



Évaluation des risques et de la robustesse de la planification tactique des acteurs d'une chaîne logistique basée sur une plateforme cloud

Sanaa Tiss

► To cite this version:

Sanaa Tiss. Évaluation des risques et de la robustesse de la planification tactique des acteurs d'une chaîne logistique basée sur une plateforme cloud. Gestion et management. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2022. Français. NNT : 2022EMAC0001 . tel-03653331

HAL Id: tel-03653331

<https://theses.hal.science/tel-03653331>

Submitted on 27 Apr 2022

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

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

délivré par

IMT – École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux

présentée et soutenue par

Sanaa TISS

le 2 février 2022

Titre :

**Évaluation des risques et de la robustesse de la
planification tactique des acteurs d'une chaîne
logistique basée sur une plateforme cloud**

École doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Génie Industriel

Unités de recherche :

Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Directeur et Directrice de thèse :

Jacques LAMOTHE, Professeur, IMT Mines Albi
Caroline THIERRY, Professeure, Université Jean Jaurès, IRIT

Autres membres du jury :

Khaled HADJ-HAMOU, Professeur, INSA Lyon, Rapporteur
Gülgün ALPAN, Professeure, INP Grenoble, Rapporteur
Laurent GENESTE, Professeur, ENIT de Tarbes, Président
Séverine DURIEUX, Maître de conférences, Sigma Clermont, Examinatrice
Christophe ROUSSE, Directeur Opérations Data & Analytics, Pierre Fabre Dermo-Cosmétique, Invité

RESUME

La gestion d'une chaîne logistique multi-acteurs repose sur un pilier de coordination, essentiel pour synchroniser les activités de tous les acteurs et assurer un bon niveau de taux de service du client final et des performances attendues.

La planification tactique de la chaîne logistique est un niveau de décision particulièrement important qui vise à assurer la synchronisation des flux physiques et d'informations dans la chaîne. Les différents acteurs s'appuient sur des systèmes d'information de planification pour améliorer leurs performances de planification interne. Ils s'appuient sur la planification à horizon glissant et les outils de partage d'informations pour réviser et aligner périodiquement leurs plans afin de s'adapter face aux incertitudes. Cependant, sur l'horizon glissant, l'instabilité due aux révisions périodiques des plans et les effets des incertitudes sont amplifiés le long de la chaîne (effet bullwhip) et accroissent la nervosité du système. Les systèmes d'aide à la décision déterministes restent toutefois restreints pour la gestion de ces incertitudes. Ainsi, le décideur est souvent confronté à un dilemme stabilité-réactivité dans sa prise de décision face aux incertitudes.

Dans la littérature, différentes approches sont proposées pour la gestion des incertitudes dans la planification tactique. Cependant, l'écart entre la recherche et la pratique industrielle dans ce domaine reste très important en absence d'analyse de l'applicabilité des modèles théoriques proposés, que ce soit au niveau de la prise en compte de la complexité de l'environnement industriel ou du nombre de sources d'incertitude considérées ou encore de l'implication du décideur dans le processus de prise de décision. En vue de surmonter ces limitations et tout en considérant que les décideurs échangent toujours des plans déterministes générés avec les outils de planification existants, cette thèse décrit une proposition de système d'aide à la replanification pour un planificateur au niveau de la distribution centrale d'une chaîne logistique.

Ainsi, cette thèse traite des trois aspects suivants : 1/ Intégrer la connaissance d'un expert sur la variabilité des plans cumulés des autres acteurs. 2/ Intégrer cette connaissance pour la modélisation de l'incertitude et l'évaluation des risques et de la robustesse des plans déterministes d'un décideur. 3/ Étudier l'applicabilité de l'approche proposée dans un environnement industriel dynamique réel en considérant l'indépendance du décideur dans la prise de décision.

Un apport méthodologique de cette thèse réside dans l'adaptation d'une méthodologie de gestion des risques depuis leur identification et la modélisation des incertitudes jusqu'à l'évaluation de leur criticité et la mitigation de leur impact. Un apport théorique repose sur la proposition d'une approche quantitative, basée sur les ensembles flous et la théorie des possibilités, pour l'évaluation de la robustesse des plans d'un décideur, au regard des risques liés au respect des contraintes induites par les décisions de son fournisseur en amont (approvisionnements) et de ses clients en aval (demande). Un apport pratique concerne la mise en œuvre d'une plateforme cloud interactive d'aide à la décision intégrant les principales fonctionnalités du système d'aide à la décision basé sur l'approche proposée : base de données dynamique, interfaces interactives, différents niveaux d'agrégation des évaluations, collaboration et configuration.

Enfin, un 'Serious Game' est élaboré à partir de l'analyse des processus d'un cas industriel PFDC (Pierre Fabre Dermo-Cosmétique) et utilisé comme preuve de concept dans un contexte dynamique.

Mots clés : *Chaîne Logistique, Incertitude, Planification Tactique, Gestion de Risque, Robustesse, Ensembles Flous, Théorie de Possibilité, Système d'Aide à la Décision.*

ABSTRACT

The management of a multi-actor supply chain relies on a coordination pillar, which is essential to synchronize the activities of all actors and ensure a good level of end customer service rate and expected performance.

Tactical planning of the supply chain is a particularly important decision-making level that aims to ensure the synchronization of physical and information flows in the supply chain.

The different actors rely on planning information systems to improve their internal planning performance. They rely on rolling planning and information sharing tools to periodically revise and align their plans to adapt to uncertainties. However, over the rolling horizon, the instability due to periodic plan revisions and the effects of uncertainties are amplified along the supply chain (bullwhip effect) and increase the nervousness of the system. However, deterministic decision support systems remain limited in their ability to manage these uncertainties. Thus, the decision-maker is often exposed to a stability-reactivity dilemma in his decision making regarding the uncertainties.

In the literature, different approaches are proposed for the management of uncertainties in tactical planning. However, the gap between research and industrial practices in this field remains very important in the absence of analysis of the applicability of the proposed theoretical models, whether in terms of considering the complexity of the industrial environment or the number of sources of uncertainty considered or the involvement of the decision-maker in the decision-making process. In order to overcome these limitations while considering that decision makers always exchange deterministic plans generated with existing planning tools, this thesis describes a proposal for a replanning support system for a planner at the central distribution level of a supply chain.

Thus, this thesis deals with the following three aspects : 1/ Integrate the knowledge of an expert on the variability of the cumulative plans of other actors. 2/ Integrate this knowledge for uncertainty modeling and risk assessment and robustness of a decision maker's deterministic plans. 3/ Study the applicability of the proposed approach in a real dynamic industrial environment by considering the independence of the decision maker in the decision making.

A methodological contribution of this thesis lies in the adaptation of a risk management methodology from their identification and modeling of uncertainties to the evaluation of their criticality and the mitigation of their impact. A theoretical contribution is based on the proposal of a quantitative approach, based on fuzzy sets and possibility theory, for the evaluation of the robustness of a decision-maker's plans, regarding the risks linked to the respect of the constraints induced by the decisions of his upstream supplier (supplies) and his downstream customers (demand). A practical contribution concerns the implementation of an interactive cloud platform for decision support integrating the main functionalities of the decision support system based on the proposed approach: dynamic database, interactive interfaces, different levels of evaluation aggregation, collaboration and configuration.

Finally, a 'Serious Game' is elaborated from the analysis of the processes of an industrial case PFDC (Pierre Fabre Dermo-Cosmetics) and used as proof of concept in a dynamic context.

Keywords: *Supply Chain, Uncertainty, Tactical Planning, Risk Management, Robustness, Fuzzy Sets, Possibility Theory, Decision Support System.*

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet CAASC (Cloud Adaptation for Agile SC) financé par l'ANR, projet-ANR-18-CE10-0012. Dans ce projet, j'ai fait partie d'une équipe pluridisciplinaire de différentes entités (IRIT/ADRIA, Linagora, Pierre Fabre Dermo-Cosmétique, CGI, ARMINES) que je remercie un par un de m'avoir accueilli dans l'équipe et de leur collaboration.

Cette aventure de thèse de 3 ans a été menée dans des conditions très particulières (COVID19, confinement, télétravail, conférences à distance, événements de l'année 2020...). Je me permets donc de dire que je fais partie d'une promo de résistants et je tiens donc à féliciter tous les lauréats de cette promo. Si j'ai pu traverser cette période et mener à bien cette aventure avec sérénité, c'est grâce aux différentes personnes qui m'ont soutenu et que je tiens à remercier ici.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes directeurs de thèse pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me permettant de vivre cette aventure au sein du Centre Génie Industriel à l'IMT Mines et de l'équipe projet.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Jacques LAMOTHE, Professeur à IMT Mines d'Albi, pour m'avoir fait partager ses brillantes intuitions et m'avoir apporté soutien, idées et liberté tout au long de ces années. Mes remerciements vont également à toute sa famille pour leur accueil chaleureux qui m'a permis de démarrer ma thèse dans de bonnes conditions.

Mes sincères remerciements vont également à ma codirectrice, Madame Caroline THIERRY, Professeur à l'Université Jean Jaurès de Toulouse pour son soutien crucial, sa confiance et ses conseils judicieux qui m'ont permis de développer mes compétences en matière de recherche scientifique. J'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et d'accompagnement et à sa disponibilité tout au long de ma thèse.

J'adresse également mes chaleureux remerciements au Professeur Khalid HADJ-HAMOU de l'INSA Lyon, ainsi qu'à la Professeure Gülgün ALPAN de l'INP Grenoble qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à tous les autres membres du jury, dont M. Laurent GENESTE, professeur à ENIT de Tarbes et Mme. Séverine DURIEUX, Maître de conférences à Sigma Clermont qui m'ont fait l'honneur d'examiner et de juger les travaux de cette thèse, également pour leurs encouragements et leurs commentaires avisés.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Christophe ROUSSE, Directeur des Opérations Data & Analytics de Pierre Fabre Dermo-Cosmétique pour sa disponibilité, son soutien et sa collaboration au sein de l'équipe du projet CAASC et également pour avoir fait partie de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier Prof. Daouda KAMISSOKO, pour son soutien et ses précieux conseils. Grâce à lui, j'ai pu découvrir et m'ouvrir au domaine de la recherche et cela a fait de mon hésitation une passion.

Je remercie toute l'équipe du projet CAASC, en particulier Monsieur Julien LESBEGURIES, ingénieur de recherche à IMT Mines Albi pour sa collaboration et sa contribution significative à la concrétisation et au prototypage des apports de ce travail. J'ai particulièrement apprécié la qualité de sa collaboration où il a su faire preuve d'une grande capacité d'adaptation et d'un esprit d'équipe et de partage.

Je tiens également à remercier M.Romain Guillaume, maître de conférences à l'IRIT de Toulouse pour sa disponibilité et les échanges constructifs que nous avons pu avoir, également pour sa collaboration et son partage d'expertise au sein du projet.

Mes remerciements vont également à mes amis, en particulier Khalid pour son aide, sa bonne humeur et son soutien durant les périodes les plus critiques de cette aventure, ainsi qu'à Nafe, Mustapha et Ibrahim pour leur soutien et leur bonne humeur qui ont rendu ces années pleines de souvenirs. Je remercie également tous mes collègues au CGI, professeurs, doctorants et personnel administratif pour leur sens du partage, de l'écoute et leur sympathie qui m'ont permis de bien mener cette expérience.

Je remercie Madame Marie-Christine PLANTIÉ, chargée de la formation générale et de l'accompagnement professionnel des doctorants à IMT Mines Albi, pour son soutien pendant et après la thèse, mais aussi pour son écoute et sa disponibilité qui m'ont permis de mieux cerner mon orientation professionnelle.

Mes plus profonds remerciements vont à mes chers parents. **Abdellah TISS**, mon père, mon supporter et mon grand fan. **Saida BACHAR**, ma mère, ma lionne et mon idole. C'est grâce à eux et à leur soutien, leur appui, que j'ai pu atteindre ce nouvel accomplissement dans des conditions aussi particulières. Ce petit paragraphe ne saurait suffire à exprimer ma gratitude pour tout ce qu'ils ont fait et font et pour tous leurs sacrifices. Je leur dédie donc ce travail ainsi qu'à mes sœurs et à toute ma famille.

LISTE DES ABREVIATIONS

APS	Advanced Planning System
APICS	American Production and Inventory Control Society
CDC	Centre de Distribution Central
CDL	Centre de Distribution Local
DRP	Distribution Resource Planning
ERP	Enterprise Resource Planning
GSC	Global Supply Chain
MP	Master Planning
MTS	Make To Stock
MRP	Material Requirement Planning
PFDC	Pierre Fabre Dermo-Cosmétique
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SCRM	Supply Chain Risk Management
SG	Serious Game
SI	Système d'Information

TABLE DES MATIERES

Résumé	ii
Abstract	iv
Remerciements	vi
Liste des abréviations.....	x
Table des matières.....	xii
Introduction générale.....	2
Chapitre I. Positionnement du contexte de recherche	8
1. Introduction : Contexte industriel.....	9
2. Supply Chain Management (SCM)	10
2.1. Le concept de la Supply Chain (SC) et ses structures	10
2.2. Du Management au Supply Chain Management au Global Supply Chain Management.....	12
2.2.1. L'évolution de l'industrie et des technologies de l'information a marqué la phase de transition vers un Supply Chain Management	12
2.2.2. Aujourd'hui le Supply Chain Management est une fonction critique de l'entreprise	13
2.2.3. Mondialisation, Opportunités, expansion à l'international, Global Supply Chain management	15
3. Planification de la chaîne logistique.....	16
3.1. Niveaux de planification.....	16
3.2. Stratégies de gestion des flux et problèmes de planification.....	18
3.3. Processus de planification tactique Make-To-Stock.....	20
3.3.1. Planification et contrôle de production (PCP) dans APICS	20
3.3.2. Master Planning (MP)	22
4. Collaboration et coordination au sein d'une chaîne logistique.....	23
4.1. Approches de prise de décision dans une chaîne logistique	23
4.1.1. Approche centralisée versus approche décentralisée	23
4.1.2. Approche réactive versus approche proactive	24
4.2. Type de collaborations.....	25

4.3.	Planification collaborative basé sur un échange de plans et de la négociation au sein d'une chaîne logistique décentralisée multi acteurs	27
4.4.	Approche dynamique de coordination basée sur une planification en horizon glissant.....	30
5.	Gestion des incertitudes et des risques en supply chain	32
5.1.	Concepts connexes	32
5.2.	Effets d'incertitudes et de la dynamique de la planification dans la SC.....	34
5.2.1.	Effet bullwhip dans une SC	34
5.2.2.	Nervosité en planification dynamique à horizon glissant.....	35
5.2.3.	Problématique industrielle : dilemme (Réactivité VS stabilité) en planification collaborative à horizon glissant, sous incertitudes dans les plans transmis	37
5.3.	Gestion des risques dans la SC (SCRM).....	38
5.4.	Systèmes d'information de planification et d'aide à la décision au sein d'une SC	39
5.4.1.	Aperçu des systèmes d'information et des technologies existants pour la planification tactique de la SC	39
5.4.2.	L'humain est au centre du processus de décision ... limites des systèmes d'aide à la planification actuels face aux incertitudes	42
6.	Conclusion : positionnement du contexte et de la problématique industrielle	45
Chapitre II. Aide à la planification tactique de la SC sous incertitude		48
1.	Introduction.....	49
2.	Classification des travaux de planification tactique de la SC sous incertitude.....	49
2.1.	Sources d'incertitude dans la planification de la SC	50
2.1.1.	Analyse des revues de la littérature	50
2.1.2.	Positionnement	51
2.2.	Approches de modélisation des incertitudes.....	52
2.2.1.	Représentations des connaissances imparfaites	52
2.2.2.	Choix d'utilisation des ensemble flous et de la théorie de possibilité	54
2.2.3.	Positionnement : première question de recherche	55
2.3.	Approches de gestion de l'incertitude.....	56
2.3.1.	Application de la démarche de gestion des risques	56
2.3.2.	Réduction d'occurrence des risques à la source	57

2.3.3.	Stratégies de maîtrise des impacts des risques	57
2.3.4.	Approches quantitatives pour supporter la maitrise des risques ...	58
2.3.5.	Positionnement : Deuxième et troisième questions de recherche .	62
2.4.	Caractéristiques du problème étudié.....	62
2.4.1.	Analyses des revues de littérature	62
2.4.2.	Positionnement : quatrième question de recherche	63
3.	Aide à la planification tactique sous incertitude.....	64
3.1.	Outils d'aide à la planification.....	64
3.2.	Aide à la planification en horizon glissant	66
3.3.	Conclusion	68
4.	Conclusion	68
Chapitre III. Cadre théorique et méthodologie de recherche.....		72
1.	Introduction	73
2.	Questions de recherche et contributions	73
3.	Concepts fondamentaux	77
3.1.	Hypothèses de performances des plans de livraison /approvisionnements : faisabilité, satisfaction, fiabilité, stabilité.....	77
3.2.	Hypothèses de planification sous incertitudes : Incertitude, Risque, robustesse	78
4.	Notre approche de gestion des risques pour l'aide à la replanification	79
4.1.	Processus de gestion des risques.....	79
4.2.	Périmètre d'application, contexte et critères	80
4.3.	Identification des risques	81
4.4.	Analyse des risques.....	82
4.5.	Évaluation des risques	84
4.6.	Traitement des risques	86
5.	Aide à la planification.....	87
5.1.	Processus d'aide à la décision.....	88
5.2.	Processus de négociation	89
6.	Conclusion	91
Chapitre IV : Analyse des risques pour l'aide à la replanification		94
1.	Introduction	95

2.	Background : ensembles flous et mesures de la théorie de possibilité	96
3.	Modélisation des incertitudes dans les plans cumulés transmis à un décideur	96
3.1.	Modélisation basée sur un dire expert.....	96
3.2.	Illustration I.1.....	102
4.	Approche possibiliste d'analyse des risques : Théorie de possibilité	104
4.1.	Mesure des risques	104
4.2.	Illustration I.2.....	104
4.3.	Agrégation des indicateurs d'évaluation de criticité des plans par produit 107	
4.4.	Illustration I.3.....	108
5.	Approche d'analyse des risques basée sur des intervalles comme cas particulier des ensembles flous	111
5.1.	Qualification des risques	111
5.2.	Extension des indicateurs basés sur des distances aux bornes des intervalles 114	
5.3.	Illustration I.4.....	116
6.	Conclusion	119
Chapitre V. Cas d'application.....		122
1.	Introduction : démarche expérimentale	123
2.	Cas industriel : Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC)	124
2.1.	Chaîne logistique PFDC	124
2.2.	Processus de planification tactique étudié	125
2.3.	Données de planification PFDC.....	129
3.	Plateforme d'aide à la replanification sous incertitudes	130
3.1.	Cadre conceptuel du système d'aide à la décision.....	130
3.2.	Services de la plateforme d'aide à la décision	131
3.3.	Structure des données	133
3.4.	Interface d'aide à la décision : expérience utilisateur	134
3.5.	Plateforme de négociation.....	139
4.	Un Serious Game comme preuve de concept (PoC).....	139
4.1.	Utilisations des 'Serious Game'	139
4.2.	Dimensionnement	140
4.3.	Conception du 'Serious Game'	141

4.3.1.	Déroulement du ‘Serious Game’ en horizon glissant.....	141
4.3.2.	Émulateur ERP : Modèle de planification.....	143
4.4.	Expérimentation d’un point de vue de planificateur au niveau du Centre de Distribution Central.....	145
4.4.1.	Scénario	145
4.4.2.	Simulateur de stratégie de réduction de gravité du risque de replanification sous incertitudes	148
4.4.3.	Analyse des résultats	151
5.	Conclusion.....	156
Conclusion générale et perspectives		160
Références		166
Liste des figures		182
Liste des tables.....		186
Évaluation des risques et de la robustesse de la planification tactique des acteurs d’une chaîne logistique basée sur une plateforme cloud		188

INTRODUCTION GENERALE

“C’est l’incertitude qui nous charme. Tout devient merveilleux dans la brume”

Oscar Wilde

... Une entité dans l'ensemble ...

