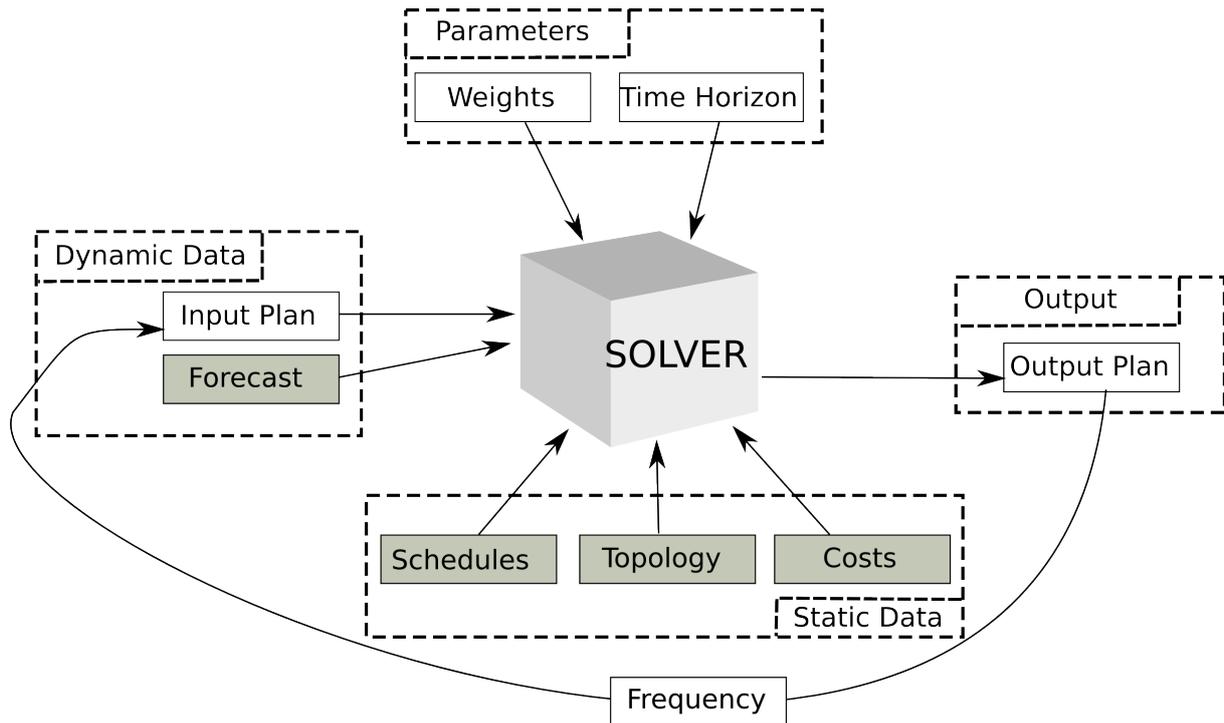


FIGURE 6.1 – Le système d’aide à la décision

illustre cette approche avec un chevauchement entre les plans.

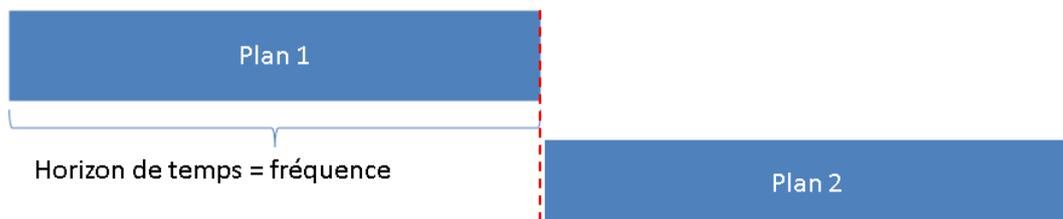


FIGURE 6.2 – Le système de plans roulants avec une fréquence égale à l’horizon de temps

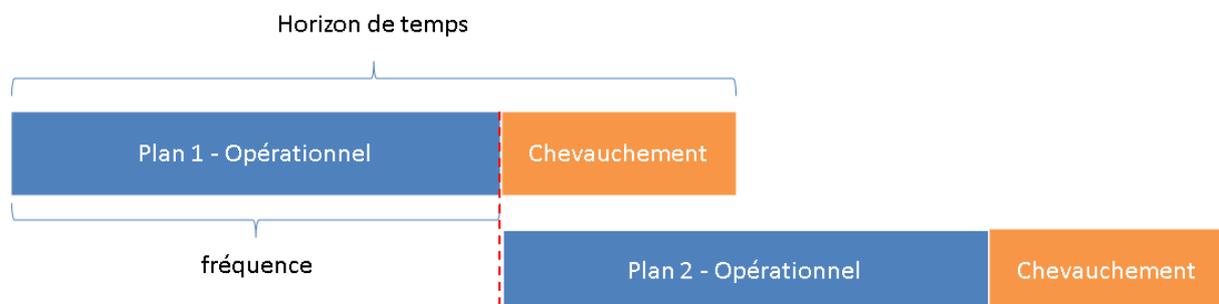


FIGURE 6.3 – Le système de plans roulants avec une fréquence inférieure à l’horizon de temps

La question qui se pose ensuite porte sur la durée du chevauchement entre les plans. In-

tuitivement, il faut établir une durée de chevauchement égale ou supérieure au délai maximal d’approvisionnement. Pour un site donné, ce délai correspond au scénario en pire cas où une pièce défectueuse doit être retournée, réparée puis réapprovisionnée vers le site concerné par la demande. Ainsi, les demandes apparaissant après la période de chevauchement ne nécessitent pas de mise en mouvement des pièces lors du plan précédent. Intuitivement, nous comprenons également qu’un chevauchement long permettra plus de finesse dans les décisions. Particulièrement, cela peut permettre d’envoyer les pièces vers des sites différents ou même de les conserver en attente d’une demande lointaine particulièrement coûteuse. Il s’agira alors de déterminer le meilleur ratio entre fréquence et durée de chevauchement en fonction de la qualité des prévisions.

Nous étudierons différentes combinaisons de ces paramètres et analyserons l’impact associé dans nos expérimentations.

6.3 Gestion des incertitudes

Jusqu’à présent nous faisons l’hypothèse que les données et les prévisions utilisées par le modèle étaient exactes. Si cette hypothèse est plausible dans le cadre des prévisions des opérations de maintenance (qui correspondent à des calendriers prédéterminés de remplacement des pièces), elle est moins réaliste dans le cas des opérations de réparation (qui correspondent typiquement à une demande client imprévue : panne, ...). Il nous paraît alors important de s’intéresser à l’impact de ces incertitudes au niveau de l’application des plans. Nous formulons ici des conjectures quant à la possible gestion des incertitudes et au comportement du système. Nous mènerons des expériences par la suite pour valider ou non ces conjectures. Notre approche, contrairement à des approches de planification qui intègrent directement un facteur de stochasticité [Gupta et Maranas, 2003; Santoso et al., 2005], ne permet pas de s’adapter aux incertitudes pour la génération de plans robustes. Notons, que les approches robustes sont également confrontés à la problématique des plans roulants pour l’application des décisions. Dans notre cas, les plans roulants pourraient permettre de corriger les erreurs de planification et de résoudre les demandes qui n’étaient pas prévues. Intuitivement, plus la fréquence de recalcul sera élevée plus les plans permettront de répondre rapidement aux incertitudes. Nous présentons sur la figure 6.4 un exemple de cette intuition avec trois planifications différentes sur un horizon de temps global similaire mais avec une fréquence (et par conséquent un nombre de plans calculés) différente. Le point rouge sur un plan décrit l’apparition d’une défaillance non prévue et la flèche rouge le délai maximum nécessaire à la prise en considération de cette défaillance par l’outil de planification.

En se basant sur cette intuition la meilleure solution serait de recalculer un plan à chaque

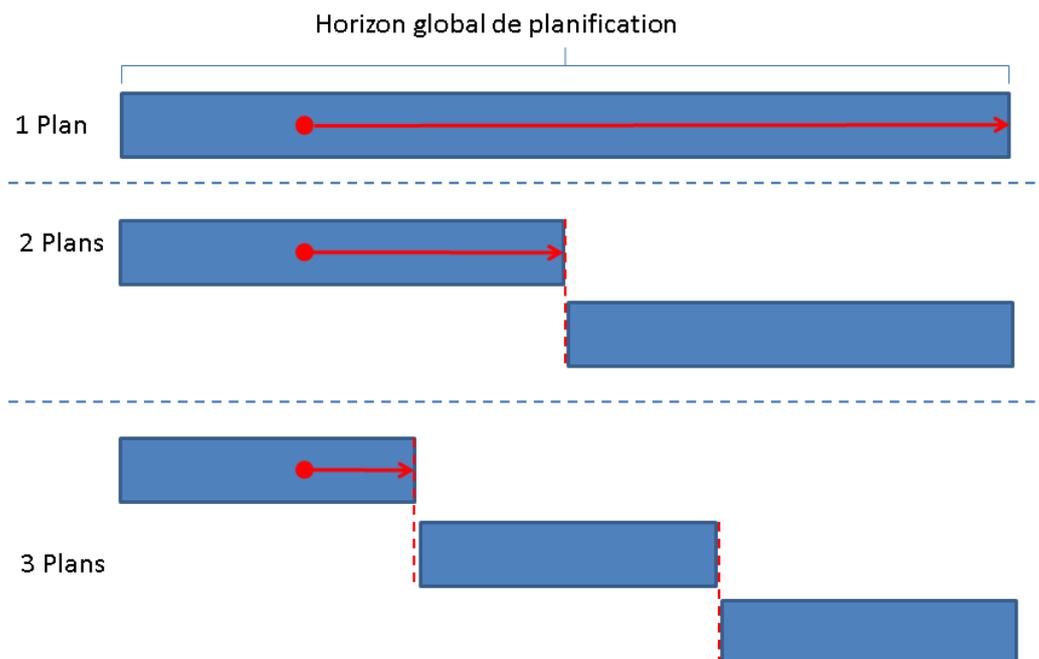


FIGURE 6.4 – Délai nécessaire à la prise en compte d'une défaillance non prévue avec différentes fréquences

période de temps¹. Toutefois, on peut s'interroger quant à la cohérence des plans successifs. En effet, une fréquence élevée de recalcul pourrait entraîner des modifications importantes des actions planifiées dans la période de chevauchement du plan précédent. Dans ce cas, nous aurions alors un conflit entre les performances et un des intérêts de la planification tactique qui est de faciliter la mise en place opérationnelle des actions. De plus, on peut également se poser la question du gain de qualité à long terme avec l'utilisation d'une fréquence de recalcul très élevée. Les modifications constantes des plans pourraient entraîner une incohérence dans le positionnement des pièces dans la chaîne d'approvisionnement ce qui, sur la durée, aurait un impact négatif sur les performances.

Nous avons également vu précédemment que les plans roulants intègrent un second paramètre qui est la durée de chevauchement. Il est difficile de formuler des hypothèses sur l'impact d'un chevauchement plus ou moins long ou même d'établir si cette période de chevauchement aura un impact sur la capacité du système à réagir aux incertitudes.