En ingénierie industrielle et productique, j'ai découvert quatre axiomes fondamentaux pour la gestion des opérations de production et l'amélioration continue :

- Gérer le flux, c'est le modéliser, l'analyser, le synchroniser et l'optimiser.
- Éliminer les 3M (MUDA, MURI, MURA). Autrement dit, toute activité sans valeur ajoutée du point de vue du client final est une source de gaspillage à éliminer ou à réduire au maximum.
- Résoudre un problème, c'est l'analyser afin d'en trouver la cause racine et de l'éliminer.
- Assurer l'implication des personnes et de bonnes conditions de travail est essentiel pour une meilleure productivité.

Ces différentes actions visent à rendre les ressources et les processus aussi efficaces et flexibles que possible, dans le but d'atteindre les performances souhaitées en termes de productivité et de respect des plans de production prévisionnels. Dans le cadre de cette thèse, j'ai eu l'occasion de découvrir et de réaliser l'ampleur et la portée de l'effet de ces actions qui dépasse le périmètre de l'atelier ou même de l'usine dans laquelle elles sont appliquées.

L'usine est une entité « au sein d'un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnements en matières premières ou en articles semi-finis, le transport et la transformation de ces matières en composants, en articles semi-finis puis en articles finis, et enfin le stockage et la distribution des articles finis vers les clients » (Lee et Billington 1993), de manière à satisfaire un ensemble des clients finaux au bon moment, au bon endroit, avec le bon produit et à un bon prix. Cet ensemble constitue la chaîne logistique. Cette chaîne s'étend du fournisseur du fournisseur aux clients finaux via un réseau d'approvisionnement et de distribution local ou international, selon le type de la chaîne. Chaque entité du réseau cherche à optimiser ses opérations internes, à se synchroniser avec le reste de la chaîne et à développer des leviers de flexibilité vis-à-vis de ses clients dans la chaîne aval et de ses fournisseurs dans la chaîne amont.

Cependant, dans les marchés très dynamiques (voire volatiles) et compétitifs d'aujourd'hui, cette chaîne logistique doit faire face à différentes sources d'incertitude. Ces incertitudes peuvent se propager et s'amplifier le long de la chaîne.

... Les entités réagissent face aux incertitudes, mais parfois au détriment des performances globales...

La planification à horizon glissant est une pratique largement utilisée pour assurer la synchronisation des activités dans la chaîne logistique et faire face aux incertitudes. Au sein d'une chaîne logistique, un processus de partage des plans tactiques entre les acteurs de la chaîne est instauré pour leurs révisions périodiques. Ces décisions de replanification sont de plus en plus

difficiles à prendre au niveau d'une entité car elles risquent d'avoir un impact sur les autres entités de la chaîne. Par ailleurs, elles augmentent la nervosité du système de planification en raison de la configuration répétitive des quantités planifiées pour une même période. De plus, l'instabilité des variables de décision de chaque entité croît le long de la chaîne, rendant les décisions de replanification des autres acteurs de plus en plus complexes et donnant lieu à des phénomènes tels que l'effet *Bullwhip* qui affectent la performance globale de la chaîne.

... Complexité de replanification des chaînes logistiques dermo-cosmétiques...

Cette thèse aborde ce problème dans une chaîne logistique globale de distribution et plus particulièrement sur celle de l'entreprise Pierre Fabre Dermo-Cosmétiques, ayant servi de cas d'application. Dans cette chaîne logistique, les décideurs révisent leurs plans selon un processus de planification collaboratif basé sur un échange périodique de plans via une plateforme cloud. Les chaînes logistiques dermo-cosmétiques sont caractérisées par une très grande complexité. Cette complexité est due au grand nombre de variants d'un même produit (Crème, Baume, Gel...) et à leurs différents modes de gestion et à la volatilité des marchés sur lesquels ils aboutissent. Ainsi, la complexité des activités de replanification croît rapidement dans un contexte de multi-acteurs indépendants déportés au niveau international notamment au niveau de la distribution centrale de cette chaîne.

... Complexité du processus de replanification dans un centre de distribution centrale...

Au niveau du centre de distribution central, les besoins de la chaîne en aval sont agrégés et les décisions relatives aux plans de distribution/livraison deviennent très lentes et nécessitent un grand nombre de planificateurs rien que pour gérer les replanifications et s'adapter aux fluctuations des besoins des clients et des approvisionnements des fournisseurs. Ainsi, le cadre d'étude choisi concerne le point de vue d'un décideur de la distribution pour aborder le problème de la planification à horizon glissant sous incertitudes.

... Imaginons être un planificateur de la distribution centrale...

Imaginez que vous êtes le planificateur, vous avez 30 clients à gérer. Ces clients sont aussi des partenaires qui distribuent sur différents marchés locaux, situés dans différents pays du monde. Chacun de ces clients s'approvisionne auprès de votre centre de distribution de manière différente (délai de livraison, qualité des prévisions, caractère de son marché local, technologies...). Vos clients se partagent les stocks de 4500 références de produits. Ces produits ont des modes de gestion différents en fonction de leurs modes de gestion de stock, de leur approvisionnement en usine et de leur protocole de contrôle qualité avant d'être disponibles dans votre stock, etc.

Au cours d'une semaine donnée, vous recevez des nouvelles demandes et des demandes révisées de tous vos clients pour la plupart des produits. Il apparaît que votre client au Chili a sous-estimé ses prévisions de ventes pour un produit donné et risque la rupture de stock. Il a donc doublé ses besoins d'approvisionnement. En même temps, d'autres clients modifient également leurs plans et votre fournisseur passe également à un plan plus contraignant. Comment procédez-vous ? ... Attendez !!! en tant que planificateur ayant une expérience significative avec ces clients, vous estimez que ce client au Chili va très probablement modifier ses besoins pour cette semaine et dans les semaines suivantes également car il ne commence à maîtriser ses prévisions qu'à l'approche de

la date d'exécution. Et la plupart du temps, il finit par ajuster sa demande à la baisse. Alors qu'au même moment, votre client en Australie exprime une demande plus grande mais vous savez que ce client modifie rarement ses besoins par la suite. Avec les systèmes d'information actuels, vous n'êtes pas en mesure d'intégrer ces informations, ni d'évaluer votre plan face à ces incertitudes. Ce qui est sûr à cette date, c'est que si vous priorisez la stabilité de votre plan cette semaine pour le client au Chili, vous aurez un faible niveau de performance de votre promesse, en l'absence de prise en compte des risques. Sur les 4500 références de produits, vous aurez jusqu'à 30 clients partageant le stock d'un autre produit. Comment pouvez-vous procéder à ce moment-là ? Vous avez certainement besoin de temps pour réfléchir s'il faut modifier votre plan pour tenir votre promesse de livraison provisoire de la semaine ou augmenter la nervosité de votre système et de la chaîne.

Imaginez maintenant que vous ayez à votre disposition un tableau de bord qui vous permette de détecter quel(s) produit(s) est/sont le(s) plus critique(s) parmi les 4500 références. Quel est le plan que vous devez sûrement prioriser lors de la révision et le plan que vous laissez inchangé compte tenu de l'incertitudes dans les plans de vos acteurs en amont et en aval et selon leurs comportements typiques sur l'horizon glissant ? Pour ce plan, quelle(s) période(s) de l'horizon la plus risquée(s) qui mérite(nt) votre attention pour la replanification ? Lors de l'allocation des quantités de votre plan de livraison, quel client doit être satisfait en premier compte tenu de ses écarts potentiels à l'horizon glissant ?

... Comment peut-on diminuer l'impact des incertitudes sans les prendre en compte dans la décision !!!!...

Il est donc essentiel d'intégrer les incertitudes et de gérer les risques dans les processus de planification de la chaîne d'approvisionnement afin d'augmenter l'agilité et la robustesse de la chaîne et de diminuer sa vulnérabilité.

Cependant, le domaine de la gestion des risques dans les processus de planification n'est pas encore parvenu à sa maturité. De plus, malgré la tendance dans la recherche scientifique dans ce domaine de la planification sous incertitude, l'écart entre la littérature scientifique et la pratique industrielle reste important.

... Motivations et contributions...

Les travaux de cette thèse sont principalement motivés par la complexité des décisions de planification à horizon glissant, dans le contexte des chaînes de distribution globales, multi-acteurs et décentralisées. Nous visons à intégrer les incertitudes dans les plans transmis par les autres acteurs de la chaîne logistique en capitalisant sur les connaissances des experts en planification. Nous proposons ensuite une approche détaillée pour la prise en compte de ces incertitudes dans le cadre d'un processus de gestion des risques associés aux décisions de planification sous incertitude dans la demande et des approvisionnements. Nous fournissons ensuite un modèle d'analyse et d'évaluation des risques basé sur les mesures de la théorie des possibilités. Nous mettons en place une plateforme d'aide à la décision afin de fournir une expérience utilisateur pour la replanification. Enfin, nous mettons notre approche d'aide à la replanification en situation dans un contexte dynamique à travers une approche " Serious Game " afin d'analyser ces apports mais aussi d'étudier les interactions de l'outil avec les systèmes d'information existants.

Notre hypothèse est que les acteurs de la chaîne échangeront toujours des plans déterministes issus des systèmes d'information et que l'outil est un module externe interagissant avec les données dynamiques des systèmes d'information pour aider un décideur à évaluer les risques et la robustesse de ses plans.

...Cette thèse s'inscrit dans un projet ANR, dans le cadre d'un partenariat académique-industriel ...

Les travaux de cette thèse sont inscrits dans le cadre du projet ANR CAASC (Cloud Adaptation for Agile Supply Chain) et plus précisément à son deuxième axe scientifique qui porte sur l'évaluation des risques et de la robustesse des plans sous incertitudes. Ce projet intègre un partenariat avec plusieurs acteurs multidisciplinaires (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, le centre de recherche en Génie Industriel à IMT Mines Albi, Linagora de Toulouse, ARMINES). Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC) est le partenaire industriel fournisseur de la problématique industrielle et des données de planification collectées dans le cadre du projet.

...Plan du manuscrit ...

Ce manuscrit est composé de cinq chapitres, dont deux chapitres de positionnement du contexte et d'état de l'art, et trois chapitres de contributions : méthodologique, théorique et applicatif.

Le chapitre 1, détaille le domaine général du Supply Chain Management dans lequel s'inscrit le travail de cette thèse. Nous y décrivons également les différents éléments contextuels et théoriques qui seront utilisés tout au long de cette thèse dans les chapitres suivants. Dans un troisième temps, nous abordons plus spécifiquement la problématique de la planification de la chaîne logistique et l'analyse des limites des systèmes d'information de la planification déterministe. Ce chapitre se termine par le positionnement de notre contexte d'étude de cette thèse et de la problématique industrielle abordée.

Le chapitre 2, traite de l'état de l'art de notre problématique de recherche introduite à partir de la problématique industrielle évoquée dans le chapitre précédent. Dans ce chapitre, nous détaillons la question de comment la planification sous incertitude a été abordée dans la littérature et nous nous focalisons plus particulièrement l'aide à la planification sous incertitudes. De cette analyse ressortent quatre questions de recherche que nous abordons dans cette thèse (voir figure 1).

Le chapitre 3, détaille la méthodologie de gestion des risques que nous proposons pour évaluer les risques liés aux promesses de livraison en cas d'incertitude sur la demande et les approvisionnements. Dans ce chapitre, nous détaillons également les hypothèses de cette thèse, le cadre théorique et les différentes méthodes et approches proposées pour répondre aux différentes questions de recherche abordées.

Le chapitre 4, comprend nos modèles théoriques pour la modélisation des incertitudes dans les plans tactiques cumulés basés sur la connaissance d'expert. Nous intégrons ensuite ces connaissances pour une aide à la replanification basée sur l'analyse et l'évaluation des risques des plans reposant sur la théorie des possibilités. Une approche basée sur des intervalles est présentée comme un cas particulier des ensembles flous.

Le chapitre 5 détaille l'application pratique qui nous permet de tester l'outil dans un environnement dynamique sous incertitude avec des données de planification à horizon glissant. Une preuve de

concept pour décrire une expérience utilisateur avec l'outil proposé est réalisée sous la forme d'un Serious Game.

Pour conclure, un bilan est présenté, ainsi qu'un ensemble de perspectives de recherches allant du court terme, dans le cadre de la poursuite du projet CAASC, à des questions plus générales sur la planification sous incertitude au sein des chaînes logistiques.

...La 'BIG PICTURE' de cette thèse...

La figure 1 est un aperçu global du travail et structuration de cette thèse qui vise à faciliter la lecture du manuscrit.

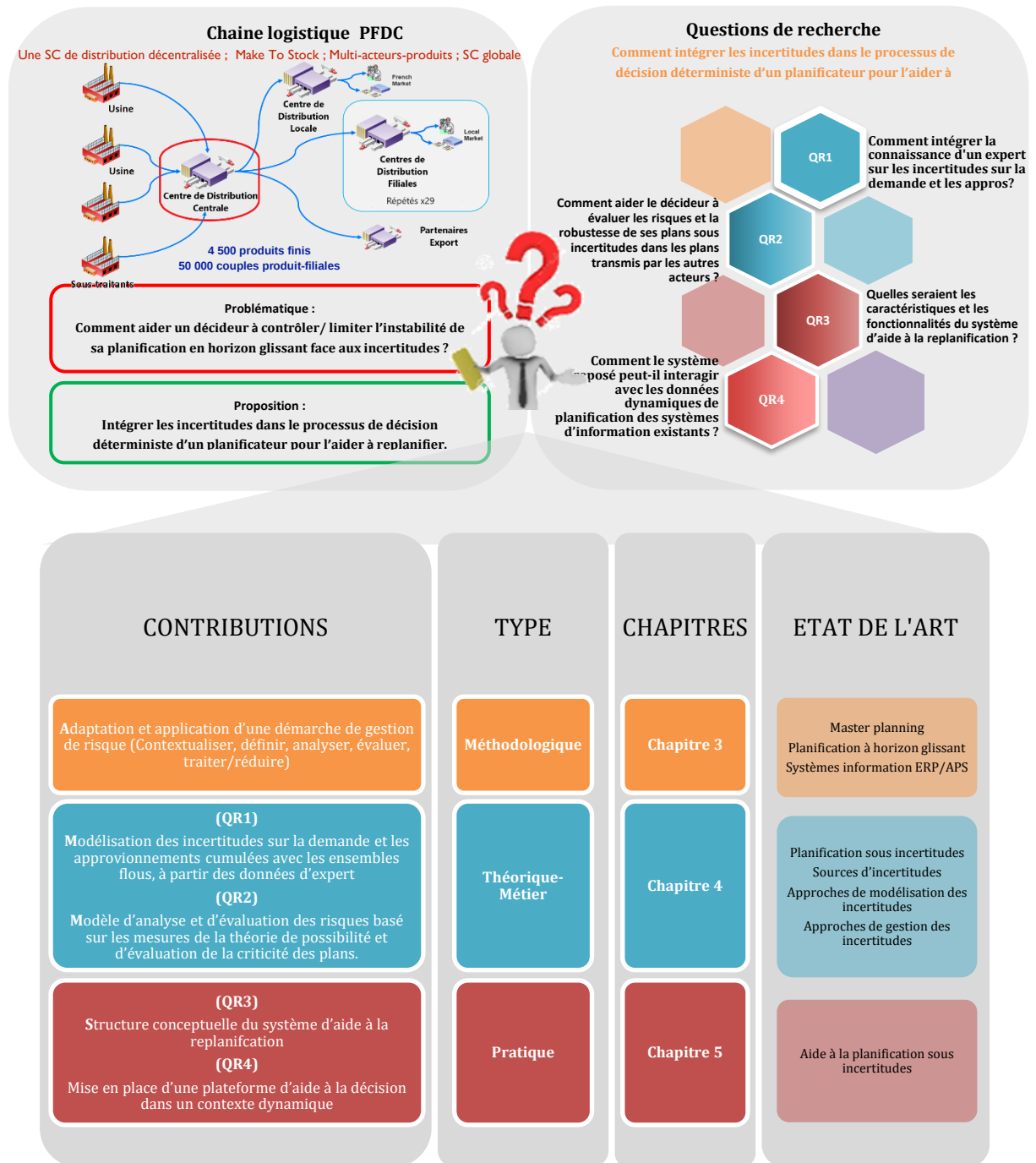


Figure 1. Vue d'ensemble de la thèse

CHAPITRE I. POSITIONNEMENT DU CONTEXTE DE RECHERCHE

1.	Introduction : Contexte industriel	9
2.	Supply Chain Management (SCM)	10
2.1.	Le concept de la Supply Chain (SC) et ses structures	10
2.2.	Du Management au Supply Chain Management au Global Supply Chain Management	12
3.	Planification de la chaîne logistique	16
3.1.	Niveaux de planification	16
3.2.	Stratégies de gestion des flux et problèmes de planification	18
3.3.	Processus de planification tactique Make-To-Stock.....	20
4.	Collaboration et coordination au sein d'une chaîne logistique.....	23
4.1.	Approches de prise de décision dans une chaîne logistique	23
4.2.	Type de collaborations.....	25
4.3.	Planification collaborative basé sur un échange de plans et de la négociation au sein d'une chaîne logistique décentralisée multi acteurs	27
4.4.	Approche dynamique de coordination basée sur une planification en horizon glissant	30
5.	Gestion des incertitudes et des risques en supply chain	32
5.1.	Concepts connexes.....	32
5.2.	Effets d'incertitudes et de la dynamique de la planification dans la SC	34
5.3.	Gestion des risques dans la SC (SCRM)	38
5.4.	Systèmes d'information de planification et d'aide à la décision au sein d'une SC	39
6.	Conclusion : positionnement du contexte et de la problématique industrielle	45

1. Introduction : Contexte industriel

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'un projet ANR intitulé CAASC (Cloud Adaptation for Agile Supply Chain). Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC), une multinationale française fondée en 1962, est le partenaire industriel du projet et le fournisseur du cas industriel.

Le cas d'application considère la Supply Chain (SC) internationale de l'entreprise PFDC. Dans cette SC, la fabrication s'effectue en France et la distribution se fait via un réseau de distribution internationale, composé des Centres de Distribution Locaux (CDL) situés à l'international qui s'approvisionnent auprès d'un Centre de Distribution Central (CDC) en France.

Les acteurs de cette SC interne sont indépendants et effectuent leur planification via leurs systèmes d'information locaux (ERP -Entreprise Resource Planning- pour la fabrication, DRP -Distribution Resource Planning- centrale pour CDC et DRP local pour les CDL). Au niveau tactique, les acteurs de cette SC collaborent dans le cadre d'un processus de planification collaborative via une plateforme cloud pour :

- Améliorer les performances de PFDC en termes de service ;
- Synchroniser leurs activités ;
- Aligner leurs plans ;
- Déployer leur stock de façon agile afin d'éviter les ruptures au bout de la SC ;
- Optimiser la répartition des stocks entre les filiales.

Ce processus collaboratif se déroule dans un contexte très dynamique avec une approche de planification à horizon glissant afin d'intégrer l'évolution des activités dans le temps et d'absorber l'effet des incertitudes dans la SC. Bien que la révision périodique des plans augmente l'agilité de la SC face aux perturbations, la décision de modifier un plan est prise dans l'incertitude et toute modification du plan peut affecter la stabilité de l'ensemble de la SC et augmenter la nervosité du système. Ainsi, le projet CAASC vise à fournir un outil d'aide à la décision pour aider un décideur à replanifier plus efficacement en limitant les changements, tout en respectant son indépendance dans la prise de décision.

Dans ce chapitre, nous visons à positionner le contexte de notre travail ainsi que la problématique industrielle considérée dans ce contexte, par rapport aux différentes dimensions du domaine du Supply Chain Management (SCM) et des problèmes de planification de la SC. Pour ce faire, nous présentons d'abord les fondements du SCM et son évolution jusqu'à aujourd'hui. Ensuite, nous nous concentrons sur les activités et les processus de la planification en général et de la planification tactique en particulier. Puis nous nous présentons les piliers de la collaboration et de la coordination, les approches décisionnelles et collaboratives au sein d'une SC et le processus de planification collaborative ainsi que sa dynamique en horizon glissant. En outre, afin de positionner notre problème, nous commençons par examiner brièvement les différents problèmes et phénomènes dans les SCs dus aux incertitudes et à la dynamique de la planification à horizon glissant. Nous exposons ensuite les différents systèmes d'information et d'aide à la décision actuellement utilisés par les industriels pour la planification et nous identifions leurs limites dans la littérature face aux incertitudes. Sur la base de ces éléments, nous pourrions positionner notre contexte ainsi que la problématique industrielle et identifier notre direction de recherche.

2. Supply Chain Management (SCM)

2.1. Le concept de la Supply Chain (SC) et ses structures

La Supply Chain (SC) peut être définie comme « un réseau d'organisations qui participent, par des liens en amont et en aval, aux différents processus et activités qui produisent de la valeur sous forme de produits et de services destinés aux clients finaux » (Christopher 2005). (Genin 2003) ajoute dans sa définition de la SC que ces organisations sont géographiquement dispersées et se coordonnent pour assurer le bon fonctionnement de la chaîne, dans le cadre des relations client/fournisseur qui les relie. Le terme Supply chain est souvent traduit en français par chaîne logistique et parfois chaîne d'approvisionnement.

Une chaîne logistique est généralement constituée de quatre systèmes (Lee et Billington 1993) contribuant à ajouter la valeur à un produit :

- Système d'approvisionnement (fournisseurs).
- Système de fabrication (Manufacturiers).
- Système de distribution (centre de distribution et entrepôts).
- Clients.

Ces différents systèmes sont reliés par trois types de flux principaux (Stadtler et Kilger 2008) :

- Flux physique de matière
- Flux d'information
- Flux financier des différentes transactions qui circulent entre les acteurs de la SC.

De plus, dans le cadre de l'évolution de la prise en compte des facteurs environnementaux, la considération des flux de récupération et de réutilisation des matériaux recyclables dans la SC est devenue également importante (Birge et Louveaux 2011).

Le flux physique de matière représente l'ensemble des étapes et des processus par lesquels passe un produit jusqu'à ce qu'il soit livré au client final. Malgré les différences entre les types et les secteurs d'activité des entreprises dans une SC, leur flux physique peut être divisé en trois phases principales :

- Flux physique de matières première (MP) depuis le système d'approvisionnement vers les unités de fabrication.
- Flux physique de fabrication dans le processus de transformation des matières premières aux produits finis.
- Flux physique de distribution des produits finis aux clients finaux.

Le flux d'information peut être représenté généralement par le flux de la demande qui orchestre le flux physique dans la chaîne de valeur. Dans ce cas le flux d'information sur la demande vient des clients vers les fournisseurs (voir figure 2).

Ce flux peut aussi être représenté dans les deux sens en considérant plus globalement les différentes informations échangées entre les systèmes d'une SC pour se coordonner.

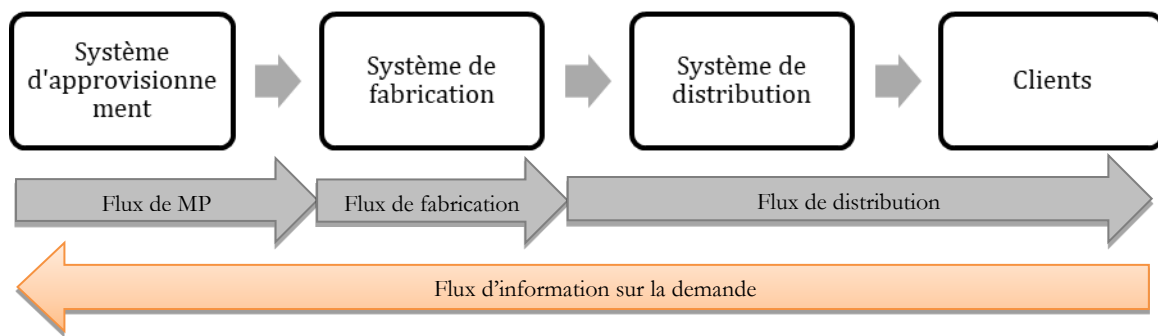


Figure 2. Représentation d'une chaîne logistique

..... « en réalité, les chaînes logistiques n'ont de chaîne que leur nom. Elles sont constituées d'un réseau complexe d'organisations » (Le Moigne 2017)

La structure de la SC représente la manière dont les entreprises sont disposées pour former une chaîne logistique. Elle indique également une relation acheteur-fournisseur entre les différentes entités. La structure la chaîne logistique est un élément impactant directement les différents flux ainsi que les modes de gestion des interactions et de partage d'information entre les différents maillons. Les structures des chaînes logistiques sont variées. Les auteurs (Huang, Lau, et Mak 2003), dans leurs revue de la littérature précisent que la complexité de la gestion d'une chaîne dépend de sa topologie et ont classifié les structures de la SC en quatre types principaux (voir figure 3):

- Série : se compose généralement d'un détaillant, d'un distributeur, d'un producteur et d'un fournisseur. Cette représentation est la base des autres structures possibles d'une SC.
- Divergente : est une représentation plus réaliste des réseaux de distribution alimentés par une seule entité dans la SC.
- Dyadique : consiste en deux entités. Elle peut être considérée comme une SC en série limitée à deux étages. Elle peut servir à étudier des relations client/ fournisseur d'un produit ou d'un service (sous-traitant).
- Convergente : représente une autre modification de la représentation en série où les composants sont fournis par les fournisseurs et assemblés par un assembleur. Ainsi, cette structure représente un processus d'assemblage et dépend principalement de la nomenclature (BOM).
- Réseau : est une représentation plus complète et complexe de la SC. Elle provient d'une combinaison de structures convergentes et divergentes.

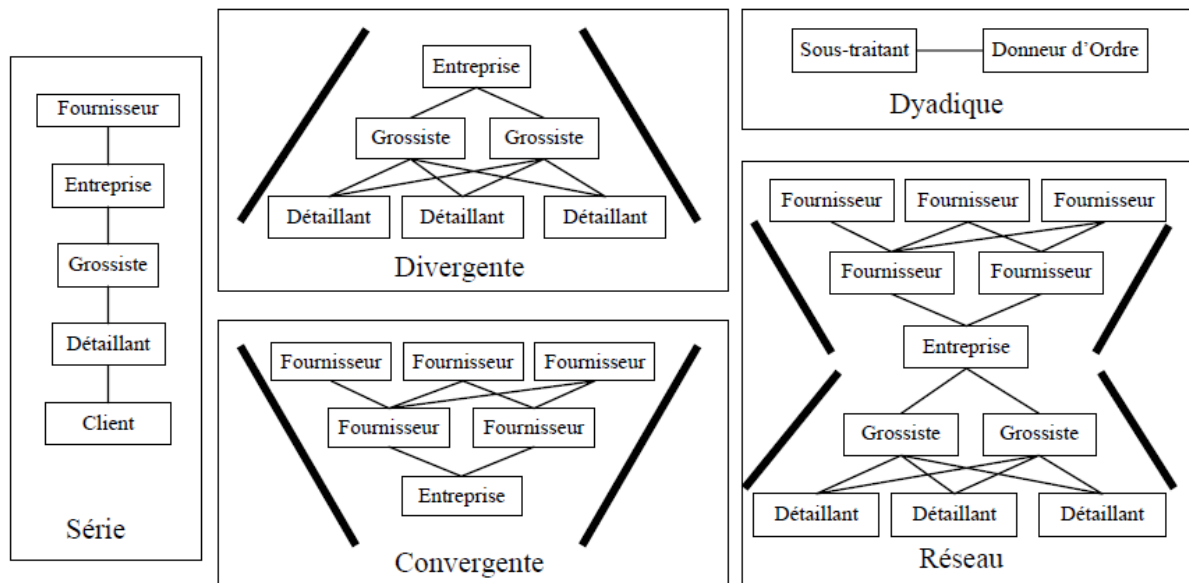


Figure 3. Différents structures de la chaîne logistique (Mahmoudi et al. 2006)

2.2. Du Management au Supply Chain Management au Global Supply Chain Management

2.2.1. L'évolution de l'industrie et des technologies de l'information a marqué la phase de transition vers un Supply Chain Management

Dans le passé, chaque entreprise gérât ses propres activités en interne. En revanche, les fournisseurs et les clients ont été considérés comme des entités commerciales externes. Les relations avec ces derniers étaient gérées par des intermédiaires appelés " boundary spanners " via des contrats juridiques figés, révisés régulièrement. Ces intermédiaires sont des spécialistes des achats, des ventes et de la logistique. Leur objectif est d'établir des liens avec d'autres organisations afin de maximiser les profits de l'entreprise à travers la négociation (Lorenz 2001). Le nom utilisé pour décrire ce type de fonction signifie déjà qu'il existait des frontières rigides pour séparer les activités de l'entreprise des entités externes. (Scott 1992) définit le concept de frontière comme une « zone d'action par laquelle une organisation interagit avec son environnement dans le but de survivre ». Il fait également référence aux clauses restrictives qui ont pour vocation de mettre des limites entre l'activité de l'entreprise et le reste du monde.

Ce fonctionnement est devenu contraignant et a suscité l'inquiétude des gestionnaires face à l'évolution des nouveaux concepts et méthodes dans l'industrie. Principalement, le concept de juste à temps (JIT) développé par Toyota dans les années 1970s (Chapman et Clive 2007), qui permet de tirer le flux de la SC et de répondre plus efficacement aux attentes des clients. De plus, dans un contexte de compétitivité accrue et d'évolution rapide dans le monde dans différents domaines, notamment en termes de technologie et de capacités informatiques, disposer de la bonne information au bon moment est devenu un véritable critère de différenciation sur le marché.

Ainsi, les entreprises ont perçu la nécessité de développer des partenariats et des collaborations avec les parties externes pour réussir à adopter ces concepts et se démarquer sur le marché. Le développement de relations de confiance et de partage des risques avec les clients et les fournisseurs sont les clés du succès de cette transition. Ce nouveau concept de collaboration et de partenariat a entraîné de nouveaux changements dans le mode de fonctionnement traditionnel des différentes parties impliquées. Plusieurs activités ont commencé à être réalisées de manière collective via le partage d'informations (analyse des coûts, conception des produits, gestion des stocks...).

2.2.2. Aujourd'hui le Supply Chain Management est une fonction critique de l'entreprise

Les entreprises ne considèrent plus les frontières entre les organisations mais plutôt une chaîne de valeur entièrement liée depuis les fournisseurs jusqu'aux clients des clients. L'objectif principal de cette fonction est de relever le défi de livrer le bon produit au bon moment, au bon endroit et au meilleur prix. Cela consiste à optimiser et à agir collectivement au sein d'une chaîne logistique sur trois axes principaux et essentiels du point de vue du client :

- Qualité : Mettre en place des systèmes de détection de défauts, normes et certifications, service après-vente
- Coût : maîtriser les coûts de production, de stockage et de transport des produits, sélection des fournisseurs et développement des partenariats....
- Délais : établir les délais, gestion de transport de marchandises, établir les prévisions, programmer les approvisionnements...

Le Council of Supply Chain Management Professionals offre la définition suivante du SCM : « le supply chain management comprend la planification et la gestion de toutes les activités impliquées dans le sourcing et l'approvisionnement, la transformation et toutes les activités logistiques. Il inclut également la coordination et la collaboration avec des partenaires qui peuvent être des fournisseurs, des intermédiaires, des prestataires et des clients. Le SCM est une fonction d'intégration dont le rôle principal est d'intégrer les différents métiers et les différents processus dans et entre les entreprises au sein d'un modèle cohérent et performant. Il inclut toutes les activités de gestion de la logistique citées ci-dessus ainsi que les opérations de production, et il pilote la coordination des processus et des activités entre le marketing, les ventes, le développement produit, la finance et les technologies de l'information ».

De façon plus structurelle, (Stadtler 2005) rassemble les différents axes de SCM pour former ce qu'il appelle la « Maison de SCM » présentée dans la figure 4.

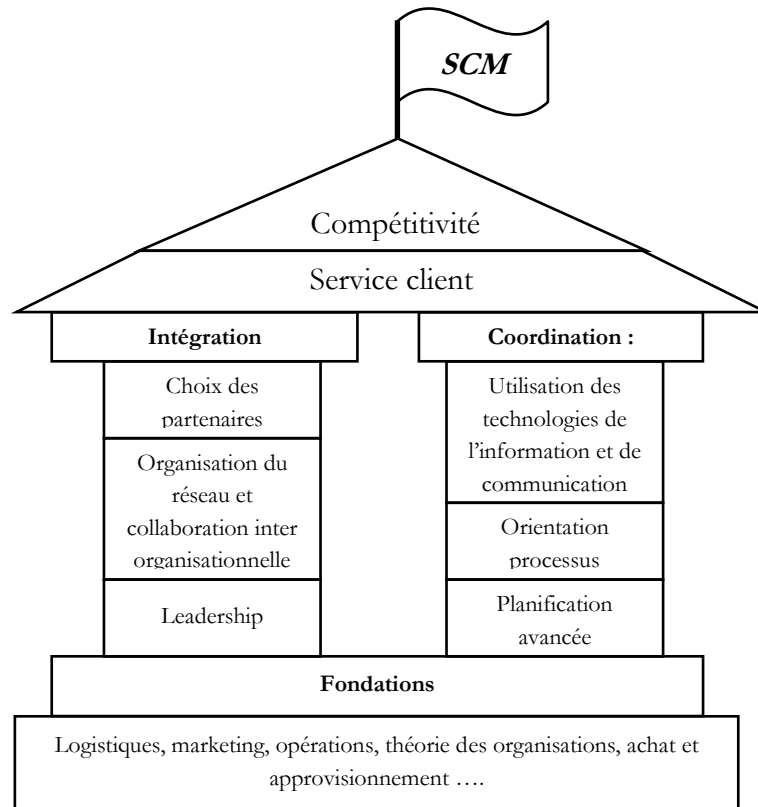


Figure 4. « Maison de SCM » (Stadtler 2005)

Le toit de cette maison représente l'objectif principal qui a donné naissance au concept de SCM, qui est l'amélioration de la compétitivité de SC dans son ensemble. La satisfaction du client est un moyen essentiel pour y parvenir. Comme le SCM vient éliminer les frontières entre les acteurs de la chaîne logistique et renforcer les liens entre eux, le toit de la " maison SCM " repose sur deux piliers, l'intégration des organisations et la coordination des flux qui les traversent. Chaque pilier est constitué de trois éléments principaux.

Le pilier intégration a pour objectif de développer des partenariats durables, de type gagnant-gagnant, qui répondent aux besoins des clients.

Pour ce faire, le choix des partenaires et le développement de critères (compétences, culture, stratégie, confiance...) pour faire ces choix est essentiel. De plus, les organisations qui intégrées dans le cadre de ces partenariats ont à développer des objectifs communs. Cependant, cela n'est pas facile à accomplir car les expériences acquises par les différentes organisations peuvent favoriser la transmission d'informations incomplètes ou même fausses entre les organisations, ce qui a un impact sur la performance de la chaîne dans son ensemble. Pour éviter ce risque, la confiance et le contrôle des relations inter-organisationnelles sont importants, en se basant principalement sur des stratégies issues des sciences sociales.

Enfin, le troisième bloc d'intégration est le leadership au sein de la SC. Ce bloc concerne la prise de décision pour l'ensemble de la chaîne. Deux situations extrêmes de leadership peuvent être relevées. Un premier cas où " naturellement " un partenaire est considéré comme le leader de la

chaîne sur la base de sa puissance financière au sein de la chaîne ou compte tenu des compétences exceptionnelles qu'il apporte. Dans ce cas, ce partenaire se chargera de l'animation et de l'alignement des décisions entre les différents partenaires de la chaîne. Dans un autre cas, tous les partenaires étant considérés comme égaux, un comité de pilotage peut être constitué pour animer et aligner les décisions au sein de la chaîne.

Concernant le pilier de la coordination, son objectif principal est d'assurer la synchronisation des différents flux de matière, d'information et financier dans la chaîne. Ce pilier repose également sur trois blocs principaux.

Premièrement, l'utilisation des nouvelles technologies pour la transmission et le traitement de l'information. Ainsi, les différents partenaires peuvent s'échanger différents messages et informations immédiatement et à moindre coût. Il en résulte une réduction des temps de cycle et une augmentation de l'agilité de la SC. De plus, l'accessibilité à une grande masse de données historiques permet une prise de décision de qualité.