L'étude expérimentale et l'interprétation de ces différentes hypothèses devra également prendre en compte le type d'incertitudes et de pièces étudiées. En effet, on peut se poser la question de savoir s'il est plus facile de gérer une pièce à fort taux de défaillance avec de nombreuses demandes prévues ou s'il est plus simple de s'adapter aux incertitudes sur les pièces dont les défaillances sont des événements très rares. Pareillement, les incertitudes peuvent simplement

¹si on considère que le temps de calcul et d'attente pour des milliers de références n'est pas un problème

intervenir sur l'absence d'une demande prévue ou la présence d'une défaillance non planifiée. Elles peuvent également être caractérisées de manière géographique ou temporelle. Une incertitude temporelle sera caractérisée par un décalage temporel par rapport à la date prévue de la défaillance, une incertitude géographique sera définie par la présence d'une défaillance à la période de temps prévue mais sur le mauvais site. La question qui se pose est de savoir quel type de défaillances notre système sera capable de gérer et quelles sont ses limites. Nous essaierons d'apporter des premiers éléments de réponse à ces questions à travers nos expérimentations.

6.4 Expériences

Nous présentons ici les premières expérimentations réalisées. D'autres expérimentations devront être réalisées pour confirmer les résultats obtenus.

6.4.1 Protocole d'application des plans roulants face aux incertitudes

Dans ces expérimentations préliminaires, nous allons évaluer la capacité de notre système à répondre aux incertitudes selon la configuration utilisée et selon le niveau d'incertitude.

Il faut commencer par mettre en place un système expérimental permettant d'évaluer l'application d'un ou plusieurs plans sur des données incertaines pour un horizon global de planification. Pour ce faire, nous proposons de générer deux prévisions de la demande $d1$ et $d2$ sur l'horizon global de planification. La première prévision $d1$ constituera la prévision de la demande sur laquelle les plans roulants seront générés tandis que $d2$ constituera les demandes réelles sur lesquelles les plans seront appliqués. Chacun des plans sera généré à partir de l'état de la chaîne d'approvisionnement après application du plan qui le précède et utilisera $d1$ comme prévision. Le plan est ensuite appliqué à $d2$ de manière chronologique (comme ce serait fait en réalité) et toutes les actions planifiées sur la période opérationnelle pouvant être exécutées le sont. Les actions qui ne peuvent pas être réalisées, faute de stock, sont simplement annulées (si un conflit survient sur deux transferts avec une seule pièce disponible, le transfert exécuté est choisi aléatoirement). Bien évidemment, l'annulation d'une action peut entraîner une réaction en chaîne et aboutir à l'annulation de nombreuses actions prévues (effet coup de fouet). Par exemple, si une défaillance prévue ne se produit pas, le retour de pièce est annulé et peut par la suite annuler une réparation puis un approvisionnement et une résolution d'une autre demande. L'application du plan aboutit à un nouvel état de la chaîne d'approvisionnement qui constituera l'état initial utilisé pour générer le plan suivant toujours en utilisant les prévisions $d1$. Pour évaluer le résultat global obtenu, il suffit d'évaluer la qualité du plan appliqué en réalité à $d2$ sur l'horizon global de planification. Le schéma 6.5 illustre ce processus pour un horizon global de planification avec 2 plans roulants générés.

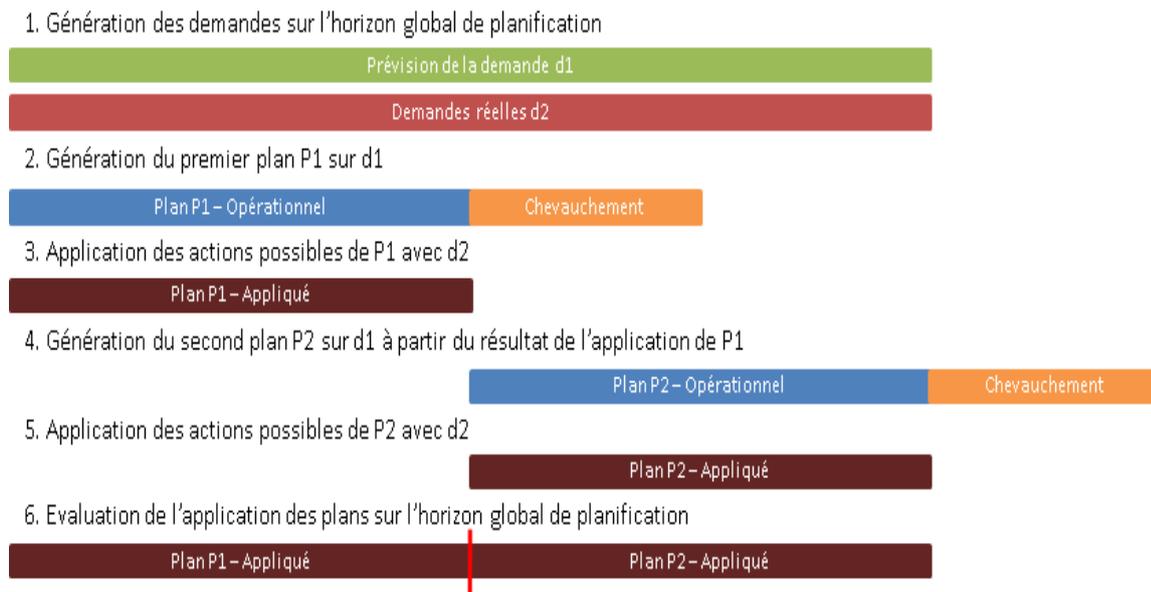


FIGURE 6.5 – Génération, application et évaluation des plans

6.4.2 Instances utilisées

Nous présentons ici les instances et paramètres utilisés dans nos expérimentations. Ces instances sont définies pour permettre d'évaluer certains aspects précis du système.

Nous étudions des instances définies selon les topologies *Tree* et *Clique* présentées en section 4.6.1. Nous utilisons les schémas de distribution et les niveaux de stock présentés dans cette même section. Les niveaux de stock initiaux (High, Med, Low) varieront évidemment selon le nombre de demandes prévues sur l'horizon de planification global. Dans tous les cas, nous fixons l'horizon de planification global à 150 périodes de temps, ce qui est un horizon suffisamment long (étant donné les courts délais d'acheminement) pour étudier l'impact de l'application et du recalcul des plans sur la gestion des niveaux de stock et des demandes. De plus, les poids et coûts associés sont tous fixés à 1 pour éviter le biais que des coûts et poids différents pourraient provoquer.

Le premier aspect que nous souhaitons étudier dans nos expérimentations est la qualité des prévisions des demandes mais aussi l'impact de la quantité de demandes. Le but est d'investiguer s'il est plus facile de répondre aux incertitudes avec un niveau élevé de demandes ou avec des demandes rares. Dans cette optique, nous allons générer les prévisions des demandes et les demandes que nous considérerons comme réelles suivant une loi de Poisson avec λ le nombre moyen de demandes par site par période de temps, et $p(k)$ la probabilité qu'il existe k demandes :

$$p(k) = \frac{\lambda^k}{k!} * e^{-\lambda}$$

Dans cette étude, nous considérons que tous les sites d'une instance ont un niveau de de-

mande similaire. Ainsi, dans chaque expérimentations les prévisions et demandes réelles seront bien générées site par site mais suivront la même loi de Poisson. De plus, les demandes réelles associées aux prévisions suivront également la même loi de Poisson assurant un niveau de demandes prévues proche du niveau de demandes réelles. Cette hypothèse paraît réaliste dans le sens où l'on suppose avoir des prévisions de qualité correcte.

Nous choisissons de générer des instances avec différentes valeurs du paramètre λ . Pour chaque valeur de λ , nous générons une prévision des demandes et 10 jeux de demandes réelles. Il existe plusieurs tests permettant d'évaluer la qualité de prévisions face à la réalité (SMAPE, MAPE, MASE). Après conseils des experts de BT, nous utilisons la mesure *SMAPE* (Symmetric Mean Absolute Percentage Error) [Makridakis, 1993] qui permet d'évaluer la qualité de prévision avec A les demandes réelles, F les demandes prévues et t l'unité sur laquelle le test est appliqué ce qui nous permettra d'évaluer la qualité de la prévision selon différentes unités :

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{F_t - A_t}{(|A_t| + |F_t|)/2}$$

Nous proposerons, pour nos instances, les valeurs de *SMAPE* global (qualité de la prévision par site par période de temps), *SMAPE* par site (qualité de la prévision par site sans prendre en compte les périodes de temps), *SMAPE* par période de temps (qualité de la prévision par période de temps sans prendre en compte les sites). Notons qu'il est généralement considéré qu'une prévision de bonne qualité est associée à une valeur de *SMAPE* inférieure à 0.05.

Pour ces expérimentations, nous avons utilisé 4 valeurs de λ (paramètre de la loi de Poisson) et donnons les valeurs de *SMAPE* associées à chacune d'elles :

- $\lambda = 0.05$: une demande apparaît en moyenne par site toutes les 20 périodes de temps. Les valeurs de *SMAPE* moyen sur ces instances sont : *global* = 0.49, *sites* = 0.12, *périodes* = 0.33.
- $\lambda = 0.1$: une demande apparaît en moyenne par site toutes les 10 périodes de temps. Les valeurs de *SMAPE* moyen sur ces instances sont : *global* = 0.48, *sites* = 0.08, *périodes* = 0.27.
- $\lambda = 0.25$: une demande apparaît en moyenne par site toutes les 4 périodes de temps. Les valeurs de *SMAPE* moyen sur ces instances sont : *global* = 0.44, *sites* = 0.05, *périodes* = 0.16.
- $\lambda = 0.5$: une demande apparaît en moyenne par site toutes les 2 périodes de temps. Les valeurs de *SMAPE* moyen sur ces instances sont : *global* = 0.39, *sites* = 0.03, *périodes* = 0.11.

Comme nous pouvons le voir, les prévisions ne sont pas de très bonne qualité par rapport aux demandes réelles. Toutefois, nous notons que les quantités prévues sur les sites sont plutôt de bonne qualité. De plus, plus les demandes sont nombreuses (i.e., λ élevé) plus les prévisions sont de bonne qualité. Ceci est explicable par le fait que si les demandes sont très rares (par exemple, 5 demandes en 150 périodes de temps) alors il est très improbable de bien prévoir ne serait-ce qu'une demande alors que si une demande survient un jour sur deux en moyenne alors la prévision est facilitée.

Toutes nos expériences seront réalisées en utilisant l'algorithme BIS pour le calcul des plans avec 100 restarts de l'algorithme par génération de plan.

6.4.3 Paramétrage du système

Nous avons vu que pour utiliser les plans roulants avec notre système il est nécessaire de configurer deux paramètres : la période de chevauchement et la fréquence de recalcul.

Nous souhaitons étudier l'impact de ces paramètres pour répondre aux incertitudes. Afin d'éviter un biais dans cette étude nous réaliserons deux expérimentations, l'une pour étudier la fréquence et l'autre pour étudier la période de chevauchement.