Les technologies de l'information et de la communication permettent également d'automatiser des processus qui étaient auparavant réalisés manuellement. Elles servent à optimiser les processus en éliminant les activités redondantes, notamment à l'interface de deux entités. L'orientation des processus implique souvent une reconception de nouveaux processus, suivie d'une standardisation de ceux-ci (Stadtler et Kilger 2008).

Finalement, la coordination des plans des différents acteurs d'une SC reste un des plus grands défis de la SCM. La satisfaction de la demande des clients est conditionnée par la planification et le contrôle de la disponibilité des ressources de la chaîne logistique (Advanced Planning).

2.2.3. Mondialisation, Opportunités, expansion à l'international, Global Supply Chain management

Dans le contexte de la mondialisation et du développement des réseaux de transport, la gestion de la chaîne logistique n'a pas cessé d'évoluer pour étendre aussi les limites géographiques. Sous la pression de la concurrence sur le marché mondial, les entreprises se développent à l'international à la recherche de nouvelles opportunités et d'installations. Par exemple, les entreprises peuvent installer des usines à l'étranger pour bénéficier de concessions tarifaires et commerciales, de coûts de main-d'œuvre inférieurs, de subventions d'investissement et de coûts logistiques réduits sur les marchés étrangers (Zanjirani Farahani, Asgari, et Davarzani 2009). Par conséquent, la complexité de la chaîne logistique augmente. Cette évolution a donné naissance au nouveau concept de Global Supply Chain Management. « Global Supply Chain » fait référence à des systèmes à très grande échelle qui peuvent comprendre jusqu'à des centaines, voire des milliers, d'installations de production, de centres de distribution et de clients (You, Wassick, et Grossmann 2009). Les SCs globales sont généralement plus avancées et plus complexes que les SCs locales et elles impliquent les fournisseurs et les intérêts de l'entreprise à l'échelle mondiale plutôt qu'une direction locale ou nationale. Les grandes distances géographiques rendent l'optimisation des coûts, la coordination et la visibilité des éléments encore plus critiques pour le GSCM. De plus, s'approvisionner à l'étranger

peut être moins coûteux, mais les risques peuvent dépasser les avantages à long terme (Zanjirani Farahani, Asgari, et Davarzani 2009). Ainsi, la gestion des risques est aussi nécessaire pour maîtriser le rapport coûts-bénéfices.

3. Planification de la chaîne logistique

3.1. Niveaux de planification

Une chaîne logistique est complexe. Différentes décisions sur différents niveaux sont prises par plusieurs acteurs dans différents maillons d'une SC. Ces décisions peuvent être classifiées en trois catégories selon leurs étendues ainsi que leurs impacts. Trois niveaux de décision peuvent être distingués :

- Décisions à long terme : ce sont des décisions qui ont un impact à long terme (plus de deux ans) sur l'activité de l'entreprise. Elles touchent généralement à la conception et la structure de la SC.
- Décisions à moyen terme : ce sont des décisions liées aux opérations régulières visant principalement à gérer les flux et les ressources de la SC.
- Décisions à court terme : ce sont des décisions limitées par les décisions prises aux niveaux supérieurs. Néanmoins, elles constituent un facteur important pour la performance réelle de la SC et la bonne exécution des décisions du plus haut niveau : délais, retards, service client.... Ainsi, ce type de décisions se caractérise par une précision et un niveau de détails importants.

Généralement, l'ensemble de ces décisions, quel que soit leur niveau et leur objet, impactent les performances de la SC et doivent être coordonnées et préparées. La préparation de ces décisions est le rôle de la planification (Stadtler et Kilger 2008).

Dans la littérature, la planification de la SC (SCP) est définie comme un processus, un cadre, un système ou une méthode de synchronisation et de gestion des activités de demande et d'approvisionnement, qui nécessite un effort transversal de collaboration entre les acteurs de la SC (Oliva et Watson 2011). (Jonsson et Holmström 2016) précisent que, pratiquement, ce cadre, système, processus ou méthode de planification et de contrôle des opérations doit être implémenté, géré et activement développé pour aider les planificateurs à atteindre les objectifs souhaités, en tenant en compte du contexte particulier dans lequel est utilisé.

L'objectif principal de la planification est d'atteindre un haut niveau de performance de la SC selon différents critères. Garantir en permanence l'équilibre entre la charge générée par la demande et les capacités de la SC est un des aspects majeurs de la planification. Cet équilibre est obtenu par un ensemble de processus de planification spécifiques en fonction de l'horizon de planification et du niveau de détail considéré.

La matrice de la planification de la SC (figure 5) propose un classement des tâches de planification selon deux dimensions, le niveau de planification (long terme, moyen terme, court terme) et le

processus de la SC basé sur les quatre activités principales de la SC (approvisionnement, production, distribution, ventes) (J. Rohde, Meyr, et Wagner 2000).

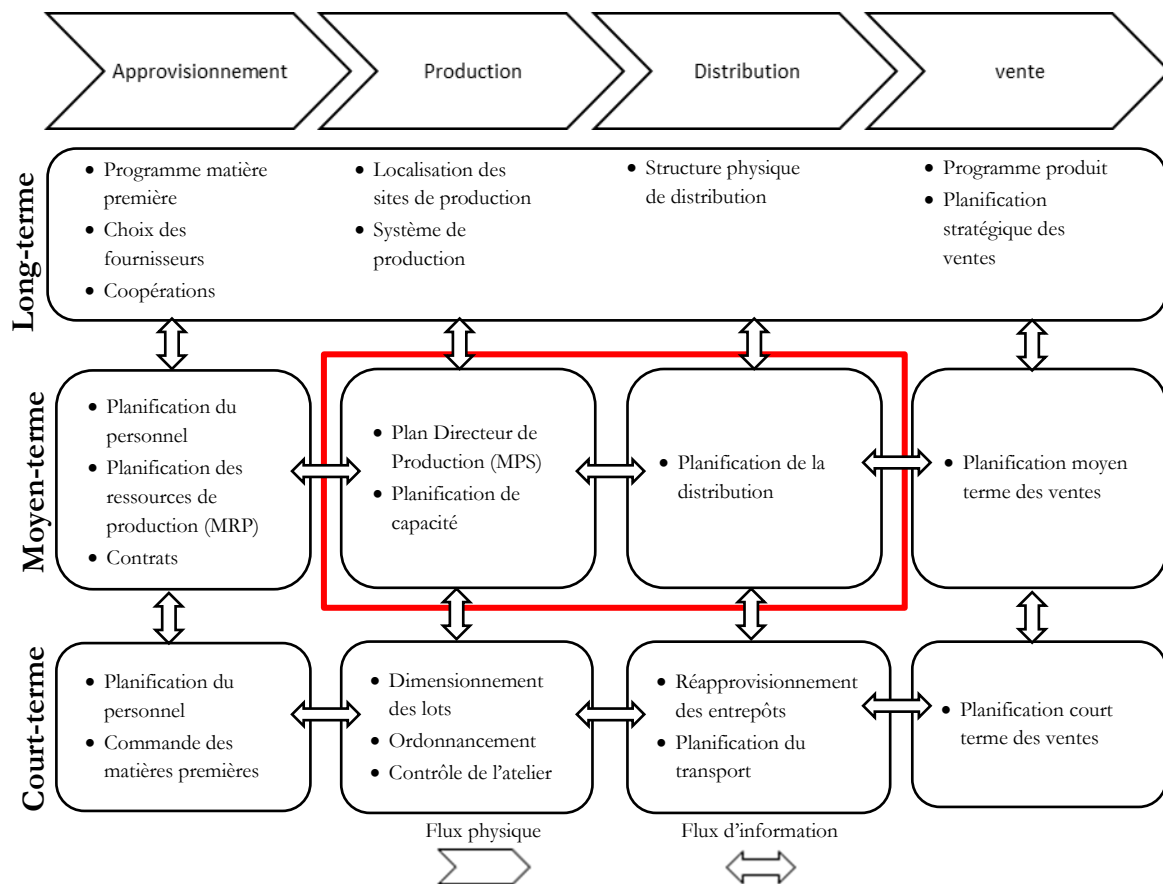


Figure 5. La matrice de la planification de la chaîne logistique (J. Rohde, Meyr, et Wagner 2000) et positionnement du périmètre de la thèse

Les travaux de cette thèse portent sur la planification moyen terme des activités d'une SC divergente où l'unité de production alimente un réseau de distribution via un centre de distribution central gérant cet approvisionnement.

Les différentes tâches de planification des activités de la SC, quel que soit leur niveau, sont confrontées à trois challenges principaux (Stadtler et Kilger 2008):

- Satisfaire des objectifs contradictoires dans un contexte multicritère (exemple : maximiser le taux de service et minimiser les coûts de stockage).
- Choisir parmi un nombre d'alternatives importants ce qui rend la mission de trouver une planification optimale très difficile.
- Gérer les incertitudes, particulièrement celles liées à l'accumulation des erreurs des modèles de prévision, pour éviter une dégradation de taux de service et des performances.

L'entreprise adopte différentes stratégies pour affronter ces enjeux en fonction des caractéristiques de ses ressources. Dans la section suivante, nous détaillons ces différentes stratégies ainsi que les problèmes de planification les plus courants associés à chaque type de stratégie.

3.2. Stratégies de gestion des flux et problèmes de planification

Une chaîne logistique est constituée de toutes les parties contribuant à la satisfaction de la demande du client final. Chacune de ces parties a souvent sa propre stratégie et peut intervenir au sein de plusieurs chaînes logistiques (Chapdaniel 2010).

Afin de satisfaire les besoins des clients, une entreprise utilise une stratégie de production adaptée aux caractéristiques de la demande et aux ressources disponibles (caractéristiques du produit, marché, moyens de production, délais de production, délais de livraison...).

Les clients souhaitent des délais de livraison les plus courts possibles (délai entre la passation de la commande et sa réception). En fonction du cycle de production et du cycle commercial, l'entreprise conçoit sa propre stratégie parmi les quatre stratégies de production de base pour y parvenir : Engineer To Order (définition 1), Make To Order (définition 2), Assemble To Order (définition 3), Make To Stock (définition 4) (Chapman et Clive 2007). La figure 6 montre l'impact de la stratégie adoptée par l'entreprise l'ordre des opérations et le délai de livraison des clients.

Définition 1 :

" « Engineer To Order » signifie que les spécifications du client exigent une conception technique unique ou une personnalisation importante. En général, le client est fortement impliqué dans la conception du produit." (Chapman et Clive 2007)

Définition 2 :

" « Make To Order » ou la fabrication à la commande signifie que le fabricant ne commence pas à fabriquer le produit avant la réception de la commande du client. Le produit final est généralement fabriqué à partir d'articles standard, mais peut également inclure des composants conçus sur mesure. " (Chapman et Clive 2007)

Définition 3 :

" « Assemble To Order » signifie que le produit est fabriqué à partir de composants standards que le fabricant peut stocker et assembler selon la commande du client. " (Chapman et Clive 2007)

Définition 4 :

" « Make To Stock » signifie que le fournisseur fabrique les produits et les vend à partir des stocks de produits finis. " (Chapman et Clive 2007)

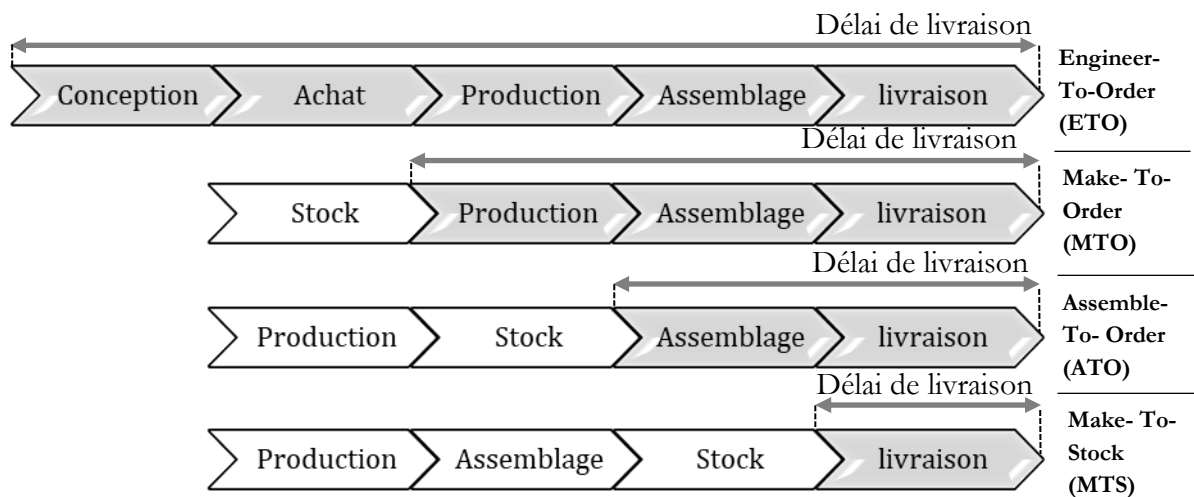


Figure 6. Stratégie de production et délai de livraison (Chapman et Clive 2007)

Les produits ETO sont des produits qui ne nécessitent pas d'effort d'anticipation mais plutôt des compétences de gestion de projet agile, en coordination avec le client. Les entreprises qui gèrent ce type de produits auront plus d'exigences en termes de personnalisation, de conception ou d'innovation. Le délai de livraison de cette stratégie est le plus long mais en général le client est prêt à attendre pour que son produit unique soit conforme à ses attentes.

Les produits MTO sont aussi des produits fabriqués à la demande du client mais à partir d'un stock de composants/matières premières standards. La planification de la production pour ce type de produits est plus précise en termes de quantités prévues pour la production, car elles correspondent à une agrégation des commandes des clients. En revanche, le défi de ce type de gestion de flux, appelé flux tiré par la demande, est la planification des dates de lancement de la production pour une livraison à temps. Ce mode de gestion nécessite une flexibilité importante des moyens de production et des fournisseurs suffisamment réactifs pour réapprovisionner les stocks des matières premières.

Les produits ATO sont principalement des produits adaptés à une stratégie de différenciation retardée. Ce principe permet aux entreprises d'intégrer les spécifications des clients en lui permettant d'apporter des combinaisons personnalisées sur leurs articles, dans la phase d'assemblage des sous-ensembles issus de la production. Un exemple de l'entreprise DELL qui permet à ces clients de personnaliser les configurations de leurs ordinateurs et donc personnaliser l'assemblage des composants électroniques. Dans le secteur automobile, les clients définissent les spécifications des fonctions et des options pour l'assemblage de leurs voitures. Ce mode de gestion correspond également à des produits qui nécessitent un délai important de fabrication des sous-ensembles. Il demande donc une anticipation et une planification des activités de fabrication de ces sous-ensembles. Il demande aussi un effort particulier au niveau de l'approvisionnement des composants nécessaires pour l'assemblage auprès des fournisseurs. La conception des produits et des processus de fabrication des sous-ensembles est également importante pour optimiser les opérations d'assemblage et donc réduire le temps de livraison et livrer plus rapidement le client.

En MTO ou ATO, la planification correspond à une planification à la commande à partir de la date de livraison jusqu'au lancement en production ou en assemblage. Ce problème est similaire au problème appelé *Resource-Constrained Multi Project Scheduling Problem (RCMPSP)* de planification multi-projets en gestion de projet (Guillaume 2011).

Les produits MTS sont des produits standards généralement fabriqués en grande série et ayant une durée de vie importante. Ils peuvent être aussi des produits qui nécessitent un temps important pour leurs productions par rapport aux délais de livraison souhaités par les clients. La gestion de ces produits demande une anticipation et une élaboration des prévisions de ventes pour avoir des stocks suffisants pour répondre aux demandes clients. La demande de ce type de produits est généralement prédictible. Leur délai de livraison est moins important par rapport aux autres stratégies car le client est directement servi des stocks des produits finis hors cas de rupture de stock. Le problème le plus connu dans ce mode de gestion est le dimensionnement des lots de production (*lot sizing problem*) qui vise à maximiser les profits en répondants aux prévisions de ventes et en minimisant les coûts de production et de stockage (dans la figure 7 nous résumons les différents modèles du '*lot sizing*' identifiés dans la littérature).

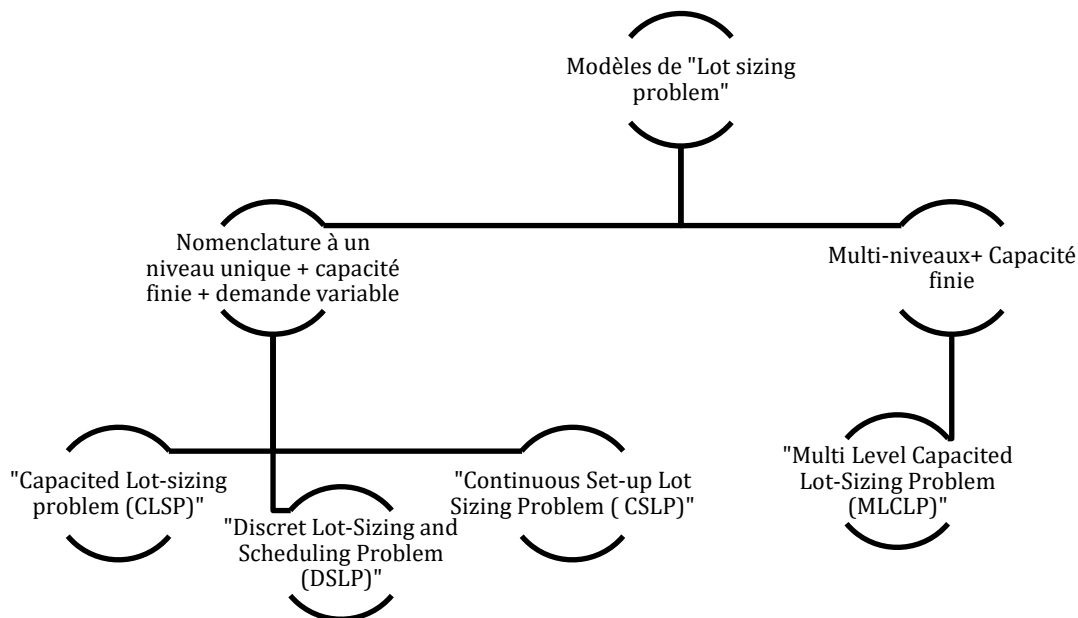


Figure 7. Modèles du problème de dimensionnement des tailles de lots dans une stratégie Make-To-Stock (Rota 1998; Drexl et Kimms 1997; Johnson et Montgomery 1999; Jans et Degraeve 2008; Guillaume 2011; Mula et al. 2021)

3.3. Processus de planification tactique Make-To-Stock

3.3.1. Planification et contrôle de production (PCP) dans APICS

MPC (Manufacturing Planning and Control), qui se traduit par Planification et Contrôle de la Production (PCP), est une méthode conventionnelle regroupant un ensemble de fonctions et processus de planification de production. Elle vise globalement à assurer un équilibre entre la demande et les approvisionnements tout en respectant les règles de gestion des stocks et

d'approvisionnement (« APICS Dictionary, 16th Edition » 2021). Le contrôle permet de s'assurer que les plans élaborés soient exécutés correctement.

PCP inclut deux types principaux de processus (« APICS Dictionary, 16th Edition » 2021):

- Planification des priorités : répond aux questions de quoi, comment, quelle quantité et quand commander ou produire afin de satisfaire la demande le plus efficacement possible ? Elle est réalisée en basant sur :
 - Plan Industriel et Commercial (Sales & Operations Planning (S&OP)) : Il s'agit d'un processus mensuel qui permet de consolider les informations provenant de différents départements, tels que les ventes, le marketing, les finances et la production, afin de générer des plans réalistes de la demande, de la production et des stocks, sur lesquels repose le reste des processus de planification. Le résultat de ce processus est un plan de production qui représente des quantités fixées et validées par les différentes parties prenantes qui s'engagent à les intégrer comme objectif pour exécution (côté approvisionnement) ou de ventes (côté demande).
 - Programme Directeur (Master scheduling) : Une planification de production sur un horizon plus court basée sur des informations plus détaillées sur la demande (par produit dans un environnement Make-To-Stock). Il s'agit d'un processus hebdomadaire dont le résultat est un Programme Directeur de Production (Master Production Plan).
 - Planification des besoins en composants (Material Requirement Planning (MRP)) : L'objectif de ce processus est de planifier les besoins dépendants en composants et matières premières en se basant sur la nomenclature des produits finis. Cette planification consiste notamment à s'assurer que les composants sont disponibles à temps pour l'exécution des plans de production prévus des produits finis et à contrôler leur qualité.
- Planification des capacités : vise à répondre à la question de combien faudra-t-il pour produire les produits demandés en tenant compte de la capacité déjà disponible et de celle qui doit être acquise ? Elle est réalisée en basant sur :
 - Planification des ressources (Resource Planning (RP)) par atelier pour une vue globale des capacités.
 - Planification des ressources clés (Rough-Cut Capacity Planning (RCCP)) permet de vérifier que la capacité est suffisante dans les ressources clés et les postes de travail goulots.
 - Planification des besoins en capacité (Capacity Requirement Planning (CRP)) permet de vérifier les capacités de toutes les ressources et pas que les goulots.

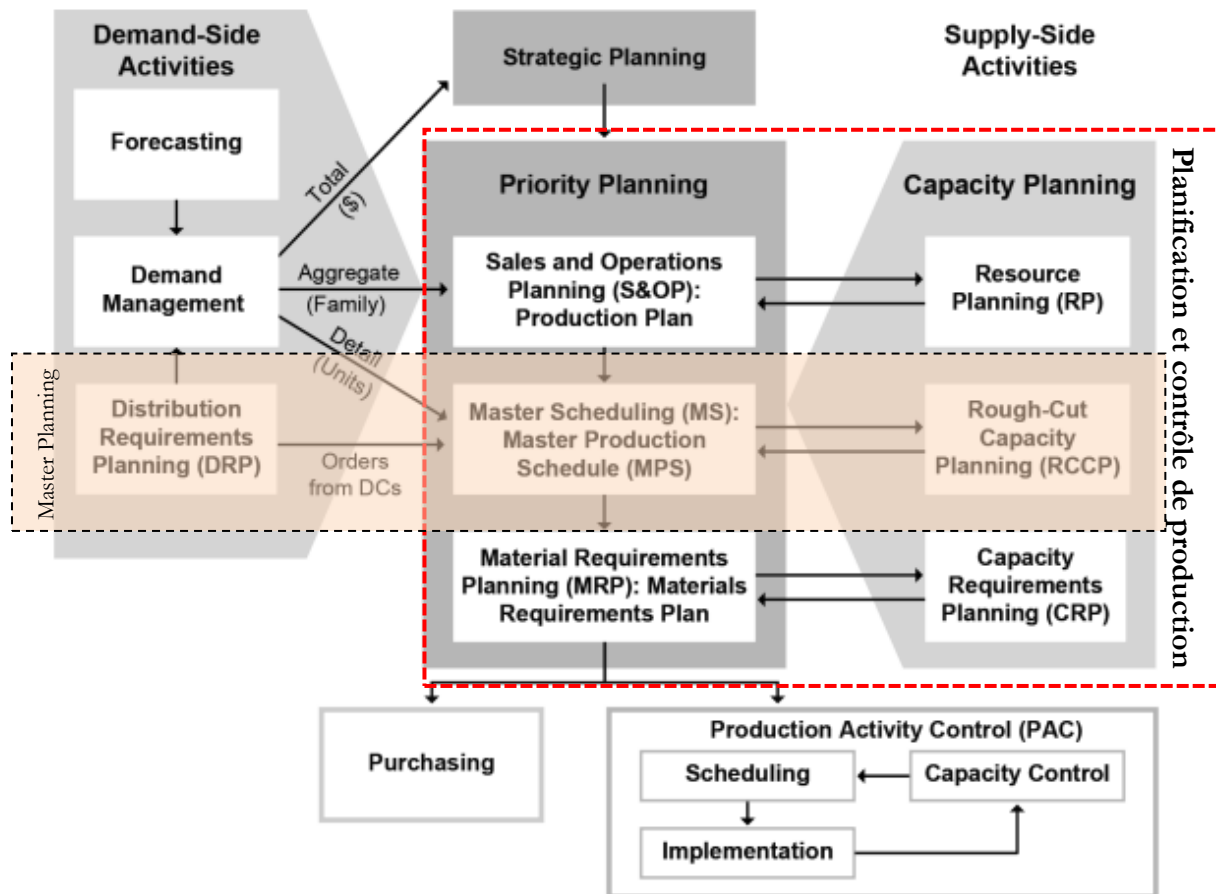


Figure 8. Processus de planification et contrôle de production (PCP) dans (« APICS Dictionary, 16th Edition » 2021)

Dans le graphique de la figure 8, les plans de production sont soumis à des contraintes venant de deux directions, d'un côté lié à la demande et de d'un autre côté lié aux approvisionnements. Les résultats de ces processus sont destinés principalement aux services d'achat et approvisionnement au cas où les ressources disponibles sont insuffisantes. Le plan résultant du processus MRP est destiné aux services d'exécution et de contrôle des activités de production (PAC) pour la gestion des flux dans les ateliers de production.

Les entrées du PCP sont des quantités requises provenant principalement des processus de planification de la demande (prévisions ou directement des plans d'approvisionnements des partenaires en aval dans la SC comme les centres de distribution via la planification des besoins de distribution (DRP)).

Dans le cadre de cette thèse nous considérons le niveau tactique de planification (Master Planning) (Voir son périmètre sur le graphe de la figure 8) ayant comme entrées les demandes des centres de distribution (CD) élaborées via les processus de DRP. Nous détaillons les aspects principaux de ce processus de planification tactique dans la section qui suit.

3.3.2. Master Planning (MP)

Les travaux de cette thèse concernent une chaîne logistique composée des entités de production et de distribution gérées en MTS. Le challenge principal de la planification tactique de ce type de SC

est de bien anticiper les besoins des clients pour avoir un stock de produits fini suffisants pour les satisfaire. La planification tactique est critique dans ce type d'organisations pour bien dimensionner les stocks dans la SC et les tailles de lots de production.

Ainsi, le Master Planning (MP) représente un niveau de décision important de la SC car, pour être efficace, il nécessite des apports de toute la chaîne logistique et ses résultats ont un grand impact sur cette chaîne (Chopra 2019).

Le MP est défini dans la 16^{ème} édition du dictionnaire APICS (« APICS Dictionary, 16th Edition » 2021), comme : « un groupe de processus métier comprenant les activités suivantes : gestion de la demande (qui comprend la prévision et le traitement des commandes) ; la planification de la production et des ressources ; et la planification principale (qui comprend le plan directeur et la planification des ressources clés) ». Ces différents processus impliqués (de gestion de la demande, de production et gestion des capacités) ont été détaillés dans la section précédente.

Le MP représente un niveau de planification tactique qui vise à coordonner les flux au sein d'une SC et à maintenir les plans à un niveau satisfaisant, en assurant un bon équilibre entre la charge induite par la demande et la capacité disponible des ressources de la SC. Les modèles de MP incluent ainsi les contraintes capacitaires des ressources critiques mais aussi les contraintes spécifiques au domaine (technologique, politique commerciale, ...). L'un des principaux défis de cette planification est de répondre aux fluctuations saisonnières de la demande. Par conséquent, l'horizon de planification tactique va de 6 à 24 mois pour tenir compte de ces évolutions saisonnières.

Le MP recherche la manière la plus efficace de répondre aux prévisions de la demande et/ou aux commandes des clients sur un intervalle de planification à moyen terme, qui couvre souvent un cycle saisonnier complet. Il permet non seulement d'équilibrer les prévisions de la demande avec les capacités disponibles, mais aussi d'affecter les demandes (quantités de production et de distribution) aux sites afin d'éviter les goulots d'étranglement (Jens Rohde 2005; Mönch, Uzsoy, et Fowler 2018).

4. Collaboration et coordination au sein d'une chaîne logistique

4.1. Approches de prise de décision dans une chaîne logistique

4.1.1. Approche centralisée versus approche décentralisée

La prise de décision dans une SC peut être divisée en deux catégories selon la distribution de la décision entre les acteurs de la SC : centralisée ou décentralisée.

Une décision est centralisée quand un seul ou quelques acteurs décident pour toute la SC (Aiken et Hage 1968; Auh et Menguc 2007; Giannoccaro et Pontrandolfo 2004; Govindan 2013; Yan et al. 2019; Anand et al. 2021).

Le degré de centralisation d'une SC dépend du degré de concentration des décisions des organisations de la SC dans une seule entité. Ainsi, une SC a un degré élevé de centralisation lorsqu'un seul acteur décide pour toutes les organisations de la SC (Ogier et al. 2015).

Le choix du niveau de centralisation des décisions de la SC est un choix stratégique qui a un impact significatif sur la performance de la SC. La pertinence et les avantages de la centralisation des décisions de la SC ont été démontrés plusieurs fois dans la littérature. D'un point de vue théorique, c'est une approche prometteuse qui a un impact positif sur l'efficacité de la SC et la réduction des effets de l'incertitude dans celle-ci (ex. réduction de l'effet Bullwhip (Fu et al. 2014; Ernawati et al. 2021)). (Giannoccaro 2018) intègre également le facteur humain dans l'évaluation et démontre qu'une forte centralisation dans les SCs complexes devrait être préférable. Plus les décisions sont interdépendantes dans la chaîne plus la centralisation devient intéressante.

La centralisation suppose que les décideurs sont capables de collecter toutes les informations nécessaires et de les analyser pour prendre de meilleures décisions pour l'ensemble de la SC. Cependant, les capacités cognitives des décideurs sont inégales et limitées face à une masse importante de données SC et un nombre illimité d'alternatives. D'un point de vue pratique, la centralisation exige un effort particulier de traitement et de gestion des données pour aider le décideur central à trouver les informations pertinentes et à choisir les bonnes alternatives qui maximisent les performances de l'ensemble de la chaîne. En outre, la centralisation exige que les gestionnaires de la SC acceptent les décisions proposées par une autorité centrale, de sorte qu'un niveau élevé de confiance est nécessaire pour éviter les comportements opportunistes (Giannoccaro 2018).

À contrario, une approche décentralisée de prise de décision caractérise une chaîne logistique où chaque entité décide et gère indépendamment les activités de son entité (Lee et Billington 1993; Stock, Greis, et Kasarda 2000; Giannoccaro 2011). Un décideur gère les décisions locales de chaque maillon de la chaîne pour améliorer les performances de son entité mais aussi de la chaîne. Cette approche est conforme aux bonnes pratiques actuelles et nécessite des mécanismes de coordination entre les acteurs pour assurer une performance globale de la SC (Sahin et Robinson 2002; Khalili-Damghani et Ghasemi 2016; Shan et al. 2021). Ainsi, le côté positif connu de la décentralisation c'est l'amélioration de la flexibilité, la communication et l'innovation au sein d'une SC (Giannoccaro 2018). Nous détaillons les mécanismes pour la coordination de la planification au sein d'une SC décentralisée dans les sections suivantes.

Une SC centralisée et une SC décentralisée sont également qualifiées respectivement de SC intra-organisationnelle et de SC inter-organisationnelle, par certains auteurs (i.e.(Desport 2017)).

4.1.2. Approche réactive versus approche proactive

En fonction du niveau d'anticipation du processus décisionnel, un décideur dans une SC peut adopter une approche proactive ou réactive dans la résolution ou le contrôle des perturbations dans son activité.

Une approche réactive est une approche orientée effet. Le décideur ne s'engage dans un processus de prise de décision que si c'est nécessaire pour réagir suite à une perturbation. Ainsi, l'impact de la prise de décision n'est visible qu'après l'occurrence de cette dernière.

Une approche proactive est une approche orientée prévention. Le décideur s'engage dans la prise de décision et la collecte des données nécessaires de façon continue dans un cadre d'anticipation.

Une approche proactive permet à l'organisation de répondre plus rapidement aux problèmes contrairement à une approche réactive qui demande plus de temps car le décideur est mieux préparé, plus opérationnel, actif, et donc plus performant (Lin et Carley 1993). En revanche, quand le temps n'est pas un élément critique dans la prise de décision une approche réactive peut être plus avantageuse pour économiser les coûts de traitement de données.

De plus, l'approche proactive permet plus d'agilité parce qu'elle est basée sur des anticipations et des créations d'alternatives pour s'adapter aux éventuelles perturbations lorsqu'elles surviennent contrairement à une approche réactive où le décideur ne commence à agir qu'en cas de survenance de problème.

Une approche proactive ou réactive peut aussi caractériser la méthode de gestion des stocks dans une SC (Desport 2017). Une politique proactive est basée sur l'anticipation de la demande pour la prise d'un ensemble de décisions (achat, approvisionnement...). Une gestion réactive des stocks est actionnée plutôt suite à la demande du consommateur ou tout autre élément d'alerte comme les niveaux de stocks. Une stratégie proactive permet un meilleur taux de service mais dans la forme où l'information sur la demande future n'existe pas, une stratégie réactive est préférée.

Ces deux approches sont aussi fréquemment utilisées pour distinguer les stratégies de gestion du risque et de l'incertitude en SC (Elluru et al. 2019 ; Tarei, Thakkar, et Nag 2021).

La gestion réactive des risques dépend de l'évaluation des accidents et des conclusions des audits d'activités, alors que la gestion proactive des risques est une stratégie de contrôle en boucle fermée basée sur l'observation des activités et le niveau de sécurité actuel.

4.2. Type de collaborations

Dans une SC décentralisée, les différents acteurs possèdent des informations asymétriques. La coordination est un ensemble d'approches ou stratégies qui permettent à ces acteurs d'agir pour le bien et la performance de la chaîne dans sa totalité.

Dans ce cadre, la collaboration permet aux décideurs d'échanger des informations, d'aligner leurs objectifs individuels et de synchroniser leurs activités.

La collaboration peut porter sur un horizon de temps spécifique et être liée à un certain niveau de prise de décision. Elle peut être limitée à deux niveaux pour lier un fournisseur et un client dans la chaîne. Ainsi, le nombre de collaborations possibles correspondra bien au nombre de lien entre les nœuds de la chaîne (voir figure 9).

La collaboration peut aussi être multi-niveaux reliant tous les partenaires de la SC (voir figure 10) (Stadtler et Kilger 2008). L'objectif de cette dernière est d'accélérer la transmission de l'information à travers toute la SC. Les informations sont partagées en même temps avec tous les acteurs de la chaîne, ce qui donne dynamiquement de la visibilité aux contraintes au fur et à mesure que des changements se produisent dans la SC.



Figure 9. Une chaîne de collaboration à deux niveaux

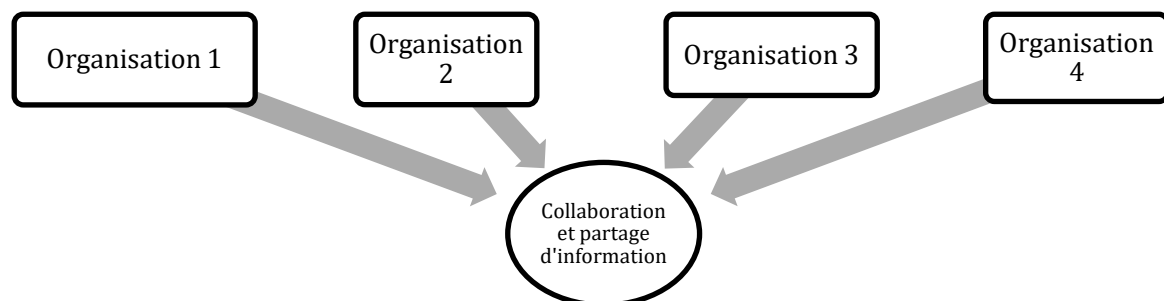


Figure 10. Collaboration multi-niveau

Dans ces travaux, nous nous intéressons au premier type de collaboration. Le décideur peut être engagé dans plusieurs processus de collaboration en même temps en tant que fournisseur avec le partenaire en aval ou en tant que client avec son partenaire en amont. Pour que cette collaboration soit efficace, le leadership appartient généralement à un des acteurs, au client dans le cadre d'une collaboration dirigée par le client (Customer-driven collaboration) ou au fournisseur dans le cadre d'une collaboration dirigée par le fournisseur (Supplier-driven collaboration) (Ertek et Griffin 2002).

Par ailleurs, selon une perspective contractuelle, les acteurs de la SC peuvent recourir à des contrats pour aligner leurs objectifs individuels selon des spécifications définies (Ogier et al. 2015). Par exemple, dans le cas de la fabrication sur stock (MTS), les contrats peuvent être utilisés pour protéger les fournisseurs et leur éviter de se retrouver avec des produits obsolètes ou en surstock. Par exemple, le client s'engage à d'approvisionner soit périodiquement une quantité fixe (contrat à horizon glissant), soit une quantités totale cumulée fixe sur un horizon de temps (contrat à engagement sur horizon). Un autre type de contrat est basé sur la « flexibilité de quantité » qui couple l'engagement du client d'acheter au moins un certain pourcentage en dessous de la prévision avec la garantie du fournisseur de livrer jusqu'à un certain pourcentage au-dessus de la prévision (Sahin et Robinson 2002; Walsh, Williams, et Heavey 2008).

L'objectif principal des contrats (voir revue de (Sahin et Robinson 2002)), est de limiter la variabilité de la demande et des approvisionnements et ainsi d'assurer une bonne performance locale de chacun des partenaires ainsi que la performance globale de la SC.