Étude de la fréquence

Pour étudier l'impact de la fréquence, nous proposons de réaliser des expérimentations sur les instances présentées dans la section précédente en faisant varier la fréquence de recalcul. La période de chevauchement entre les plans sera toujours la même et fixée à 30 périodes de temps. Cette durée est suffisamment importante pour retourner une pièce défectueuse, la réparer et l'approvisionner à un site. Ainsi, les demandes intervenant dans cette période pourront être anticipées et les actions nécessaires à leur résolution initiées dans la période opérationnelle du plan. Nous proposons d'étudier 4 fréquences de recalcul différentes :

- 150 périodes de temps. La fréquence de recalcul est égale à l'horizon global de planification. Un seul plan est généré et les incertitudes ne peuvent pas être prises en compte. Intuitivement, cette fréquence pourra être utile en cas de prévision parfaite.
- 30 périodes de temps. La fréquence de recalcul est égale à la période de chevauchement. 5 plans sont générés sur l'horizon global de planification et permettent des ajustements des plans. Intuitivement, cette fréquence pourra être utile en cas de différences mineures entre la prévision et la réalité.
- 5 périodes de temps. Cette fréquence de recalcul est courte. 30 plans sont générés sur l'horizon global de planification et permettent des ajustements fréquents des plans. Intuitivement, cette fréquence pourra être utile en cas d'incertitudes assez importantes.

- 1 période de temps. Cette fréquence de recalcul est la plus courte possible. 150 plans sont générés sur l'horizon global de planification et permettent des ajustements récurrents des plans. Intuitivement, cette fréquence est la plus adaptée à la gestion des incertitudes.

Chevauchement

Nous allons également réaliser des expérimentations visant à étudier l'impact de la durée du chevauchement entre deux plans successifs sur les instances présentées dans la section précédente. Pour étudier la période de chevauchement, nous fixons arbitrairement la fréquence de recalcul à 30 périodes de temps (suffisant pour retourner, réparer et réapprovisionner une pièce), 5 plans sont donc générés sur l'horizon global de planification. Nous choisissons d'étudier trois durées de chevauchement différentes :

- 0 périodes de temps. L'horizon de temps d'un plan est de 30 périodes de temps et n'inclut pas de chevauchement avec le plan suivant. Ce chevauchement ne permet pas d'anticiper les demandes intervenant après le plan.
- 5 périodes de temps. L'horizon de temps d'un plan est de 35 périodes de temps et inclut 5 périodes de chevauchement avec le plan suivant. Ce chevauchement doit permettre d'initier les actions permettant la résolution de demandes apparaissant au début du plan suivant.
- 30 périodes de temps. L'horizon de temps d'un plan est de 60 périodes de temps et inclut 30 périodes de chevauchement avec le plan suivant (soit l'intégralité de la période opérationnelle). Ce chevauchement doit permettre d'initier les actions permettant la résolution de demandes apparaissant à n'importe quelle période de temps du plan suivant.

Intuitivement, une période de chevauchement importante permettra la résolution des demandes se produisant sur le plan suivant. Toutefois, on peut se poser la question de la pertinence de cette période de chevauchement (et même d'une approche de planification tactique) en cas de prévisions de très mauvaise qualité qui risqueraient d'induire des actions inutiles.

6.4.4 Évaluation des résultats

Nous évaluons les résultats obtenus selon deux critères : la qualité et l'utilisation.

La qualité des résultats va être évaluée par le coût total du plan "réel" résultant de l'application successive des plans opérationnels générés. Le coût global et le coût par objectif (stockage, rupture de stock, réparation, transfert) permet la comparaison entre les différents paramétrages. Pour faciliter la comparaison entre les paramétrages, nous proposons d'utiliser dans chacune des expérimentations une valeur étalon pour établir des ratios sur les objectifs par rapport au paramétrage testé.

Les ratios calculés sont de la forme suivante : $\frac{\text{Coût objectif expérimentation}}{\text{Coût objectif expérimentation étalon}}$. Dans le cas des expérimentations sur la fréquence, l'étalon sera établi chaque fois par la configuration sans recalcul du plan (fréquence égale à 150 période de temps).

Dans le cas des expérimentations sur le chevauchement, l'étalon sera établi chaque fois par la configuration sans chevauchement.

Ainsi, un ratio de 0.5 sur un objectif signifiera que le coût est 50% moins élevé dans l'expérimentation étudiée que dans l'expérimentation étalon. Au contraire, un ratio de 1.5 signifiera que le coût associé est 50% plus élevé.

Nous souhaitons également établir l'utilisation des plans générés. Nous définissons cette utilisation comme le ratio du nombre d'actions exécutées par le plan appliqué en réalité par rapport aux actions prévues par les différentes parties opérationnelles des plans. Intuitivement, si un plan et une prévision sont de bonne qualité alors le ratio d'utilisation devrait être proche de 1 (i.e., tous les actions prévues sur les parties opérationnelles sont appliquées en réalité). Au contraire, on peut supposer qu'une prévision de mauvaise qualité mènera vers un ratio d'utilisation faible, auquel cas on peut se demander si l'utilisation de la planification tactique est pertinente. Nous investiguerons ainsi le lien entre utilisation et prévisions mais également entre utilisation et paramétrage.

6.4.5 Résultats et analyse

Nous présentons ici un échantillon des résultats obtenus lors des expérimentations. Les résultats obtenus sur les autres instances peuvent produire des valeurs différentes (dues par exemple à des quantités initiales de pièces différentes) mais aboutissent aux mêmes conclusions qualitatives.

Tout d'abord, les graphes 6.6 à 6.10 présentent les résultats obtenus lors des expérimentations sur les fréquences de recalcul avec les schémas High et DC sur la topologie *Tree*. Les quatre premiers graphes présentent les ratio résultant de l'évaluation de qualité des plans en fonction des valeurs du paramètre λ pour et des différentes fréquences étudiées avec chaque fois 5 instances différentes. Pour plus de précision les différents ratios sont exprimés par objectif (résolution des demandes, réparation, stockage, transfert). Le graphe présente 6.10 le ratio d'utilisation par fréquence de recalcul pour différentes instances et les différents paramètres λ .

6.4.5.1 Impact de la fréquence

Nous commençons par nous intéresser à l'impact de la fréquence de recalcul sur les résultats obtenus pour ce qui est de la qualité des plans. Nous pouvons remarquer que la différence majeure entre les résultats obtenus se situe au niveau de la résolution des demandes et cela indépendam-

ment du paramètre λ . En effet, dans l'ensemble des cas, plus le plan est recalculé fréquemment, moins les demandes non résolues sont importantes. En moyenne, l'utilisation d'une fréquence de recalcul à 1 permet de résoudre 80% des demandes non résolues sans recalcul du plan avec un λ à 0.05 et 70% des demandes non résolues avec un λ à 0.5. Cette différence selon les valeurs de λ s'explique par les quantités de demandes prévues. En effet, les demandes sont très rares avec λ à 0.05 et sont, par conséquent, plus rarement résolues avec une prévision de mauvaise qualité d'où l'importance cruciale du recalcul du plan. Dans un cas avec de nombreuses demandes, la prévision prévoit généralement correctement une partie des demandes réelles ce qui permet au plan, même sans recalcul, de résoudre une partie des demandes prévues. Les différences de performances au niveau des autres objectifs sont beaucoup moins importantes. Les quantités de pièces réparées et souvent transférées sont plus importantes avec une fréquence de recalcul plus élevée. Notons qu'un léger biais peut intervenir à ce niveau. En effet, la période de chevauchement des derniers plans dépasse de l'horizon global de planification. Certains mouvements peuvent être prévus dans cette période et ne pas apparaître dans les résultats obtenus (car non appliqués sur la période évaluée). Cela explique notamment que malgré une fréquence de recalcul plus élevée, la quantité de transferts reste parfois plus faible. Malgré cela, les résultats restent intéressants. En effet, plus les plans sont recalculés, plus il y a d'ajustements faits pour résoudre les demandes imprévues et plus les pièces défaillantes correspondantes à ces défaillances peuvent être utilisées (donc plus de transferts et de réparations possibles). Particulièrement, les coûts unitaires de réparation et de stockage étant similaires (1 pour chaque mais avec le stockage indexé par période de temps), il est plus intéressant de réparer les pièces que de les stocker ce qui explique le niveau élevé de réparation avec une fréquence élevée. De plus, des pièces saines supplémentaires seront nécessaires pour résoudre des demandes non prévues initialement et demanderont alors un surplus de réparations et de transferts. Notons que, comme pour la résolution des demandes, cet effet est plus important avec des niveaux de demandes faibles dont la prévision est plus difficile. Enfin, le coût de stockage se révèle être moins élevé lorsque les plans sont recalculés fréquemment. Cet effet est directement lié aux constatations faites précédemment. La seule manière d'éviter le stockage est soit de résoudre des demandes, soit de transférer ou de réparer des pièces. Tous ces cas sont exprimés de manière plus importante avec une fréquence de recalcul élevée par rapport à un non recalcul des plans, expliquant la différence obtenue au niveau du stockage.

Nous nous intéressons maintenant au graphe 6.10 qui décrit le ratio d'utilisation. Nous commençons par analyser les différences entre les fréquences de recalcul. Nous notons que plus les plans sont recalculés fréquemment, plus les actions prévues sur les parties opérationnelles sont appliquées. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une partie des actions prévues par ces plans est utilisée pour résoudre des demandes passées non prévues. Ces actions ne sont pas dépendantes de la prévision future et donc appliquées en réalité. D'autre part, une fréquence de recalcul plus

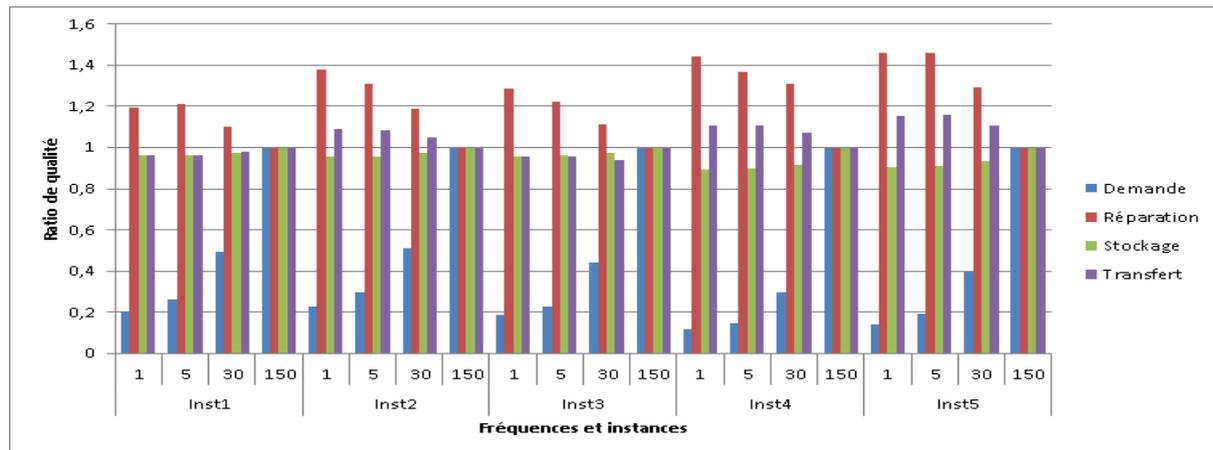


FIGURE 6.6 – Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.05$.