Une autre perspective est la perspective d'équipe qui partagent les mêmes objectifs (Ogier et al. 2015). Cette perspective est plus cohérente avec les SC internes (SC composée d'entités appartenant et représentant la même organisation et réalisant des activités complémentaires pour au final livrer à temps les clients finaux de la même entreprise). Toutefois, cela n'empêche pas chaque acteur de décider indépendamment de ses activités et de se coordonner avec les autres acteurs pour atteindre l'objectif commun de la chaîne à laquelle ils appartiennent tout en atteignant leur objectif local.

Ce défi est assez élevé dans le cas d'entreprises ayant une SC complexe délocalisée à l'échelle internationale. Dans ce type de SC, en plus des contraintes de coordination de décisions décentralisées s'ajoute l'inégalité du niveau des technologies informatiques à disposition dans les différentes entités. Cette contrainte ralentit le processus de partage d'information et augmente par conséquent le cycle d'asymétrie d'information (le temps entre la prise de décision et la réception de nouvelles données mises à jour par d'autres acteurs). En outre, cet environnement peut favoriser la concurrence dans l'allocation des stocks et le partage d'informations incomplètes. Le degré de collaboration diffère selon le type et la taille des informations partagées entre les acteurs ou les activités planifiées collectivement.

Dans cette thèse, nous considérons une SC internationale multi-acteurs où les différents partenaires partagent les mêmes objectifs et collaborent pour la planification de différentes activités de la chaîne. Cette collaboration est basée sur un partage d'informations minimal selon un processus de planification collaborative.

Le terme « domaine de planification » est un terme utilisé pour faire référence au processus de planification local géré par une organisation dans des SC décentralisée (Stadtler et Kilger 2008). Chaque acteur dispose de son propre processus de décision qui lui permet de gérer les activités locales de son organisation et d'en assurer l'exécution de manière indépendante. Cependant, les différentes activités de la SC sont liées et traversées par le même flux de produits. Ainsi, la synchronisation de ces activités est essentielle pour la performance de la SC mais aussi la qualité de la planification locale de chaque acteur. En effet chaque décideur a besoin d'intégrer des informations dont la source est hors son domaine de planification.

Le rôle de la planification collaborative dans ce contexte est de lier les processus de planification locale des acteurs dans une SC via des processus de collaboration et de partage d'information. Chaque lien de la SC reliant deux organisations (fournisseur-client) dans la SC est considéré comme une opportunité de collaboration tout en respectant l'indépendance de chacun.

Nous détaillons dans la section suivante le principe de la planification collaborative et son processus générique basé sur un échange de plans.

4.3. Planification collaborative basé sur un échange de plans et de la négociation au sein d'une chaîne logistique décentralisée multi acteurs

Le CPFR « Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment » est le processus le plus connu de planification collaborative (voir revue de (Hollmann, Scavarda, et Thomé 2015)). Les acteurs élaborent collectivement leurs plans à travers trois cycles (planification, prévision, réapprovisionnement). Le CPFR est constamment identifié dans la littérature comme la forme la plus efficace pour accroître la collaboration et améliorer la performance et les revenus dans une SC (délais de réponse aux commandes plus courts, développement de meilleurs produits, processus de production amélioré, réduction des erreurs de prévision et meilleure disponibilité des produits...) (Saidy et al. 2018; Hill, Zhang, et Miller 2018). Cette démarche concerne spécifiquement des collaborations entre un fabricant et un détaillant et demande un échange avancé d'information sur

différents horizons de décision pour assurer sa réussite (prévision de ventes, élaboration de plan commercial commun, gestion des promotions, ...).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à des SC décentralisées basées sur un échange d'information minimal principalement un échange de plans de demande / approvisionnement dans le cadre d'une collaboration à deux niveaux de type fournisseur/ client au sein de la même SC. Les acteurs sont généralement réticents à partager des informations confidentielles telles que les coûts ou les capacités. Cet échange de plans est un point de départ d'un processus de négociation. En effet, les décideurs possèdent des informations relativement incomplètes basées principalement sur la demande du client. Les décideurs peuvent enrichir ces informations via la négociation afin de trouver des bons compromis pour assurer une performance globale de la SC. Du fait du partage minimal d'information, l'allocation des quantités entre les clients dans la SC est supportée par les informations collectées pendant le processus de négociation (Ogier et al. 2015). Ainsi, parmi les informations supplémentaires qui peuvent être apportées suite à la négociation, il y a l'état des stocks.

(Stadtler et Kilger 2008) représente un processus générique de prise de décision basé sur un échange de plan entre des partenaires quelconques d'une SC, comme suit :

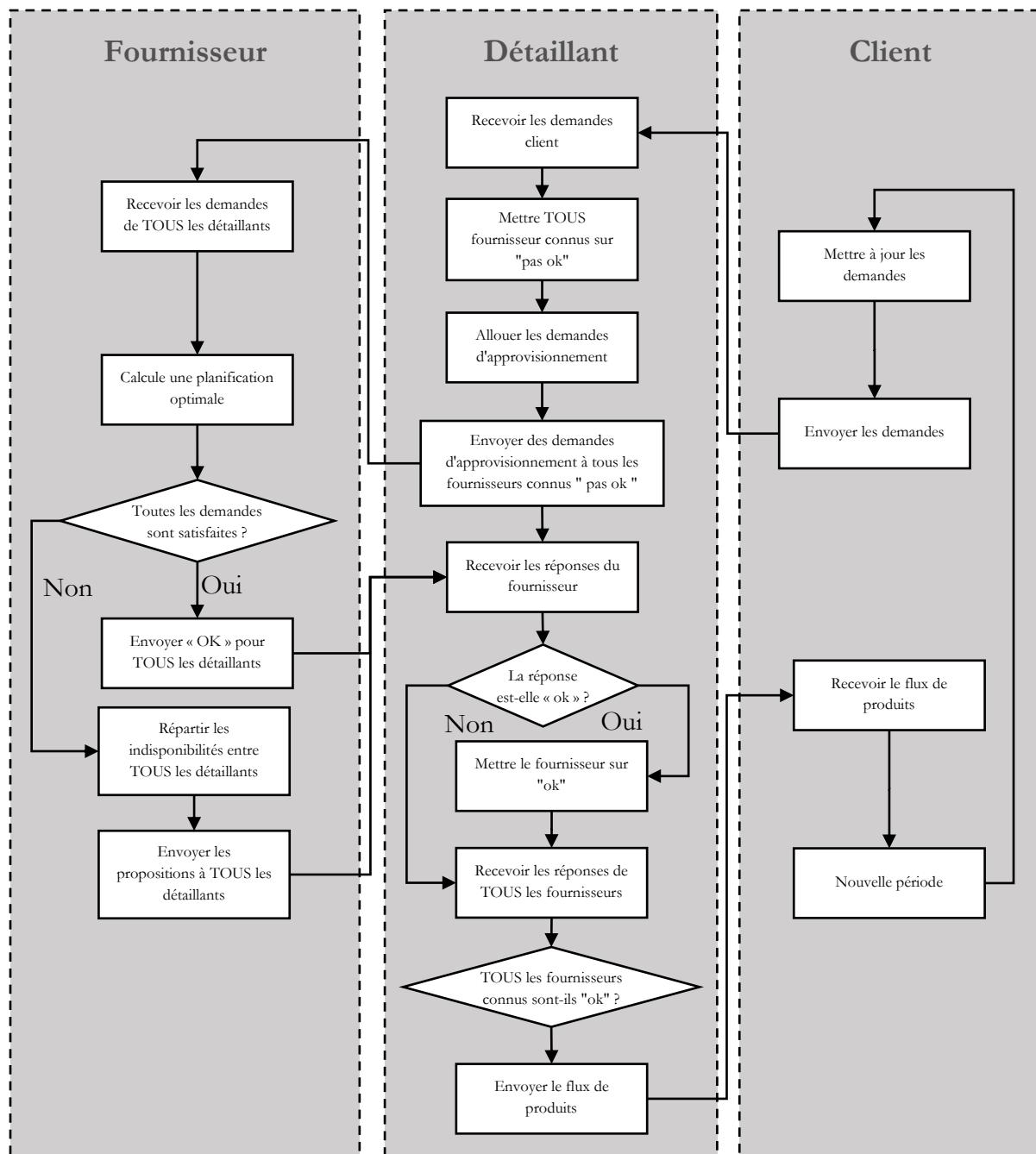


Figure 11. Processus de planification collaborative basée sur un échange de plan (Stadtler et Kilger 2008)

Chaque décideur mène son processus de planification locale, partage les plans qui en résultent, puis peut recourir à la négociation pour traiter les exceptions et partager des informations supplémentaires pour améliorer les plans locaux. Enfin, chacun exécute son plan et évalue ses performances.

Le processus de négociation commence par la planification en amont. Si le plan de demande transmis par le client entraîne des améliorations (principalement des améliorations de coûts) pour le fournisseur, la procédure itérative se poursuit (voir processus de négociation proposé par (Dudek et Stadtler 2006)).

Le processus de planification collaborative est représenté comme une boucle fermée car la nature dynamique de la SC exige une mise à jour continue des décisions de coordination dans le temps. Cette mise à jour peut être déclenchée par des événements spécifiques ou effectuée périodiquement (Gregorio Rius-Sorolla et al. 2021).

La fréquence de révision des plans et des informations partagées est un enjeu important dans la dynamique de la planification. La plupart du temps, les processus de planification collaborative sont exécutés en utilisant une approche de planification à horizon glissant. Cette méthode est au cœur de la problématique de cette thèse. Nous détaillons son principe dans la section suivante.

4.4.Approche dynamique de coordination basée sur une planification en horizon glissant

Contrairement à une approche réactive de replanification déclenchée par des événements. La planification à horizon glissant est une approche de replanification proactive basée sur un processus de révision de planification et de partage d'information périodique.

La planification à horizon glissant est la pratique industrielle la plus répandue, typiquement utilisée dans les systèmes ERP (Entreprise Requirement Planning) des entreprises, (Bredström, Flisberg, et Rönnqvist 2013), pour exécuter le processus dynamique de planification. Elle permet aux décideurs de la SC d'intégrer les contingences de la demande et du flux physique (Amrani 2009). Ainsi, elle permet d'actualiser les plans de production, d'approvisionnement et de livraison élaborés à une date donnée afin d'intégrer de nouvelle information mais aussi corriger des éventuels écarts mesurés entre les plans antérieurs et les exécutions.

Les différentes variables temporelles associées à cette méthode de planification dynamique sont les suivantes :

- La période de planification : unité de temps par laquelle sont exprimées les quantités prévues dans un plan (Q_t de la figure 12), en fonction de la granularité de planification considérée.
- Le cycle de replanification : Les quantités planifiées à une date donnée sont révisées selon une fréquence définie au sein de la chaîne. Le cycle de replanification représente le nombre de périodes au bout desquelles ces quantités sont révisées. Il peut aussi être appelé le pas de replanification.
- La date de planification : les différentes quantités projetées sont élaborées à une date donnée appelée 'date de planification'. Le plan est élaboré en se basant sur des informations disponibles à cette date.
- L'horizon de planification : correspond au nombre de périodes de planification sur lesquelles les quantités sont projetées à chaque cycle de planification à partir de la date de planification. Sa taille varie en fonction de la portée du niveau de décision considéré.

À une *date de planification* donnée, des quantités sont projetées pour différentes *périodes de planification* d'un *horizon de planification* défini. Ces quantités sont exécutées à la fin de la première période de

l'horizon et le reste des quantités est mis à jour selon le *cycle de replanification* (voir l'illustration de la figure 12).

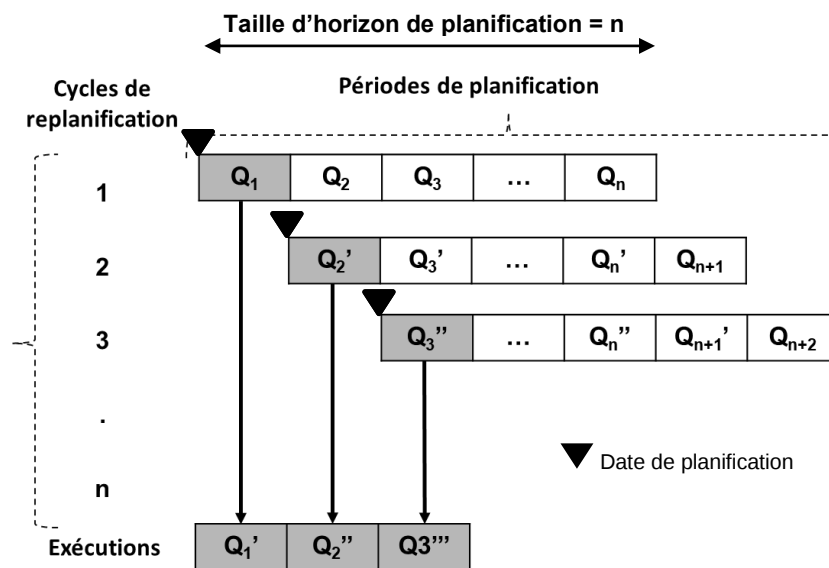


Figure 12. Planification à horizon glissant

Généralement, pour une planification tactique, les quantités prévisionnelles sont des quantités projetées par semaine. La taille d'horizon de planification est d'un an (52 semaines) pour couvrir au moins une saisonnalité. Le cycle de replanification peut varier selon le type d'information concerné par la mise à jour et la fréquence de coordination entre les acteurs de la SC. Il est d'au moins une semaine.

Cette méthode est très connue pour améliorer la réactivité de la SC face aux incertitudes. Toutefois les décideurs adoptent des stratégies différentes de coordination tout au long de l'horizon de planification. Sur un horizon de planification, trois zones peuvent être distinguées selon la stratégie de coordination utilisées (Chapman et Clive 2007):

- Horizon figé : les changements de planification ne sont pas autorisés, sauf avec l'approbation exceptionnelle du décideur.
- Horizon flexible : une zone de compromis et de négociation entre les décideurs.
- Horizon libre : les changements proposés par les autres décideurs sont automatiquement acceptés dans des limites définies.

L'objectif de l'horizon figé est d'augmenter la fiabilité des exécutions par rapport au planifié et d'assurer le respect d'un délai minimal d'approvisionnement et de réaction face à un changement des quantités prévues.

En revanche, au niveau de l'horizon flexible, les acteurs se considèrent plus aptes à s'adapter aux modifications et aux changements de la demande et des approvisionnements. Ainsi, cet horizon est le plus concerné par les révisions effectuées sur l'horizon glissant et la négociation.

Enfin, l'horizon libre est l'horizon avec le plus de flexibilité, qui va jusqu'à accommoder automatiquement les modifications proposées par les autres acteurs. Généralement, les décisions dans cet horizon sont entièrement automatisées dans les systèmes de planification selon des règles prédéfinies.

Ainsi, la planification à horizon glissant est considérée comme une approche pratique de la coordination au sein d'une SC. (Taghipour et Frayret 2013) propose un processus de négociation basé sur cette approche pour permettre aux acteurs d'une SC de rechercher un ajustement mutuel dans un environnement dynamique.

5. Gestion des incertitudes et des risques en supply chain

5.1. Concepts connexes

Les **incertitudes** représentent l'ensemble des perturbations qui peuvent impacter la performance de la SC. Les **risques** intègrent l'effet de ces incertitudes sur la performance de la SC. « Le risque dans une chaîne logistique est la variation potentielle des résultats qui influencent la diminution de la valeur ajoutée à toute cellule d'activité dans une chaîne » (Bogataj et Bogataj 2007). Le risque est souvent vu comme une menace qui impacte négativement la performance de la SC (Colicchia et Strozzi 2012). Dans ce sens, (Ellis, Henry, et Shockley 2010), définissent le risque comme « une perception individuelle de la perte potentielle totale associée à la perturbation de la chaîne logistique d'un article particulier provenant d'un fournisseur particulier ».

Généralement les incertitudes et les risques sont associés à différentes notions caractérisant la performance de la SC sous incertitudes et risques, nous citons principalement les notions (voir figure 13) de :

- **Vulnérabilité** : « l'état ou le degré de *fragilité* du réseau lorsqu'il est exposé à une perturbation résultant de risques internes ou externes » (Zarghami et Dumrak 2021). Elle exprime « la possibilité ou le potentiel de perte » (Hashim et al. 2021). Ainsi, elle représente « un indicateur négatif au cours du processus d'évaluation des performances du système » (Jiang et al. 2021).
- **Résilience** : est « la capacité de résister à une perturbation ; et la capacité à s'en remettre rapidement. » (Ekanayake et al. 2021), ou « la capacité d'un système à revenir rapidement à son état initial ou à un état nouveau et plus souhaitable après avoir été perturbé » (Taghizadeh, Venkatachalam, et Chinnam 2021) , ou encore « la capacité à faire face aux risques et phénomènes complexes et imprévisibles qui les affectent en permanence » (Miceli et al. 2021). Elle est liée plutôt à la *réactivité* de la SC face aux incertitudes à fort impact et sa capacité d'*adaptation*.
- **Agilité** : est « une dimension stratégique de la résilience, c'est-à-dire la capacité d'une organisation à gérer le changement de manière proactive, plus efficace et efficiente, en vue d'une transformation et de renouvellement. Elle inclut la notion de vitesse de réponse de

l'organisation au changement. » (Miceli et al. 2021). Elle permet ainsi la SC de « réagir rapidement aux changements à court terme de la demande ou de l'offre et gérer les perturbations externes de manière fluide » (Patrucco et Kähkönen 2021). Elle est basée sur la combinaison de plusieurs aptitudes (Charles et al 2010) : (i) capacité à détecter vite, puis décider vite et enfin déployer vite la solution choisie et (ii) la capacité à répondre complètement et faiblement au problème rencontré. Ainsi, la *flexibilité* et la *réactivité* (capacité de réponse) sont des dimensions importantes de la performance de la SC qui lui permet d'atteindre un bon niveau d'agilité

- **Robustesse** : représente « la mesure dans laquelle la chaîne logistique est capable d'assurer ses fonctions pour une variété de scénarios futurs possibles » (Colicchia et Strozzi 2012). Ainsi « Une chaîne logistique est considérée comme robuste lorsqu'elle peut maintenir ses opérations et sa connectivité malgré les perturbations » (Shi et al. 2021). Elle se définit aussi comme « la capacité de la chaîne logistique à résister ou à absorber des événements dangereux ou des perturbations. C'est la qualité de la force, de la santé et de l'endurance » (Jiang et al. 2021) et la *conservation*.

D'après les définitions des différentes notions, nous soulignons le caractère proactif des concepts d'agilité et de robustesse de la SC qui se basent principalement sur la *prédiction des scénarios* de perturbation pour caractériser la SC. Alors, « les chaînes logistiques doivent allier agilité et robustesse, afin d'obtenir en temps réel d'excellentes performances dans un large éventail de scénarios de risques » (Cohen et Kouvelis 2021). Cela permet par conséquent de diminuer la vulnérabilité de la SC face aux incertitudes et augmenter sa résilience.

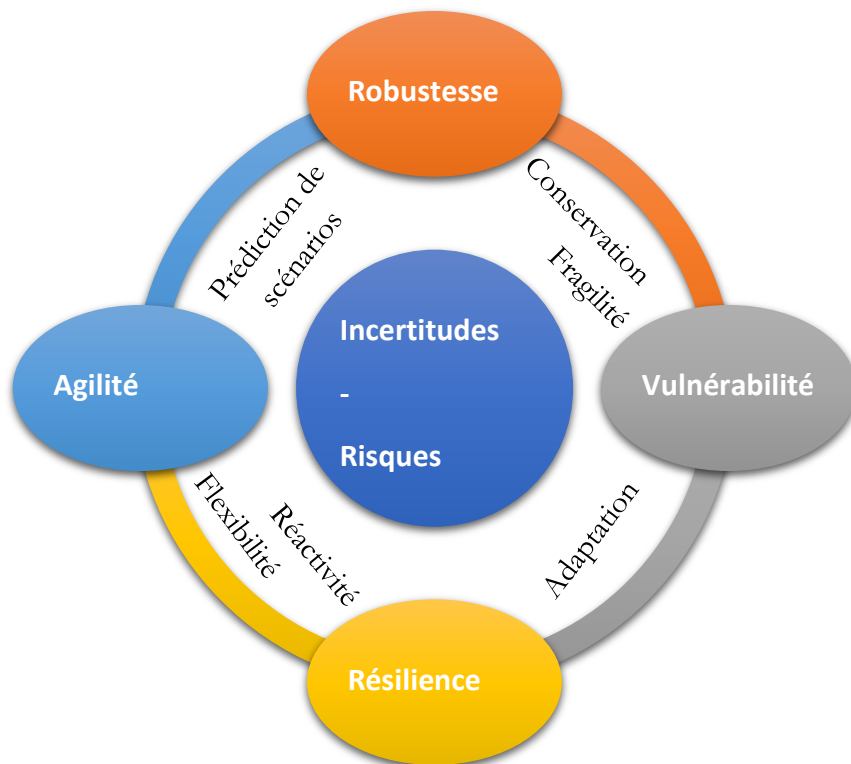


Figure 13. Notions connexes des incertitudes et risques dans une SC

5.2. Effets d'incertitudes et de la dynamique de la planification dans la SC

Les problèmes de *nervosité* et d'*effet Bullwhip* sont deux principaux phénomènes qui découlent de l'effet de propagation des incertitudes en SC. De plus, « Il est inquiétant de constater que de nombreuses entreprises connaissent simultanément la nervosité et le phénomène du bullwhip » (Li et Disney 2017). Dans cette section, nous détaillons les causes de chaque phénomène, sa formulation, et leur relation dans le contexte de la planification à horizon glissant.

5.2.1. Effet bullwhip dans une SC

L'effet bullwhip (Forrester 1953), ou effet de coup de fouet en français, est un phénomène très répandu dans les SCs. Il est souvent associé à la propagation des incertitudes le long de la SC, principalement l'amplification de la variabilité de la demande des sites en aval vers les sites en amont (Cachon, Randall, et Schmidt 2007) (voir illustration dans la figure 14). Ainsi, il peut être mesuré au niveau d'une entité de la SC comme le quotient, du coefficient, C_{out} , de variance des demandes générées par ce niveau ($D_{out}(t, t + T)$) durant l'intervalle de temps $[t, t+T]$ et du coefficient sur un horizon de temps de taille T , et du coefficient C_{in} , de variance de la demande reçue ($D_{in}(t, t + T)$) par l'entité en aval (Fransoo et Wouters 2000), tels que :

$$C_{out} = \frac{\sigma(D_{out}(t, t+T))}{\mu(D_{out}(t, t+T))} \quad (1)$$

$$C_{in} = \frac{\sigma(D_{in}(t, t+T))}{\mu(D_{in}(t, t+T))} \quad (2)$$

$$\text{Effet Bullwhip} = \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (3)$$

Quatre causes principales du phénomène Bullwhip peuvent être citées (Lee, Padmanabhan, et Whang 1997; Ernawati et al. 2021) :

- L'actualisation des prévisions de la demande.
- Le regroupement des commandes. Le distributeur est confronté à une demande plus volatile que les détaillants à leur petite échelle.
- Les fluctuations des prix. Les promotions par exemple affectent la fluctuation de la demande auprès des distributeurs.
- La gestion d'allocation et des ruptures (*Rationing and Shortage Gaming*). Dans le cas où la demande dépasse le stock disponible, le distributeur ne satisfait qu'un pourcentage de cette demande. Ainsi, les clients tendent vers une augmentation de leurs commandes afin d'assurer un pourcentage suffisant de leur demande.

Ce phénomène implique ainsi une augmentation des stocks dans la SC et une perte de capacité (Li et Disney 2017; Campuzano-Bolarín et al. 2020). C'est pourquoi d'autres mesures comme l'instabilité des stocks est également rattachée à l'évaluation de ces effets (Nguyen, Adulyasak, et Landry 2021; Ernawati et al. 2021).

L'effet Bullwhip est également utilisé pour décrire la distorsion et la désynchronisation de l'information entre les entités de la SC qui sont dues respectivement à l'inadéquation entre les modèles de consommation et les modèles de demande et au manque de coordination entre deux entités quelconque dans la SC (Cannella et al. 2013). Face à des perturbations importantes d'autres phénomènes de propagation ont été constatés comme le Ripple Effect (Dolgui, Ivanov, et Sokolov 2017) mais les méthodes de résolution restent similaires.

Ainsi, favoriser le partage d'information entre les entités de la SC, raccourcir ou modifier la structure de la SC, réduire les coûts fixes de production et de distribution pour pouvoir réduire les tailles de lots, stabiliser les prix sont des approches qui visent à réduire l'effet Bullwhip dans la SC (Campuzano-Bolarín et al. 2020; Ernawati et al. 2021). Particulièrement, le partage des plans de ventes et du calendrier des commandes a montré une réduction notable de l'effet bullwhip dans la SC dans l'étude proposée par (Nguyen, Adulyasak, et Landry 2021).

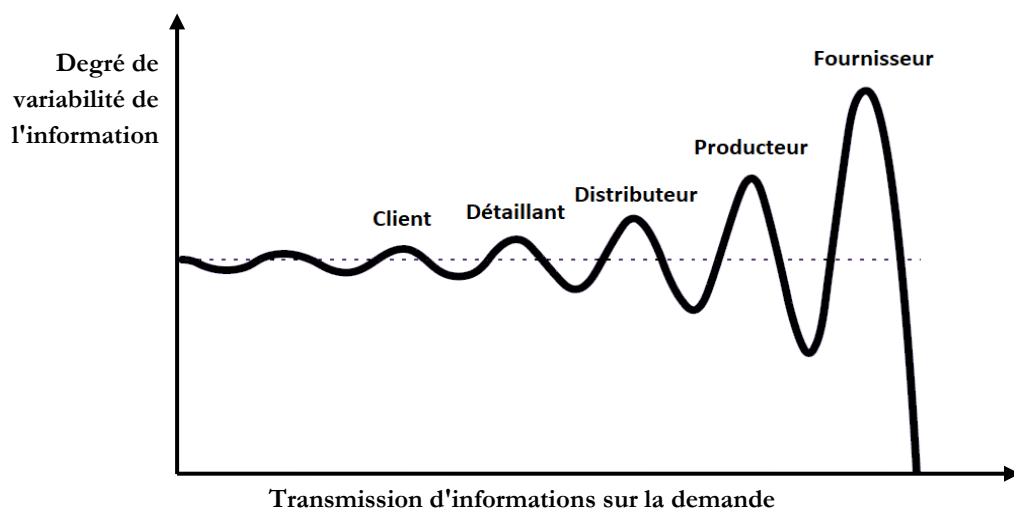


Figure 14. Illustration de l'effet 'Bullwhip' dans une chaîne logistique

5.2.2. Nervosité en planification dynamique à horizon glissant

En horizon glissant, les décisions de planification sont prises sous incertitude car les décideurs au début de chaque cycle de replanification révisent leurs plans en se basant sur les plans transmis en fin de cycle de replanification précédent. Ainsi, au moment de la prise de décision, à une date de planification donnée, toutes les informations ne sont pas connues avec certitude (Gregorio Rius-Sorolla et al. 2021).

La nervosité de la planification de la SC est une conséquence des incertitudes de ces données d'entrée et des paramètres de planification incontrôlables. (Blackburn, Kropp, et Millen 1986) définissent la nervosité comme "l'instabilité des ordres planifiés causée par l'incertitude".

La nervosité reflète l'instabilité des variables de décision dans un plan et est généralement quantifiée par le nombre de changements de ces variables (Ho 1989). (Van Donselaar, Van Den Nieuwenhof, et Visschers 2000) ont également utilisé une deuxième dimension de mesure qui tient compte de la perturbation des quantités. Ils les appellent respectivement "instabilité de la planification orientée

modification" et "instabilité de la planification orientée quantité". Par ailleurs, (Herrera et al. 2016a) incluent dans leur étude différentes mesures d'instabilité de la planification en horizon glissant.

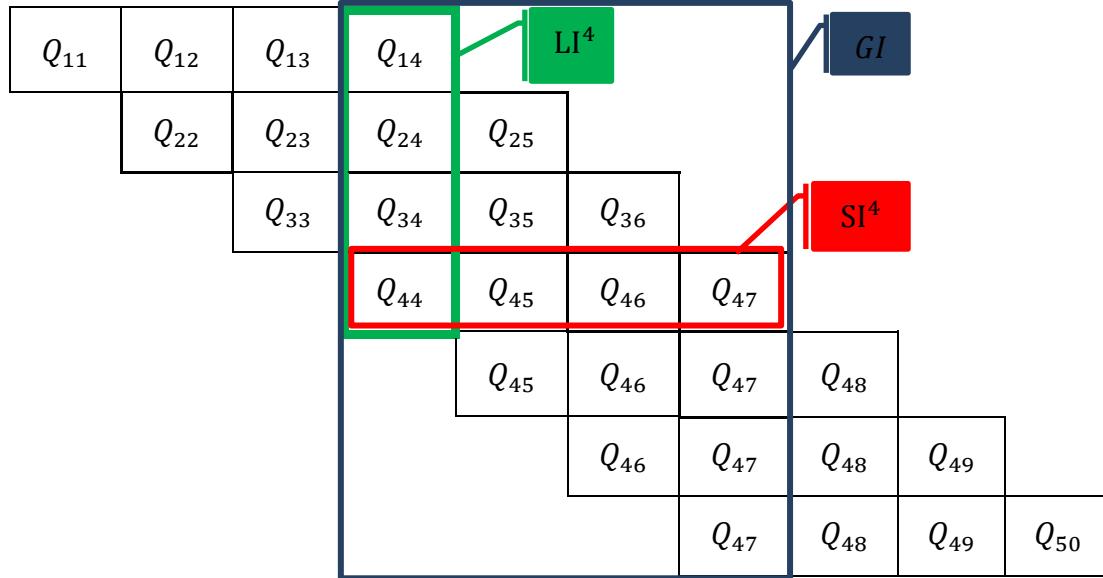
Tout d'abord, une mesure d'instabilité globale (GI) qui concerne les différences entre les quantités cumulées de toutes les périodes de l'horizon de planification. GI représente l'écart absolu moyen de la quantité Q_{ct} à la période t entre deux cycles de replanification successifs (eq (1)). L'instabilité locale (LI^c) se concentre sur la mesure des différences entre la quantité exécutée et les précédentes. LI^c représente l'écart moyen entre la quantité programmée $Q_{(c-t)c}$ au cycle $(c-t)$ et la quantité exécutée Q_{cc} . Enfin, l'instabilité due aux opérations de lissage (SI^c). Cette dernière mesure se réfère à la pire déviation des quantités programmées entre deux périodes successives appartenant au même cycle de planification $|Q_{ct} - Q_{c(t-1)}|$.

$$GI = \frac{\sum_{t=n}^{2n-1} \sum_{c=2}^n |Q_{ct} - Q_{(c-1)t}|}{n*(n-1)} \quad (4)$$

$$LI^c = \frac{\sum_{t=c}^{c+n-1} |Q_{cc} - Q_{(c-t)c}|}{(n-1)}; \forall c \geq n \quad (5)$$

$$SI^c = \max_{t \in [c; c+n-1]} (|Q_{c(t+1)} - Q_{ct}|) \quad (6)$$

La figure 15 montre sur le même graphe les données de l'historique des plans sur quatre cycles de replanification et un horizon de quatre périodes, et les illustrations du périmètre du calcul de chaque type d'instabilité (GI , LI , SI) associés au 4^{ème} cycle de planification.



LI^4 : instabilité locale au cycle 4 ; SI^4 : instabilité due au lissage ; GI : instabilité globale pour un horizon de 4 périodes

Figure 15. Illustration des types de nervosité dans l'historique de planification à horizon glissant de taille $n=4$

L'instabilité est un problème qui concerne toutes les activités de la SCM et touche les différents niveaux de décision, du stratégique à l'opérationnel. (Touzout, Ladier, et Hadj-Hamou 2021) proposent un panel de métriques d'instabilité de planification, de transport et de gestion des stocks pour une application dans des algorithmes de ré-optimisation des problèmes de type IRP (Inventory Routing Problem) face aux incertitudes de la demande.

Par ailleurs, pour la planification tactique de la SC en horizon glissant, les horizons figés, le stock de sécurité, les règles de dimensionnement des lots, le délai de sécurité sont autant de stratégies pour réduire la nervosité dans le système de planification. (Atadeniz et Sridharan 2020) ont étudié l'efficacité des différentes stratégies existantes qui traitent de la nervosité dans le Master Production Schedule sous une demande incertaine dans des systèmes plus complexes (multi-niveaux avec des contraintes de capacité). Leurs résultats expérimentaux ont montré que l'horizon figé réduit l'instabilité, mais il qu'il a un impact négatif sur le taux de remplissage. Cet impact négatif peut être atténué en combinant la stratégie d'horizon gelé avec celle du stock de sécurité.

Cependant, ces stratégies sont déjà intégrées dans les processus de planification des praticiens et ne semblent pas suffisantes, car la fréquence de replanification des MP reste un problème complexe des approches de planification en horizon glissant.

De plus, dans le contexte de la planification à horizon glissant, nous pouvons constater une corrélation significative entre le phénomène d'effet bullwhip dans le SC et la nervosité de la planification. Ainsi, en analysant les calculs des deux phénomènes, nous concluons que l'effet bullwhip peut être considéré comme une amplification de la nervosité de la demande le long de la SC sur l'horizon glissant. Les SC d'aujourd'hui souffrent toujours de ces deux phénomènes qui affectent leur agilité, leur robustesse et leur résilience en augmentant leur vulnérabilité aux incertitudes.

5.2.3. Problématique industrielle : dilemme (Réactivité VS stabilité) en planification collaborative à horizon glissant, sous incertitudes dans les plans transmis

Face aux incertitudes des plans transmis par les autres acteurs, dans le cadre de planification collaborative, un décideur se trouve face à un dilemme qui consiste à choisir entre réagir en appliquant une stratégie d'adaptation ou privilégier la stabilité de ses variables de décision.

En horizon glissant, la décision de replanifier ou pas face à ce dilemme, est complexe puisqu'elle risque d'affecter la stabilité de l'ensemble de la SC (nervosité versus masquer les changements) et de se propager pour s'amplifier aux niveaux amonts (effet bullwhip). Ainsi, cette complexité ralentit les activités de replanification et mobilise un effectif important dans les entreprises.

Dans ce contexte, à l'échelle de la SC dans son ensemble, le dilemme sera entre l'agilité de la SC en déployant des stratégies adaptatives ou la robustesse face aux incertitudes en résistant tout en menant des stratégies de flexibilité (stocks de sécurité, délai de sécurité...) pour maintenir la performance de la SC au niveau souhaité.

Au niveau d'un décideur d'une entité de la SC, nous formalisons notre problématique comme suit :

5.3. Gestion des risques dans la SC (SCRM)

L'intensification de la concurrence et la complexité de la chaîne logistique dans un environnement extrêmement incertain, volatile et dynamique ont pour effet de rendre la SC vulnérable et donc plus sensible aux risques. Ainsi, la gestion des incertitudes et des risques dans la SC est aussi importante.

Dans une SC, la gestion des incertitudes et des risques sont unifiés dans le concept de *Supply Chain Risk Management* (SCRM) (Guillaume 2011). Ce concept représente le domaine global de recherche des travaux de cette thèse. Donc, il semble important de le définir avec ses principaux objectifs et sa démarche générale.

(Gurtu et Johny 2021) définissent la gestion des risques comme « la mise en œuvre de stratégies et de plans visant à gérer les réseaux de la chaîne logistique par une évaluation constante des risques et à réduire les vulnérabilités afin de garantir la résilience des chaînes logistique ».

(Baryannis et al. 2019) proposent une définition synthétique basée sur les définitions fournies dans la littérature et incluant les différentes notions et concepts attachés au SCRM dans celle-ci. Ils considèrent que « Le SCRM englobe les efforts collaboratifs et coordonnés de toutes les parties impliquées dans une chaîne logistique afin d'**identifier**, d'**évaluer**, d'**atténuer** et de **surveiller** les risques dans le but de réduire la *vulnérabilité* et d'augmenter la *robustesse* et la *résilience* de la chaîne logistique, garantissant ainsi la rentabilité et la continuité ».

Ainsi, le processus générale du SCRM porte sur l'identification, l'évaluation, la mitigation et le contrôle des éventuelles perturbations de la chaîne d'approvisionnement et de leurs impacts négatifs (Carvalho Fagundes et al. 2020).

La gestion des risques dans la SC a aussi comme objectif de stabiliser la valeur ajoutée à chaque centre d'activité au long de l'ensemble de la SC (Bogataj et Bogataj 2007). Ainsi, pour y parvenir le SCRM intègre tous les acteurs de la SC dans cette gestion via la collaboration et la coordination (Thun et Hoenig 2011; Carvalho Fagundes et al. 2020; Chaudhuri et al. 2020).

Une implémentation pratique de la gestion des risques de la chaîne logistique améliore non seulement la performance financière de l'entreprise mais aussi l'efficacité de la fabrication et la performance globale de la SC (Thun et Hoenig 2011; Carvalho Fagundes et al. 2020).

5.4. Systèmes d'information de planification et d'aide à la décision au sein d'une SC

5.4.1. Aperçu des systèmes d'information et des technologies existants pour la planification tactique de la SC

Quel que soit le niveau de planification, les plans élaborés doivent satisfaire des objectifs souvent contradictoires dans un environnement très dynamique, d'où la complexité de la prise de décision dans la planification des activités de SC.

De plus, pour pouvoir choisir parmi les options et les alternatives illimitées, le décideur a besoin d'améliorer sa capacité de traitement des données en utilisant des systèmes de gestion des connaissances qui peuvent l'aider à stocker puis à retrouver les informations pertinentes pour évaluer et comparer les performances associées à diverses alternatives (Giannoccaro 2018).