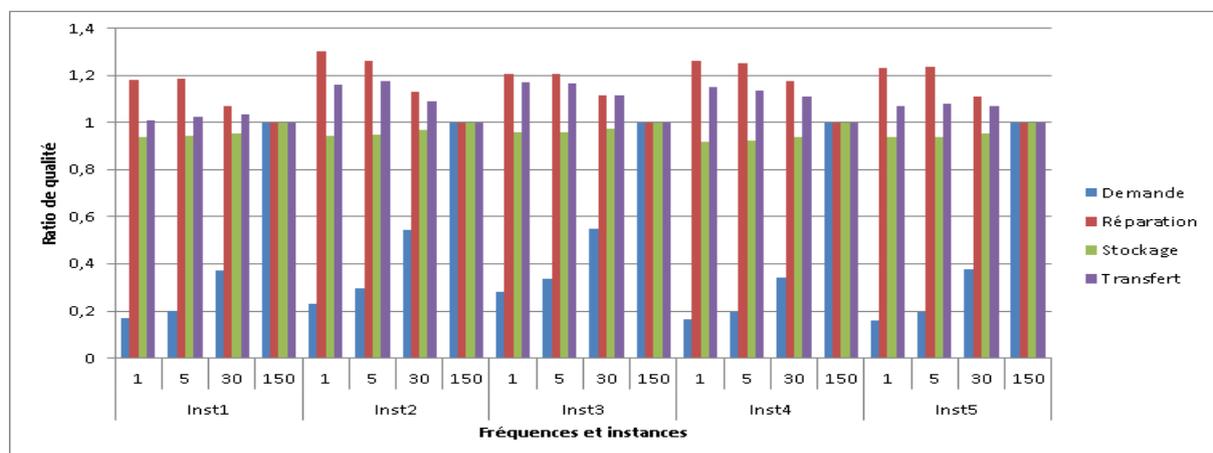


FIGURE 6.7 – Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.1$ sur la topologie *Tree*.

élevée implique une partie opérationnelle du plan plus courte. Ainsi, la propagation en chaîne d'actions annulées à cause d'une erreur de prévision de la demande est limitée à cette courte partie opérationnelle et sera corrigée au plan suivant. Toutefois, nous notons qu'avec 30 périodes de temps comme fréquence de recalcul, le ratio d'utilisation est à plusieurs reprises inférieur à celui sans recalcul du plan (en particulier avec des valeurs de λ élevées). Ceci est explicable par le fait que le recalcul du plan implique la planification d'un nombre plus élevé d'actions pour résoudre les demandes non prévues. Ainsi, si plus d'actions sont prévues et que les plans sont suffisamment longs pour subir l'effet d'annulation en chaîne, alors cet effet peut être répété sur plusieurs plans successifs expliquant ainsi cette baisse du ratio. Le ratio d'utilisation est donc dépendant du nombre d'actions prévues et de la durée opérationnelle des plans.

En ce qui concerne les valeurs de λ , nous pouvons remarquer que plus les demandes sont rares, moins le ratio d'utilisation est important. En effet, lorsque le nombre de demandes prévues

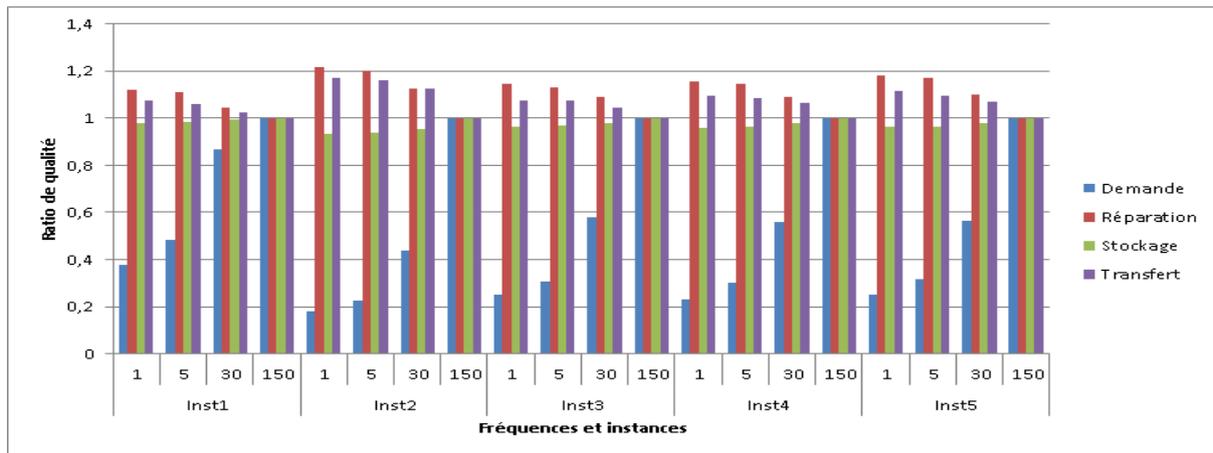


FIGURE 6.8 – Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.25$ sur la topologie *Tree*.

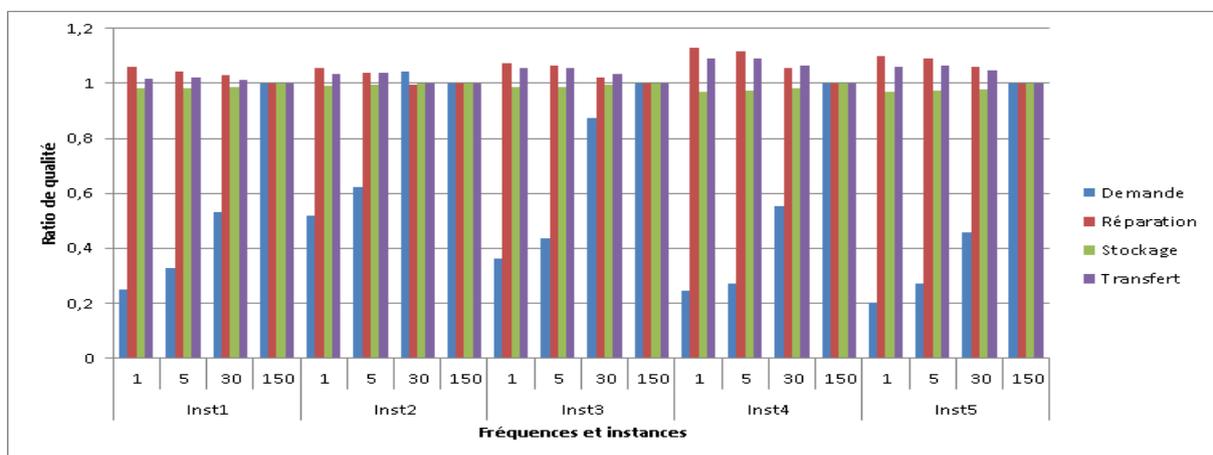


FIGURE 6.9 – Évaluation de la qualité des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.5$ sur la topologie *Tree*.

sur l'horizon de temps est faible, le nombre d'actions prévues pour résoudre ces demandes sera faible également. Ainsi, une erreur de prévision qui empêchera le retour puis la réparation d'une pièce défectueuse aura un impact plus important au niveau du ratio par rapport au nombre d'actions total.

Nous observons à partir de ces expérimentations sur la fréquence de recalcul que dans le cadre d'une prévision de qualité limitée, une fréquence élevée de recalcul des plans peut être utilisée pour limiter l'impact des incertitudes.

6.4.5.2 Impact de la durée de la période de chevauchement

Nous étudions à présent l'impact de la durée de chevauchement présenté par les graphes 6.11 à 6.15. Plus précisément, les quatre premiers graphes présentent l'évaluation de la qualité des plans selon les différentes valeurs de λ tandis que le dernier décrit l'étude de l'utilisation.

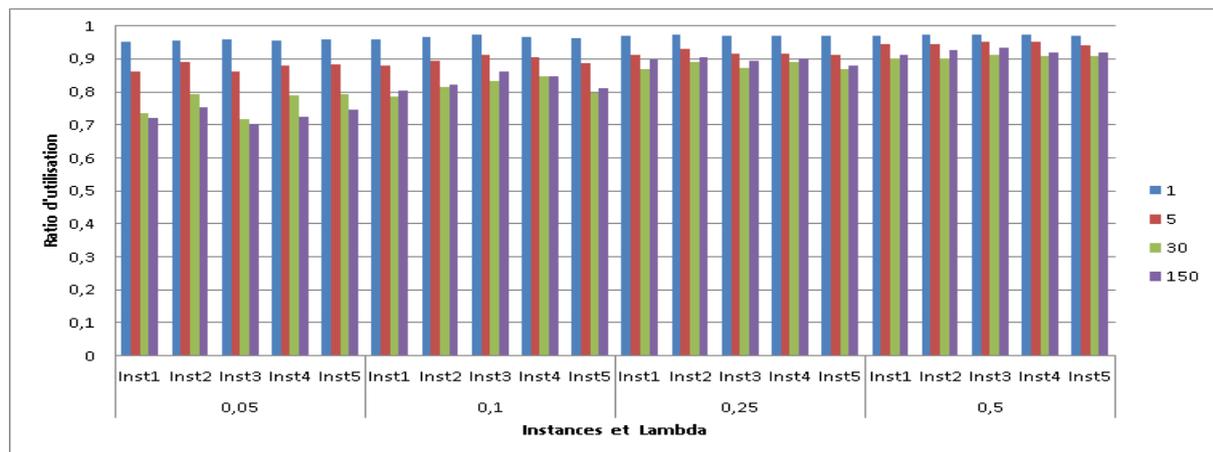


FIGURE 6.10 – Évaluation de l'utilisation des plans selon la fréquence de recalcul sur les schémas High et DC pour les différents λ sur la topologie *Tree*.

Les ratios résultant de l'évaluation de la qualité des plans confirment notre intuition sur la durée des périodes de chevauchement. Cette période est nécessaire à la résolution des demandes qui surviendront durant la période opérationnelle du plan suivant. Nous notons cependant que dans les deux cas où une période de chevauchement est présente (60 et 35), la différence est minime. Nous supposons que cette faible différence peut être imputée à la fréquence utilisée dans les calendriers d'acheminement et au haut niveau de pièces saines disponibles sur les instances présentées qui permettent de répondre rapidement aux demandes même si celles-ci n'étaient pas anticipées par le plan précédent. Une autre différence entre les durées de chevauchement est la quantité de réparations. En effet, moins de réparations sont effectuées avec une durée de chevauchement importante. Ce résultat semble étrange puisqu'une réparation seule coûte 1 et permet d'éviter un coût de 3 en stockage, elle est donc rentable. On s'attend alors à ce que le maximum de réparations soient effectuées pour réduire le coût de stockage. En réalité, ces réparations sont effectuées mais n'apparaissent pas dans les résultats à cause d'un effet de bord. Les réparations qui constituent la différence entre les approches sont effectuées dans la période de chevauchement du dernier plan (i.e., à des périodes de temps qui suivent l'horizon global de planification étudié) et n'apparaissent pas dans les résultats présentés.

Enfin, nous remarquons que plus les demandes sont nombreuses (i.e., λ élevé), plus la période de chevauchement est cruciale pour la résolution des demandes. Ce résultat est simplement explicable par le fait qu'une quantité élevée de demandes permet d'anticiper plus de potentielles ruptures de stock grâce à la période de chevauchement.

Nous étudions à présent le graphe 6.15 qui décrit la mesure d'utilisation. La durée de la période de chevauchement ne semble pas impacter le niveau d'utilisation excepté dans le cas où les demandes sont rares. L'explication est encore due à l'effet de bord de la période de chevauchement après l'horizon global de planification. En effet, sans période de chevauchement toutes les actions sont prévues sur l'horizon global de planification. Ainsi, l'effet d'annulation

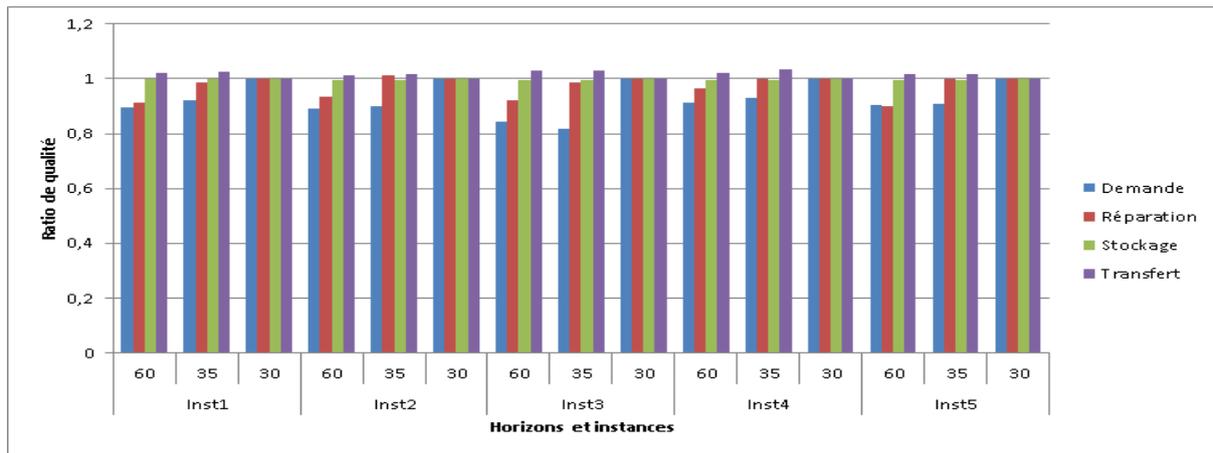


FIGURE 6.11 – Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.05$ sur la topologie *Tree*.

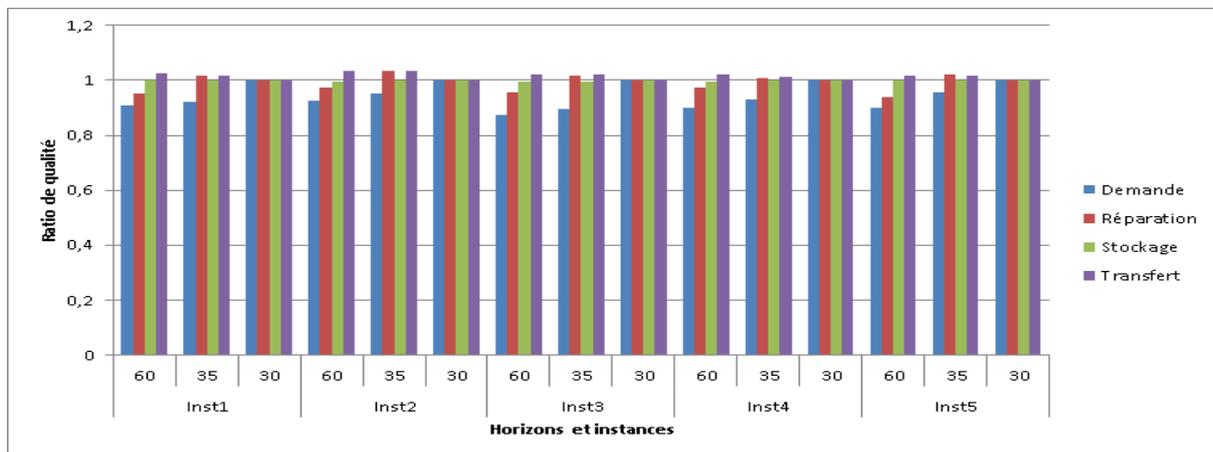


FIGURE 6.12 – Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.01$ sur la topologie *Tree*.

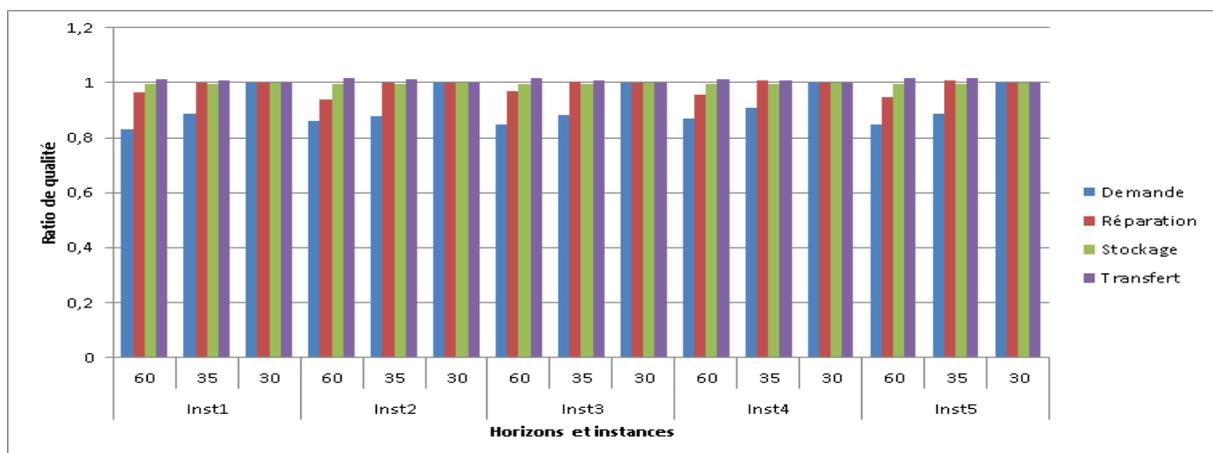


FIGURE 6.13 – Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.25$ sur la topologie *Tree*.

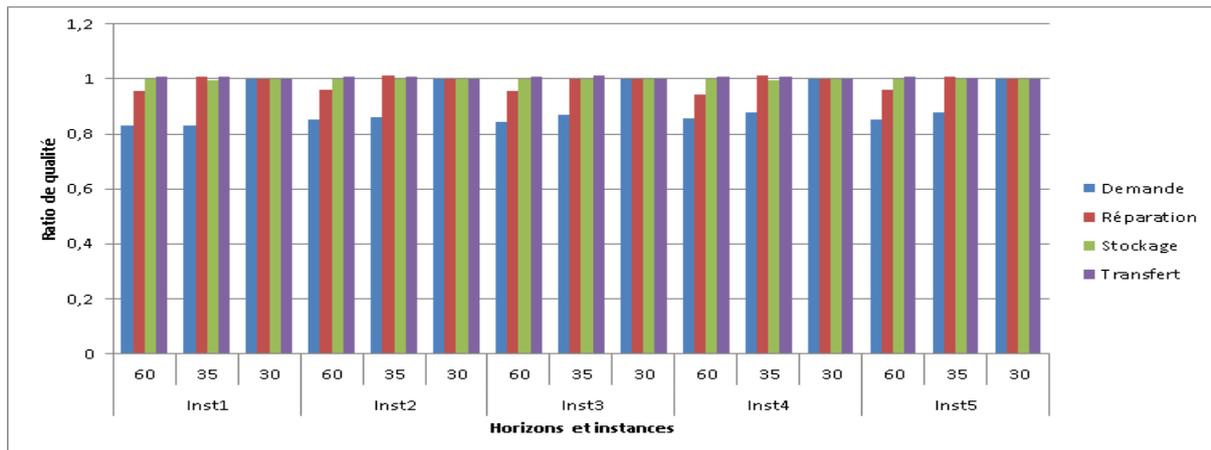


FIGURE 6.14 – Évaluation de la qualité des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC avec $\lambda = 0.5$ sur la topologie *Tree*.

en chaîne est complètement reflété sur l'horizon global de planification contrairement au cas où la dernière période de chevauchement dépasse l'horizon et n'est pas prise en compte dans le calcul de l'utilisation.

Nous notons également que plus la valeur de λ est élevée plus le ratio d'utilisation est élevé. En effet, avec des demandes plus nombreuses, la prévision est de meilleure qualité ce qui résulte en une meilleure application des actions prévues.

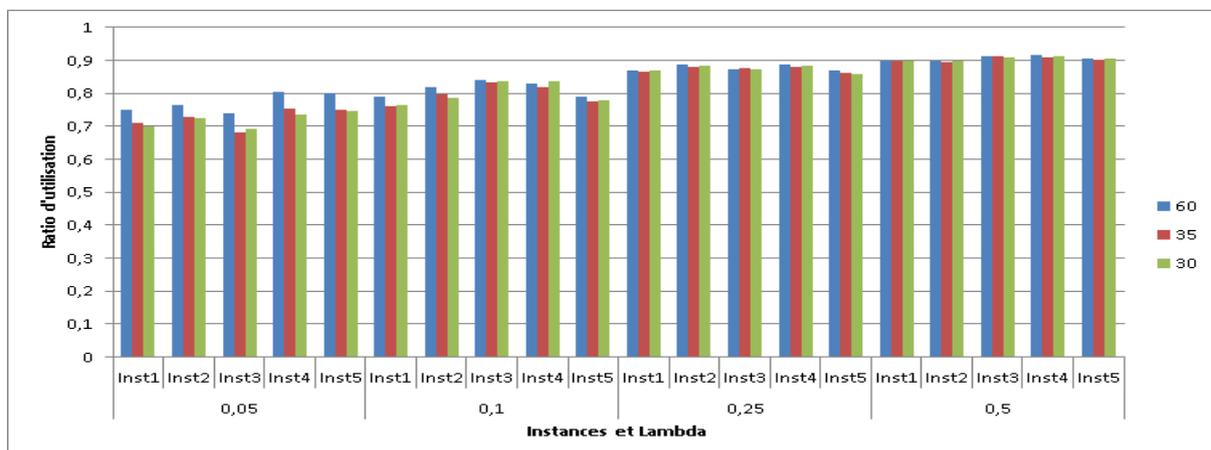


FIGURE 6.15 – Évaluation de l'utilisation des plans selon la période de chevauchement sur les schémas High et DC pour les différents λ sur la topologie *Tree*.

Nous observons à partir de ces expérimentations sur la durée de la période de chevauchement que pour assurer la continuité entre les plans et un niveau de service correct, il est probablement nécessaire d'instaurer une période de chevauchement entre les plans successifs.

6.4.5.3 Impact de la topologie

Pour conclure cette section, nous nous intéressons à l'impact de la topologie sur les résultats obtenus. Intuitivement, face à des incertitudes, une topologie plus permissive devrait être plus efficace. Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons étudié les topologies *Clique* et *Tree*. Pour étudier l'impact de la topologie, nous utilisons les mêmes données de prévisions, de demande et stocks initiaux et proposons dans le tableau 6.1 les quantités moyennes de ruptures de stock pour les deux topologies avec les quatre valeurs de λ pour les différentes fréquences de recalcul. La topologie *Clique* est plus permissive et autorise l'envoi de pièces saines entre les magasins proches et le renvoi de pièces saines vers le DC. Elle permet de prendre plus rapidement en charge les demandes non prévues. Cela est confirmé par les résultats. En effet, plus la quantité de demandes est importante plus la différence entre les topologies s'accroît. De plus, un recalcul plus fréquent des plans permet de tirer avantage plus souvent de cette flexibilité et augmente encore les différences de performance entre ces deux topologies. Ainsi, la modification de la topologie pour augmenter sa flexibilité peut également être une solution combinée au recalcul des plans pour gérer les incertitudes dans la chaîne d'approvisionnement.

TABLE 6.1 – Comparaison de performance selon la topologie sur l'objectif de ruptures de stock avec les schéma High et DC en fonction de λ et de la fréquence de recalcul.

λ	Fréquence	<i>Tree</i>	<i>Clique</i>	<i>Clique/Tree</i>
0,05	30	621,6	599,6	0,97
	5	324,4	293	0,912
	1	251,4	214,8	0,877
0,1	30	1024,4	899,8	0,875
	5	568,6	447,4	0,79
	1	469,4	326,6	0,698
0,25	30	2219	1996	0,898
	5	1194,6	932,8	0,779
	1	945	591,2	0,623
0,5	30	2488,8	2162,6	0,867
	5	1377	918,8	0,665
	1	1122,2	567,6	0,509

6.5 Discussion et perspectives

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont des résultats préliminaires. Ils peuvent être discutés et différentes expérimentations pourraient permettre d'apporter plus de précision quant à la possibilité de faire face aux incertitudes.

Il est nécessaire de relativiser les résultats obtenus. En effet, que ce soit au niveau de l'utilisation ou de la qualité, les résultats les plus intéressants sont obtenus avec une fréquence de recalcul de 1. En réalité, plusieurs points ne motivent pas forcément l'utilisation d'une telle fréquence. Tout d'abord, elle est difficilement applicable en réalité et demanderait le recalcul de plusieurs milliers de plans très fréquemment. De plus, nous avons vu que cette fréquence entraîne un surplus de transferts et de réparations et donc un surcoût opérationnel. D'autre part, il serait intéressant d'introduire une mesure permettant de connaître le ratio des mouvements prévus sur la période de chevauchement qui sont effectivement appliqués en réalité. En effet, une grande variation sur cette partie limite quelque peu l'intérêt de l'approche tactique qui risquerait de complexifier la logistique interne des pièces (préparation des pièces, modifications de dernière minute, ...).

De plus, les expérimentations manquent de variété pour permettre une conclusion définitive quant à la capacité du système à réagir à tout type d'incertitude.

De nombreuses perspectives sont envisageables. Nous en dressons une liste non exhaustive. Tout d'abord, nous avons utilisé dans nos expériences des prévisions et des demandes réelles homogènes (même λ pour tous les sites). Il faudrait également investiguer les performances obtenues dans le cas où les quantités de demandes prévues sont hétérogènes sur les sites mais également le cas de prévisions très peu précises au niveau de la quantité (e.g., λ à 0.05 pour la prévision et à 0.5 pour les demandes réelles et vice-versa).

Une autre étude intéressante serait de coupler la gestion des incertitudes avec l'utilisation des politiques de gestion. Par exemple, si les incertitudes sont fortes sur la localisation de la demande une politique de type juste-à-temps pourrait être intéressante. Au contraire, si l'incertitude intervient au niveau de la temporalité alors une politique qui envoie les pièces au plus tôt vers les magasins pourrait se révéler fructueuse.

Enfin, une information capitale serait de définir face à quel niveau d'incertitude l'utilisation de notre système est pertinente. Il faudrait pour cela réaliser une comparaison entre les performances de notre système et les méthodes réactives de distribution connues. Cela permettrait à l'utilisateur de savoir quel système utiliser selon les incertitudes. Par exemple, nous doutons des performances du système face à des cas où les demandes sont très rares et très difficiles à prévoir. Elles seraient mieux gérées par une approche réactive tandis que les cas à hauts niveaux de demandes seraient probablement à l'avantage de la planification tactique.

6.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté la méthode d'application des plans dans la durée avec la notion de plan roulant. Nous avons également investigué au travers d'une étude préliminaire la capacité du sys-

tème à faire face aux incertitudes de prévision de la demande et mis en exergue l'importance de la fréquence de recalcul des plans et de la présence d'une période de chevauchement entre plans successifs. Enfin, nous avons proposé différentes perspectives expérimentales qui permettraient de compléter et de préciser cette étude.

Conclusion générale

Conclusions

Dans ce manuscrit, nous nous sommes intéressés à la problématique de la planification tactique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée. L'objectif était d'aboutir à une proposition de système d'aide à la décision pour améliorer la gestion des pièces dans les chaînes d'approvisionnement. Pour réaliser ce système, nous avons modélisé le problème qui nous intéressait, proposé des approches de résolution et évalué différents aspects du système tels que la possibilité de l'utiliser pour mettre en œuvre des politiques de gestion et sa capacité à faire face aux incertitudes de prévision.

Le premier chapitre a introduit le domaine de la logistique et présenté les grandes notions nécessaires à la compréhension de la gestion de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

Le second chapitre a présenté le problème concret et détaillé les points clés sur lesquels nous nous sommes appuyés pour faire des choix de conception. Nous avons ensuite décrit différents problèmes de gestion des chaînes d'approvisionnement connus dans la littérature et établi des parallèles avec notre problème. En se basant sur ces problèmes, nous avons détaillé l'approche que nous adoptons dans la thèse à savoir la proposition d'un modèle d'aide à la planification tactique des mouvements de pièces dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

À partir des choix explicités précédemment, le troisième chapitre a présenté la formalisation du problème de planification tactique de distribution (TDPP). La modélisation proposée dans ce chapitre est générique et permet une représentation d'une grande variété de chaînes d'approvisionnement. Dans ce même chapitre, nous avons également proposé deux réductions. La première, du cœur du TDPP au problème de flot de coût minimum, a permis d'établir un parallèle entre TDPP et problèmes classiques de flots. La seconde, du problème de somme de sous-ensembles vers TDPP, a démontré que notre problème est *NP-difficile*.

Le quatrième chapitre a proposé plusieurs méthodes de résolution pour TDPP. La première est une méthode d'optimisation exacte basée sur la programmation mixte en nombres entiers. Face à des difficultés de passage à l'échelle, nous avons introduit deux métaheuristiques. La première d'entre elles a permis la mise en relief des difficultés qui pouvaient survenir dans la résolution d'une instance du problème. La seconde (méthode Best Improving Sequence) pallie à ces difficultés en proposant une approche basée sur un voisinage de séquence d'actions et une structure de données dédiée permettant une efficacité accrue. Nous avons comparé les méthodes exactes et approchées sur des instances inspirées du cas concret et établi la performance de la méthode BIS et son efficacité pour passer à l'échelle. Nous avons également mené une étude du paramètre de diversification de cette méthode, paramètre essentiel à la résolution efficace d'instances difficiles.

Le cinquième chapitre est un chapitre axé sur l'utilisation opérationnelle du système. Le but était d'étudier la possibilité de mener différentes politiques de gestion en utilisant la pondération de la fonction coût. Nous avons proposé une approche basée sur une hiérarchisation des différents objectifs afin de simplifier le paramétrage du système. Cette approche associe à chaque hiérarchisation une politique de coût. Une étude expérimentale complète ce chapitre et associe une politique opérationnelle de gestion (dépendante de la topologie) à chaque hiérarchisation et permet une utilisation facilitée du système d'aide à la planification.

Le sixième chapitre est également un chapitre expérimental et fait état d'une étude préliminaire dont l'objectif était d'investiguer l'application des plans au niveau opérationnel et la possibilité de faire face aux incertitudes de prévision. Nous avons établi l'importance de la période de chevauchement entre les plans successifs pour que ceux-ci soient de bonne qualité. De plus, nous avons étudié l'impact de la variation de la fréquence de recalcul des plans, particulièrement face à des prévisions de mauvaise qualité. Il en résulte qu'une fréquence élevée permet une meilleure réactivité face aux incertitudes. D'autre part, nous avons également vu que la topologie de la chaîne d'approvisionnement peut influencer sur les résultats obtenus. Ainsi, une topologie plus flexible permet une meilleure réponse face aux incertitudes.

Perspectives

La problématique étudiée dans ce manuscrit est vaste et chacun des points abordés dans les différents chapitres pourrait faire l'objet d'une étude dédiée. Nous dressons pour chacun de ces points une liste non exhaustive d'extensions possibles.

Le chapitre 3 a présenté la modélisation du TDPP. Il a également fait état en section 3.5.2

d'une variété d'extensions qui pourraient être incorporées au modèle pour étendre encore plus son champ d'application. Particulièrement, il serait intéressant de pouvoir ajouter des capacités de transfert et de stockage. Une autre extension intéressante serait d'ajouter au modèle un paramètre de stochasticité sur les demandes pour modéliser les incertitudes.

Le chapitre 4 a présenté des méthodes de résolution du TDPP. D'autres approches pourraient être intéressantes. On peut notamment penser à l'utilisation d'un algorithme mémétique ou d'une approche permettant l'exploration de solutions non réalisables. Une autre possibilité pourrait être une approche matheuristique avec une utilisation d'une méthode approchée pour dégrossir le problème et finaliser la solution avec une approche exacte.

Le chapitre 5 a proposé la hiérarchisation pour mener des politiques de gestions. Pour chaque topologie une hiérarchisation est associée empiriquement à une politique de gestion. Il pourrait être intéressant de travailler sur un outil d'apprentissage qui permettrait de s'abstraire de la phase empirique et qui permettrait d'établir les associations entre politiques et hiérarchisation pour une nouvelle topologie.

Le chapitre 6 s'est intéressé à l'application des plans et à la gestion des incertitudes. Le travail sur ce chapitre peut être étendu par de nouvelles expérimentations en travaillant sur d'autres types d'incertitudes (quantités différentes, incertitudes par sites, incertitudes temporaires). Enfin, il faudrait comparer notre approche avec une approche réactive classique pour essayer d'établir quand l'utilisation de notre système est pertinente.

Travail en entreprise

Cette thèse s'étant déroulée pour moitié en entreprise, une partie des travaux réalisés sont à caractère industriel.

Ainsi, nous avons travaillé à la récupération et à la mise en forme des données nécessaires à notre modèle sur des données réelles à partir des bases de données opérationnelles de BT. Ce travail fut particulièrement fastidieux. En effet, la gestion actuelle basée sur les RSR (voir section 2.2.3) ne localise pas précisément les pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Il a donc fallu un travail d'équipe avec les utilisateurs du système pour récupérer, interpréter et transformer les informations pour pouvoir établir les niveaux de stock et les localisations des pièces dans la chaîne d'approvisionnement. Nous avons également travaillé en collaboration avec les spécialistes du domaine à l'implémentation d'algorithmes de prévision des défaillances à partir de ces données (ce travail est toujours en cours à BT). Enfin, pour faciliter l'utilisation et rendre la présentation du système plus attractive, nous avons développé une interface graphique direc-

tement connectée aux bases de données. Cette première interface a été présentée à différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement et est déposée sur un serveur qui offre la possibilité aux utilisateurs de tester l'outil.

D'autre part, nous avons utilisé les données récupérées afin de réaliser des simulations sur des données historiques en utilisant les défaillances survenues en réalité comme une prévision parfaite de la demande. Ces résultats sont très encourageants. En effet, ils démontrent l'efficacité de l'outil en réduisant largement les ruptures de stock en comparaison avec ce qui est arrivé en réalité. De plus, ces résultats permettent également de mettre en exergue le surplus de stock dans la chaîne d'approvisionnement. En effet, les résultats produits par la simulation aboutissent à un stockage constant d'une grande quantité de pièces dans le centre de distribution. Ces pièces ne sont jamais utilisées et pourraient être évacuées pour limiter le coût de gestion tout en conservant ou en améliorant le niveau de service. L'étape suivante au niveau des simulations serait de tester différentes topologies de chaîne d'approvisionnement pour évaluer l'intérêt ou non d'apporter des modifications à la forme du réseau utilisé. Enfin, l'outil permet d'apporter une meilleure traçabilité des pièces par rapport à la gestion actuelle. En effet, cela permet d'établir clairement les niveaux de stock des différents sites et les localisations des pièces en transit dans la chaîne d'approvisionnement.

Finalement, nous avons également commencé à investiguer le problème de même type présent chez BT France et avons discuté avec les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement quant à la possible utilisation de notre outil. Les discussions sur ce projet sont en cours et pourraient aboutir à son utilisation.

Liste des publications et communications

Revue internationale

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint, C. Di Cairano-Gilfedder, A. Liret et G. Owusu. *A combinatorial optimisation approach for closed-loop supply chain inventory planning with deterministic demand*. European Journal of Industrial Engineering, 2017.

Conférences internationales

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint, C. Di Cairano-Gilfedder, A. Liret et G. Owusu. *Model and Combinatorial Optimization Methods for Tactical Planning in Closed-Loop Supply Chains*. IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), San Jose, États-Unis, 2016.

Communications internationales avec comité de lecture

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint, C. Di Cairano-Gilfedder, A. Liret et G. Owusu. *Tactical Supply Chain Distribution Planning In The Telecommunications Service Industry*. Annual Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization (VeRoLog), Nantes, France, 2016.

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint, C. Di Cairano-Gilfedder, A. Liret et G. Owusu. *Strategies for handling uncertainty in tactical distribution planning - an empirical study*. European Chapter on Combinatorial Optimization (ECCO XXIX), Budapest, Hongrie, 2016.

Communications nationales avec comité de lecture

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint, C. Di Cairano-Gilfedder, A. Liret et G. Owusu. *A Metaheuristic for Tactical Inventory Planning in Closed-Loop Supply Chains*. ROADEF, Compiègne, France, 2016.

P. Desport, F. Lardeux, D. Lesaint. *Tactical Inventory Planning in the Telecommunications Service Industry : a Case Study*. ROADEF, Marseille, France, 2015.

Bibliographie

- T. Abdelmaguid. *Heuristic approaches for the integrated inventory distribution problem*. 2004. (page 55).
- T. F. Abdelmaguid et M. M. Dessouky. A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problem. *International Journal of Production Research*, 44(21) :4445–4464, 2006. (page 56).
- R. L. Ackoff. Redesigning the future. *New York*, page 29, 1974. (page 33).
- E. Akçalı et S. Cetinkaya. Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(8) :2373–2407, 2011. (page 58).
- M. J. Álvarez-Gil, P. Berrone, F. J. Husillos, et N. Lado. Reverse logistics, stakeholders' influence, organizational slack, and managers' posture. *Journal of business research*, 60(5) : 463–473, 2007. (page 35).
- Y. Arda. *Politiques d'approvisionnement dans les systèmes à plusieurs fournisseurs et optimisation des décisions dans les chaînes logistiques décentralisées*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2008. (page 48).
- K. J. Arrow, T. Harris, et J. Marschak. Optimal inventory policy. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 250–272, 1951. (page 49).
- K. Bahloul. *Optimisation combinée des coûts de transport et de stockage dans un réseau logistique dyadique, multi-produits avec demande probabiliste*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2011. (page 48).
- B. M. Beamon. Designing the green supply chain. *Logistics information management*, 12(4) : 332–342, 1999a. (page 21).
- B. M. Beamon. Designing the green supply chain. *Logistics information management*, 12(4) : 332–342, 1999b. (page 27).

- L. Bertazzi et M. G. Speranza. Inventory routing problems : an introduction. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(4) :307–326, 2012. (page 54).
- L. Bertazzi, G. Paletta, et M. G. Speranza. Deterministic order-up-to level policies in an inventory routing problem. *Transportation Science*, 36(1) :119–132, 2002. (page 54).
- D. J. Bowersox, D. J. Closs, et M. B. Cooper. *Supply chain logistics management*, volume 2. McGraw-Hill New York, NY, 2002. (page 27).
- A. Campbell, L. Clarke, A. Kleywegt, et M. Savelsbergh. The inventory routing problem. In *Fleet management and logistics*, pages 95–113. Springer, 1998. (page 54).
- C. R. Carter et L. M. Ellram. Reverse logistics : a review of the literature and framework for future investigation. *Journal of business logistics*, 19(1) :85, 1998. (page 35).
- S. Çetinkaya et C.-Y. Lee. Stock replenishment and shipment scheduling for vendor-managed inventory systems. *Management Science*, 46(2) :217–232, 2000. (page 29).
- F. Chen, Z. Drezner, J. K. Ryan, et D. Simchi-Levi. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain : The impact of forecasting, lead times, and information. *Management science*, 46(3) :436–443, 2000. (page 31).
- Y. F. Chen, S. Ray, et Y. Song. Optimal pricing and inventory control policy in periodic-review systems with fixed ordering cost and lost sales. *Naval Research Logistics (NRL)*, 53(2) : 117–136, 2006. (page 48).
- M. Christopher. *Logistics and supply chain management : Strategies for reducing cost and improving service financial times* : Pitman publishing. london, 1998 isbn 0 273 63049 0 (hardback) 294+ 1 × pp. 1999. (page 21).
- M. Christopher. *Logistics and supply chain management*. Pearson UK, 2012. (page 25).
- S.-L. Chung, H.-M. Wee, et P.-C. Yang. Optimal policy for a closed-loop supply chain inventory system with remanufacturing. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(5) :867–881, 2008. (page 57).
- M. Comelli. *Modélisation, optimisation et simulation pour la planification tactique des chaînes logistiques*. PhD thesis, 2008. URL <http://www.theses.fr/2008CLF21938>. Thèse de doctorat dirigée par Gourgand, Michel Informatique Clermont-Ferrand 2 2008. (pages 21 et 22).
- M. C. Cooper, D. M. Lambert, et J. D. Pagh. Supply chain management : more than a new name for logistics. *The international journal of logistics management*, 8(1) :1–14, 1997. (page 25).

- G. B. Dantzig et J. H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1) : 80–91, 1959. (page 53).
- R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth, et L. N. van Wassenhove. *Reverse logistics : quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer Science & Business Media, 2013. (pages 35 et 58).
- S. M. Disney et D. R. Towill. The effect of vendor managed inventory (vmi) dynamics on the bullwhip effect in supply chains. *International journal of production economics*, 85(2) : 199–215, 2003. (page 29).
- P.-P. Dornier et M. Fender. La logistique globale et le supply chain management. *Edition d'organisation*, 2007. (page 20).
- A. Federgruen et Y.-S. Zheng. An efficient algorithm for computing an optimal (r, q) policy in continuous review stochastic inventory systems. *Operations research*, 40(4) :808–813, 1992. (page 49).
- M. Ferguson, V. D. R. Guide Jr, et G. C. Souza. Supply chain coordination for false failure returns. *Manufacturing & Service Operations Management*, 8(4) :376–393, 2006. (page 39).
- M. Fisher, J. Hammond, W. Obermeyer, et A. Raman. Configuring a supply chain to reduce the cost of demand uncertainty. *Production and operations management*, 6(3) :211–225, 1997. (page 31).
- M. L. Fisher. What is the right supply chain for your product ? 1997. (pages 26 et 29).
- M. Fleischmann, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. A. Van Nunen, et L. N. Van Wassenhove. Quantitative models for reverse logistics : A review. *European journal of operational research*, 103(1) :1–17, 1997. (pages 35 et 36).
- M. Fleischmann, J. A. Van Nunen, et B. Gräve. Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at ibm. *Interfaces*, 33(6) :44–56, 2003. (page 58).
- D. B. Fontes et J. F. Gonçalves. Heuristic solutions for general concave minimum cost network flow problems. *Networks*, 50(1) :67–76, 2007. (page 74).
- M. S. Fox, J. F. Chionglo, et M. Barbuceanu. The integrated supply chain management system. Technical report, Technical report, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, 1993. (page 33).
- M. S. Fox, M. Barbuceanu, et R. Teigen. Agent-oriented supply-chain management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 12(2-3) :165–188, 2000. (page 33).

- L. M. Gambardella, É. Taillard, et G. Agazzi. Macs-vrptw : A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. 1999. (page 53).
- M. R. Garey et D. S. Johnson. *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1990. ISBN 0716710455. (pages 71 et 75).
- P. Génin. Planification tactique robuste avec usage d'un aps. proposition d'un mode de gestion par plan de référence. *Mémoire de thèse, Ecole des Mines de Paris, France*, 2003. (pages 11, 33 et 34).
- P. Georgiadis et M. Besiou. Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains : a system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15) :1665–1678, 2008. (page 35).
- F. W. Glover et G. A. Kochenberger. *Handbook of metaheuristics*, volume 57. Springer Science & Business Media, 2006. (page 83).
- A. V. Goldberg, É. Tardos, et R. E. Tarjan. Network flow algorithms. Technical report, DTIC Document, 1989. (page 72).
- V. D. R. Guide et L. N. Wassenhove. Closed-loop supply chains : An introduction to the feature issue (part 1). *Production and Operations Management*, 15(3) :345–350, 2006. (page 37).
- V. D. R. Guide, T. P. Harrison, et L. N. Van Wassenhove. The challenge of closed-loop supply chains. *Interfaces*, 33(6) :3–6, 2003. (page 37).
- G. Guisewite et P. Pardalos. Minimum concave-cost network flow problems : Applications, complexity, and algorithms. *Annals of Operations Research*, 25(1) :75–99, 1990. ISSN 0254-5330. doi : 10.1007/BF02283688. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF02283688>. (page 72).
- A. Gupta et C. D. Maranas. Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8) :1219–1227, 2003. (page 128).
- P. Hansen, N. Mladenović, et J. A. M. Pérez. Variable neighbourhood search : methods and applications. *Annals of Operations Research*, 175(1) :367–407, 2010. (page 97).
- F. Harris. How many parts to make at once. *The Magazine of Management*, pages 135–136, 1913. (page 47).
- I. Henriques et P. Sadorsky. The determinants of an environmentally responsive firm : An empirical approach. *Journal of environmental economics and management*, 30(3) :381–395, 1996. (page 35).

- J.-D. Hong et J. C. Hayya. On an (s, q) production policy for an integrated inventory model for a single product with linearly increasing demand. *Journal of the Operational Research Society*, 41(10) :931–941, 1990. (page 49).
- J. B. Houlihan. International supply chain management. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 15(1) :22–38, 1985. (page 26).
- G. Q. Huang, J. S. Lau, et K. Mak. The impacts of sharing production information on supply chain dynamics : a review of the literature. *International Journal of Production Research*, 41 (7) :1483–1517, 2003. (pages 23 et 24).
- S. Imbrosciano. *Flots et chemins contraints : applications aux réseaux de télécommunications*. PhD thesis, 2014. URL <http://www.theses.fr/2014AIXM4001>. Thèse de doctorat dirigée par Vaxès, Yann Informatique Aix-Marseille 2014. (page 71).
- P. A. Jensen et J. F. Bard. Inventory theory : S1 inventory models. *Operations research models and methods*, 2001. (page 49).
- T. C. Jones et D. W. Riley. Using inventory for competitive advantage through supply chain management. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 15 (5) :16–26, 1985. (page 26).
- R. M. Karp. Reducibility among combinatorial problems. In *Complexity of computer computations*, pages 85–103. Springer, 1972. (page 71).
- S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, et al. Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598) :671–680, 1983. (page 97).
- D. E. Knuth. Big omicron and big omega and big theta. *ACM Sigact News*, 8(2) :18–24, 1976. (page 71).
- S.-G. Koh, H. Hwang, K.-I. Sohn, et C.-S. Ko. An optimal ordering and recovery policy for reusable items. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1) :59–73, 2002. (page 57).
- L. Kroon et G. Vrijens. Returnable containers : an example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2) :56–68, 1995. (page 35).
- H. L. Lee. Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *California management review*, 44(3) :105–119, 2002. (page 29).
- H. L. Lee et C. Billington. Material management in decentralized supply chains. *Operations research*, 41(5) :835–847, 1993. (page 28).

- H. L. Lee, V. Padmanabhan, et S. Whang. Information distortion in a supply chain : the bullwhip effect. *Management science*, 50(12_supplement) :1875–1886, 2004. (page 31).
- D. Lemoine. *Generic models and resolution methods for tactical planning in mono-site and multi-site context*. Theses, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Dec. 2008. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00860292>. (pages 21 et 22).
- J. K. Lenstra et A. Kan. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11 (2) :221–227, 1981. (page 53).
- R. R. Lummus, R. J. Vokurka, et K. L. Alber. Strategic supply chain planning. *Production and Inventory Management Journal*, 39(3) :49, 1998. (page 33).
- M. C. Mabini, L. M. Pintelon, et L. F. Gelders. Eoq type formulations for controlling repairable inventories. *International Journal of Production Economics*, 28(1) :21–33, 1992. (page 57).
- S. Makridakis. Accuracy measures : theoretical and practical concerns. *International Journal of Forecasting*, 9(4) :527–529, 1993. (page 132).
- R. Mason-Jones et D. R. Towill. Shrinking the supply chain uncertainty circle. *IOM control*, 24(7) :17–22, 1998. (page 31).
- J. T. Mentzer, W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith, et Z. G. Zacharia. Defining supply chain management. *Journal of Business logistics*, 22(2) :1–25, 2001. (pages 22 et 25).
- Y. Monden. *Toyota production system*. Favor de rectificar., 1983. (page 123).
- S. Nahmiasj et H. Rivera. A deterministic model for a repairable item inventory system with a finite repair rate. *International Journal of Production Research*, 17(3) :215–221, 1979. (page 57).
- G. L. Nemhauser et L. A. Wolsey. Integer programming and combinatorial optimization. Wiley, Chichester. *GL Nemhauser, MWP Savelsbergh, GS Sigismondi (1992). Constraint Classification for Mixed Integer Programming Formulations. COAL Bulletin*, 20 :8–12, 1988. (page 82).
- R. K. Oliver et M. D. Webber. Supply-chain management : logistics catches up with strategy. *Outlook*, 5(1) :42–47, 1982. (page 24).
- C. H. Papadimitriou et K. Steiglitz. *Combinatorial optimization : algorithms and complexity*. Courier Corporation, 1982. (page 71).
- P. M. Pardalos. *Complexity in numerical optimization*. World Scientific, 1993. (page 72).

- S. Perifel. *Complexité algorithmique*. Ellipses, 2014. (page 71).
- V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, et A. L. Medaglia. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1) :1–11, 2013. (page 53).
- C. Prins. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 31(12) :1985–2002, 2004. (page 53).
- J. Puchinger et G. R. Raidl. Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization : A survey and classification. In *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*, pages 41–53. Springer, 2005. (page 82).
- J. Quariguasi Frota Neto, G. Walther, J. Bloemhof, J. Van Nunen, et T. Spengler. From closed-loop to sustainable supply chains : the weee case. *International Journal of Production Research*, 48(15) :4463–4481, 2010. (page 35).
- U. S. Rao. Properties of the periodic review (r, t) inventory control policy for stationary, stochastic demand. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(1) :37–53, 2003. (page 48).
- D. S. Rogers et R. Tibben-Lembke. An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2) :129–148, 2001. ISSN 2158-1592. doi : 10.1002/j.2158-1592.2001.tb00007.x. URL <http://dx.doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00007.x>. (page 35).
- D. F. Ross. *Competing through supply chain management*. Springer Science & Business Media, 1998. (page 24).
- T. Santoso, S. Ahmed, M. Goetschalckx, et A. Shapiro. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1) :96–115, 2005. (page 128).
- D. A. Schrady. A deterministic inventory model for repairable items. *Naval Research Logistics Quarterly*, 14(3) :391–398, 1967. (page 57).
- S. Seuring et M. Müller. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 16(15) :1699–1710, 2008. (page 25).
- D. Simchi-Levi. *Designing and managing the supply chain*. Mcgraw-Hill College, 2005. (page 25).

- G. C. Souza. Closed-loop supply chains : A critical review, and future research. *Decision Sciences*, 44(1) :7–38, 2013. (pages 11 et 38).
- H. Stadtler et C. Kilger. Supply chain management and advanced planning. *Berlin et al*, 2000. (pages 11, 25, 26 et 27).
- G. C. Stevens. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 19(8) :3–8, 1989. (pages 25, 27 et 33).
- J. Stock. *Development and Implementation of Reverse Logistics Programs*. Council of Logistics Management, 1992. URL <https://books.google.co.uk/books?id=m0KhQAAACAAJ>. (page 35).
- M. Thierry, M. Salomon, J. Van Nunen, et L. Van Wassenhove. Strategic issues in product recovery management. *California management review*, 37(2) :114–135, 1995. (pages 11, 35 et 36).
- R. J. Trent et R. M. Monczka. Purchasing and supply management : trends and changes throughout the 1990s. *International Journal of Purchasing and Materials Management*, 34(3) : 2–11, 1998. (page 24).
- S. Tzu. *The Art of War*. Dover Military History, Weapons, Armor Series. Dover Publications, 400 BCE. ISBN 9780486425573. URL <https://books.google.fr/books?id=UTGnopblxt8C>. (page 20).
- C. A. Ullrich. *Issues in Supply Chain Scheduling and Contracting*. Springer Science & Business Media, 2013. (page 27).
- J. G. Van der Vorst et A. J. Beulens. Identifying sources of uncertainty to generate supply chain redesign strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(6) :409–430, 2002. (page 31).
- J. P. Vielma. Mixed integer linear programming formulation techniques. *SIAM Review*, 57(1) : 3–57, 2015. (page 82).
- M. Waller, M. E. Johnson, et T. Davis. Vendor-managed inventory in the retail supply chain. *Journal of business logistics*, 20 :183–204, 1999. (page 29).
- D. Waters. *Inventory control and management*. John Wiley & Sons, 2008. (page 30).
- T. Wensing. *Periodic review inventory systems*, volume 651. Springer, 2011. (pages 50 et 51).
- Z. Yu, H. Yan, et T. Edwin Cheng. Benefits of information sharing with supply chain partnerships. *Industrial management & Data systems*, 101(3) :114–121, 2001. (pages 11 et 28).

L. J. Zeballos, C. A. Méndez, A. P. Barbosa-Povoa, et A. Q. Novais. Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 66 :151–164, 2014. (page [58](#)).

Thèse de Doctorat

Pierre DESPORT

Planification tactique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée

Modélisation, résolution, évaluation.

Tactical Planning Of Closed-Loop Supply Chains

Modeling, Resolution, Evaluation

Résumé

La gestion de chaîne d'approvisionnement est un élément essentiel à la performance des entreprises et fait l'objet d'une attention particulière depuis plusieurs décennies. Dans le domaine des télécommunications, cette gestion inclut généralement des activités de réparation et prend alors place sur une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée. Dans ce contexte, la gestion de la chaîne d'approvisionnement vise à la planification optimale des mouvements de pièces saines et défectueuses basée sur une prévision des défaillances futures et fait face à différents objectifs conflictuels (rupture de stock, stockage, réparation, transfert). Le travail présenté dans cette thèse s'intéresse à ce problème d'optimisation et s'appuie sur un cas réel. Spécifiquement nous proposons un système d'aide à la planification tactique. Ce système est centré sur une modélisation générique du problème d'optimisation applicable à une grande variété de chaînes d'approvisionnement. Nous présentons particulièrement une approche exacte et une métaheuristique pour résoudre ce problème et évaluons ces approches sur une variété d'instances de différentes tailles avec plusieurs niveaux et distributions du stock initial dans la chaîne d'approvisionnement. Nous étudions également la possibilité de mener des politiques de gestion particulières (e.g., juste-à-temps, réparations minimales) en pondérant les différents objectifs étudiés. Nous nous intéressons également à l'application de plans successifs produits par le système et, particulièrement, nous étudions la capacité du système à faire face aux incertitudes pouvant apparaître dans les prévisions.

Mots clés

Chaîne d'approvisionnement, Optimisation combinatoire, Planification tactique, Aide à la décision.

Abstract

Supply chains are ubiquitous across industries and a considerable effort has been invested in supply chain management techniques over the last decades. In Telecommunications service industries, it often involves repair operations and consequently takes place in a closed-loop supply chain. In this context, supply chain management is concerned with optimally planning movements of faulty parts and spare parts based on a demand forecast and in the face of conflicting objectives (stock out, storage, repair, transfer). This thesis describes this optimisation problem and based on a case study. Specifically, we consider a tactical planning decision support system. This system depends on a generic modeling of the problem that can be applied on a wide range of supply chains. We present an exact method and a metaheuristic to solve this problem and evaluate our approaches against a variety of instances of different sizes. We also study the ability to emulate specific management policies (e.g., just-in-time replenishment, minimal repair) by weighting the objectives. Finally, we investigate how to apply successive plans generated by the system and study the capability to face forecast uncertainties.

Key Words

Supply chain, Combinatorial optimisation, Tactical planning, Decision support.