Ainsi, les entreprises s'appuient sur des systèmes d'information pour l'exécution des processus du Master Planning et la synchronisation des activités de la SC. Le rôle de ces systèmes est de permettre aux décideurs de faciliter et améliorer leurs décisions. La prise de décision est toujours effectuée par les planificateurs, qui ont une vision de la chaîne logistique particulière, connaissent les contraintes du système et ont également un sentiment de faisabilité dans les plans qui sont créés. Les planificateurs se chargent également de la modélisation et des décisions concernant l'utilisation des données d'entrée du modèle.

Bien que ces différents systèmes puissent fonctionner seuls, ils donneront de meilleurs résultats s'ils sont combinés.

5.4.1.1. ERP (Entreprise Requirement Planning)

ERP (Entreprise Resource Planning) peut être traduit en français par Progiciel de Gestion Intégré. Comme son nom l'indique, c'est un progiciel qui permet la gestion de l'ensemble des opérations d'une organisation en s'appuyant sur des modules fonctionnels différents connectés à une base commune. Ce système est également un résultat d'évolution des techniques MRP (Material Requirement Planning) et souvent appelé MRPII pour faire la différence avec ce dernier.

L'ERP est défini dans le dictionnaire APICS, 16^{ème} édition comme un « Cadre permettant d'organiser, de définir et de normaliser les processus opérationnels nécessaires pour planifier et contrôler efficacement une organisation afin que celle-ci puisse utiliser ses connaissances internes pour rechercher un avantage externe. Un système ERP fournit de vastes banques de données d'informations, notamment des dossiers de fichiers maîtres, des référentiels de coûts et de ventes, des détails financiers, des analyses de hiérarchies de produits et de clients, ainsi que des données transactionnelles historiques et actuelles ».

Ainsi, le système ERP supporte un calcul automatique basé sur les données stockées dans sa base (Stadtler et Kilger 2008).

Cependant, ce système ne permet pas de traiter les alternatives en planification et se limite à la planification statique d'une seule usine.

5.4.1.2. DRP (Distribution Resource Planning)

DRP (Distribution Requirement Planning) (Martin 1992) est une approche qui dérive de la logique du MRP mais dans un contexte de distribution jusqu'au point de vente qui est en contact avec le client. Il met ainsi le focus sur cet acteur autant qu'acteur principal (Nguyen, Adulyasak, et Landry 2021).

Généralement cette approche est adoptée par les entreprises ayant une stratégie MTS afin d'assurer d'avoir les bonnes quantités en stock au bon endroit dans tout leur réseau de distribution.

Toujours pour atteindre l'objectif global de MP qui est d'équilibrer l'offre et la demande, le DRP est un processus de planification tactique de gestion échelonné dans le temps qui consiste à identifier la demande de stock à chaque emplacement de stockage (entrepôts, centres de distribution...) (Martin 1992).

Taille de lot, délai de livraison et stock de sécurité sont des paramètres principaux des modèles DRP pour le calcul des plans d'approvisionnement selon les stratégies de réapprovisionnements internes (voir revue de (Ben Ammar 2014) sur les stratégies de réapprovisionnement). Ainsi, garder les stocks à un niveau souhaité est l'objectif principal de ces modèles.

5.4.1.3. APS (Advanced Planning Systems)

Un APS (Advanced Planning System), qui se traduit en système de planification avancée, est défini dans le dictionnaire APICS, 15^{ème} édition, comme : « Techniques d'analyse et de planification de la logistique et de la fabrication à court, moyen et long terme. L'APS décrit tout programme informatique utilisant des algorithmes ou une logique mathématiques avancés pour effectuer l'optimisation ou la simulation de l'ordonnancement à capacité finie, de l'approvisionnement, de la planification du capital, de la planification des ressources, des prévisions, de la gestion de la demande et autres ».

(Wang, Zhao, et Zhu 2021) définit aussi l'APS comme « un outil avancé de planification et d'ordonnancement basé sur la théorie des contraintes de la gestion de la chaîne logistique, et implique un bon nombre de modèles mathématiques, d'algorithmes d'optimisation et de technologies de simulation. »

Les APS (Advanced Planning Systems) sont généralement vus comme une extension d'un ERP (Wiers 2002). Ils fonctionnent comme des modules complémentaires mais ils ne le remplacent pas. Ils automatisent la planification de la SC en utilisant les données de l'ERP (Jens Rohde 2005). Dans l'ordre, ils extraient les données de la base de l'ERP, exécute les algorithmes d'optimisation et renvoient les plans résultants en exécution (Rudberg et Thulin 2009).

Les APS compensent certains défauts des méthodes de planification de la production intégrées dans les ERP pour répondre aux besoins des entreprises en matière de planification et d'ordonnancement de la production (Wang, Zhao, et Zhu 2021).

Contrairement aux approches MRP dans les ERP traditionnels, les APS ont la capacité de considérer différentes alternatives et ainsi essaient de trouver des plans réalisables et quasi optimaux en considérant une capacité finie. Aussi, les APS ne partent pas du principe que tous les clients,

produits et matériaux ont la même importance et que certains paramètres (tels que les délais de livraison) peuvent être fixés (David, Pierreval, et Caux 2006).

De plus, les APS ne se limitent pas à la planification et à l'ordonnancement d'une seule usine ; ils s'adressent plutôt aux chaînes logistiques comportant de multiples sites et liaisons de transport. Les systèmes de planification avancés (APS) ont comme objectifs de relever le défi de la coordination globale au sein d'une SC en se basant sur une approche centralisée d'optimisation. Ainsi, l'emplacement de stockage centralisé (Stock Keeping Unit en anglais) est un aspect clé des systèmes ERP pour alimenter l'APS et faciliter la gestion des données et veiller à leur fiabilité.

Le MP (Master Planning) est un module déterministe d'aide à la planification tactique de l'APS. Il est considéré comme un module important pour l'optimisation des activités de la SC (Wang, Zhao, et Zhu 2021). Il permet d'optimiser la SC dans sa globalité en optimisant l'affectation des demandes au sites de tel façon à éviter les goulots (Stadtler et Kilger 2008).

La coordination des plans tactiques générés par ce module est aussi importante pour diminuer dans les quantités de la production et de distribution et donc réduire les stocks.

5.4.1.4. Plateforme collaborative basée sur le Cloud

(Garcia-Neveu 2020) résume l'évolution des systèmes d'information de la SC en trois phases. Une première génération dans les années 80 des gros systèmes utilise des réseaux privés d'entreprises. Une deuxième génération, entre les années 80 et 90, est apparue dans le cadre d'évolution de la technologie des EDI (Échange de Données Informatisées), principalement au niveau des achats et approvisionnements, permettant la transmission des informations via un réseau privé ou public (internet) et selon une structure standardisée. Une troisième génération, dès la fin des années 1990, utilise des plateformes collaborative ou hubs et des ERPs résultant de l'apparition des web-EDI. Ces plateformes permettent de collaborer et partager des informations pertinentes. Depuis 2010, elles évoluent de plus en plus et passent sur le cloud développées et gérées par des sociétés de services externes ("Software as a Service" (SaaS)). Cette évolution continue aujourd'hui vers l'intégration de la technologie de décentralisation du partage de données (block chain par exemple).

Ces différents systèmes et technologies sont généralement caractérisés par un usage parallèle et souvent complété par les outils traditionnels de coordination et d'échange d'information (mail, spreadsheets, téléphone, fax ...).

Les entreprises recourent, de plus en plus, à des technologies basées sur le cloud pour la collaboration et le partage des informations au sein d'une SC, surtout pour des SCs globales et complexes (Mei et al. 2021; Andres, Poler, et Sanchis 2021). Dans une SC globale regroupant des organisations possédant des systèmes d'information différents selon le type de leurs activités locales (Exemple : DRP, MRP, SAP...), les plateformes collaboratives permettent de faire le lien entre ces différents systèmes. Cette technologie est caractérisée principalement par sa scalabilité (« est la

capacité d'étendre la capacité de distribution des services de traitement en augmentant la quantité d'informations fournies » (Belgaum et al. 2021)).

De plus, les entreprises adoptent des plateformes Cloud afin d'automatiser les processus de planification collaborative et le partage d'information au lieu des méthodes traditionnelles basées sur l'échange de fichiers et des tableurs (spread Sheets).

Parmi les exemples de cette évolution, il y a la plateforme ERP (Enterprise Resource Planning) basée sur le cloud (Cloud-based ERP) est une tendance qui vise à faciliter la collaboration entre les petites et moyennes entreprises (PME) dans la SC industrielle (Chen et al. 2017 ; Paksoy, Kochan, et Ali 2020).

« La recherche en planification industrielle est encouragée par la résolution de problèmes concernant l'échange, le partage et le stockage d'informations dans des environnements collaboratifs cloud » (Andres, Poler, et Sanchis 2021).

Ainsi, les travaux de cette thèse portent sur l'aide à la décision au sein d'une SC basée sur une plateforme cloud pour la planification collaborative. Ce contexte est flexible et facilite également l'implémentation et les interactions de nouvelles solutions avec les systèmes de l'entreprise via le partage de données dans le cloud. (Serrano, Delorme, et Dolgui 2021) ont par exemple effectué des tests numériques '*offline*' des modèles d'optimisation dans le cadre de la SC de 'Renault' basé sur une plateforme cloud qui relie les usines d'assemblage éloignées aux fournisseurs de premier rang.

Ainsi, le contexte industriel que nous considérons dans cette thèse est un environnement bénéfique et favorable pour une future implémentation effective des solutions proposées.

5.4.2. L'humain est au centre du processus de décision ... limites des systèmes d'aide à la planification actuels face aux incertitudes

... « La décision avant tout une affaire d'Homme » (Marquès 2010)... le comportement humain est donc un facteur majeur qui conditionne la qualité de cette décision.

La décision consiste en un choix parmi plusieurs d'alternatives. Ainsi, les systèmes d'aide à la décision supportent ce décideur dans le choix entre ces alternatives qui peuvent être nombreuses. (Teniwut et Hasyim 2020) définit un système d'aide à la décision comme un guide permettant au décideur de sélectionner les meilleures options afin d'augmenter l'efficacité, le profit et taux de service de la SC. Toutefois, la décision finale est réservée au décideur. Ce qui est sûr et primordial pour la réussite de cette collaboration entre l'humain et la machine c'est la compréhension par le décideur du mécanisme et des indicateurs fournis par le système. Ainsi, il peut faire une bonne interprétation de ces indicateurs et par conséquent prendre des décisions et mettre en place des actions convenables.

Certes, l'implication de l'humain est très importante dans le processus de prise de décision, mais il peut aussi être une source de plus d'incertitude et par conséquent de risques. D'ailleurs, le risque et

la décision sont indissociables dès que les données d'entrée sont basées sur des prévisions dans un environnement dynamique.

D'autre part, parfois, le décideur peut « surréagir » face à une situation, suite à une surestimation de la continuité de son impact, ou le contraire dans le cas d'une « sous-estimation » (Stadtler et Kilger 2008). Aussi, contrairement aux machines programmées impliquant les mêmes résultats face aux mêmes entrées, le comportement humain est imprévisible ainsi que ses décisions même face à des situations semblables. Le facteur d'accumulation d'expérience peut aussi impacter l'objectivité de la décision. L'expérience d'un décideur peut jouer un rôle favorable sur la qualité de la décision ou encore un rôle défavorable en cas de perte de confiance dans les données des autres partenaires dans la SC (Lorentz et Hilmola 2012).

... Ainsi, la pertinence de la démarche d'aide à la décision est un vrai challenge.

Le processus de prise de décision doit converger vers le choix d'une solution déterminée. Cependant, le principe des systèmes d'aide à la décision basé sur la proposition de « la meilleure » solution est un sujet de débat sans fin sur la qualité des critères considérés. Fournir aux décideurs beaucoup d'informations peut être aussi un frein au moment de la décision. (Marquès 2010) résume que la démarche de prise de décision est pertinente en cas de bon compromis entre deux éléments :

- ✓ L'enrichissement de la connaissance du décideur sur sa situation. Le décideur doit être informé de l'action dominante et des hypothèses qui explicitent sa dominance selon plusieurs critères.
- ✓ La capacité limitée du décideur à intégrer un grand nombre d'informations pour la prise de décision.

Dans le cadre de cette thèse, nous insistons sur le fait que le décideur est le moteur et le centre du processus de décision. Nous considérons donc un système d'aide à la décision comme un *système d'information*, supportant un *décideur* à effectuer un *processus de décision* pour atteindre un *objectif* déterminé (Oger 2019).

... Les systèmes d'information actuels sont dédiés à la planification déterministe et la gestion de l'incertitude est une limitation majeure de ces systèmes (Stadtler et Kilger 2008)

Les systèmes de planification avancés (APS) sont bien cohérents avec le contexte de la planification déterministe. Ils sont de plus en plus avancés et intègrent plus de critères pour générer des décisions plus pertinentes. Ils respectent bien, ainsi, la contrainte de capacité limitée du décideur à intégrer beaucoup d'informations. Cependant, l'environnement réel de planification de la SC est incohérent avec cette hypothèse déterministe. Les incertitudes viennent des deux côtés de la SC, du côté des fournisseurs (des approvisionnements peu fiables, risques opérationnels en production...), du côté des clients (demande inconnue basée sur des prévisions, fluctuations du marché...), du côté des processus internes (non-qualité, pannes, etc) et du côté managérial (changement d'orientation ou de stratégie).

Ainsi, l'enrichissement de la connaissance du décideur sur son environnement incertain et dynamique et l'intégration de cette connaissance dans son processus de décision reste une vraie limitation dans l'aide à la planification proposée actuellement. La planification déterministe à horizon glissant est un moyen courant utilisé dans les systèmes d'information d'aide à la planification pour faire face aux incertitudes. Cependant, cela reste une approche réactive qui amplifie aussi certains événements, comme la nervosité du système de planification, qui menacent la stabilité de la SC. Ainsi, les systèmes APS sont connus pour avoir tendance à produire de la nervosité en raison de leur approche réactive face aux perturbations (Atadeniz et Sridharan 2020).

Par ailleurs, les techniques mises en avant dans les systèmes APS consistent en une optimisation centralisée de tous les éléments de la SC. Malheureusement, les modèles de décision actuels ne sont pas toujours compatibles avec l'approche de prise de décision centralisée ; (Ogier et al. 2015; Sahin et Robinson 2002) ; et n'utilisent pas efficacement toute la capacité de partage d'informations de la base de données ERP (Sahin et Robinson 2002).

Par conséquent, l'alignement global dans les systèmes APS affecte l'indépendance des différentes entités dans le réseau de la SC (F. Galasso, Mercé, et Grabot 2009).

En plus, (Oger 2019) résume quatre limites principales, identifiées dans la littérature , qui touchent plus à la consommation du temps et la flexibilité des modèles des systèmes d'information utilisés actuellement dans les entreprises :

- Nombre de scénarios d'alternatives considérés pour dérouler les processus de planification est faible.
- Difficulté de mise à jour des modèles d'analyse de planification de la SC surtout quand il s'agit des changements structurels.
- Absence de prise en compte d'options de décisions liée aux structures de la SC. Les solutions existant dans ces systèmes concernent des SC prédéfinies sans prendre en compte d'autres structures alternatives potentielles de la SC.
- Difficulté d'acceptation de la part des décideurs des solutions apportées par les méthodes des APS basées sur l'optimisation centralisée.

... Utiliser les fonctionnalités fournies par les systèmes d'information actuels pour enrichir les informations sur les incertitudes est une direction potentielle de recherche

Les systèmes de planification en entreprise fournissent des fonctionnalités très importantes (collecte, traitement, stockage et distribution de l'information) qui peuvent être utilisées pour enrichir les informations d'un décideur sur son environnement incertain ou encore sur les types des comportements adoptés par ces collaborateurs dans la SC. Ces informations (i.e. historique de planification à horizon glissant) peuvent être capitalisées afin de modéliser les différents types d'incertitudes dans la SC et de les utiliser pour aider le décideur à adopter une approche proactive qui intègre les incertitudes dans son processus de décision.

6. Conclusion : positionnement du contexte et de la problématique industrielle

Dans ce chapitre nous avons présenté deux éléments principaux. D'abord, tous les éléments du contexte de gestion et planification de la SC qui nous permettent de positionner notre problématique et le contexte industriel (cas de 'Pierre Fabre Dermo-Cosmétique'). Nous avons ensuite détaillé les problèmes et effet des incertitudes dans un contexte de planification à horizon glissant et ainsi positionné le problème industriel que nous adressons dans cette thèse. Ensuite, nous avons proposé une synthèse sur des systèmes d'information et les technologies de partages d'information utilisées dans les entreprises et leurs limites face aux incertitudes.

Le tableau 1 résume le résultat du positionnement du contexte industriel par rapport à l'ensemble des éléments de contexte que nous avons détaillés dans ce chapitre.

Une SC internationale (GSC) / GSCM (Global Supply Chain Management)					
Structures de la SC					
Série	Convergente	Divergente <i>SC interne</i>	Dyadique	Réseau	
Stratégie de gestion des flux					
ETO	MTO	ATO		MTS	
Niveau de planification					
Stratégique		Tactique <i>Master Planning</i>		Opérationnel	
Approche de prise de décision dans la SC					
Centralisée	Décentralisée <i>Contexte industriel</i>		Réactive <i>‘As-Is’</i>		Proactive <i>‘To-Be’</i>
Collaboration dans la SC					
À deux niveaux	Multi- niveaux	Contrats ...	CPFR	Échange de plans <i>Processus de planification collaborative et coordination dynamique en horizon glissant</i>	Négociation

Tableau 1. Positionnement du contexte industriel

Nous considérons une SC divergente pour analyser les processus et problèmes de planification de distribution (DRP) et d'approvisionnement dans une SC internationale (Global SC). Cette SC multi-acteurs est décentralisée (chacun prend ses décisions de façon indépendante) gérée en Make-To-Stock et basée sur une plateforme collaborative Cloud connectant les systèmes d'information locales des différents acteurs de la SC (usine, CDC (Centre Distribution Centrale), CDL (Centre Distribution locale)). Nous nous intéressons au niveau tactique de planification qui vise à

synchroniser le flux au long de toute la SC. Les acteurs de la SC sont directement impliqués dans une relation client-fournisseur (collaboration à deux niveaux) de la SC. Ils collaborent selon un processus de planification collaborative basé sur un échange de plans de demande/approvisionnement en horizon glissant.

Suite à l'analyse des effets des incertitudes sur la SC, nous focalisons sur le dilemme stabilité-réactivité comme un problème principal de la planification en horizon glissant face aux incertitudes ce qui rend la décision de replanification difficile au décideur. Ainsi, nous formalisons la **problématique industrielle** de cette thèse comme suit :

Comment aider un décideur à limiter la nervosité de sa planification en horizon glissant face aux incertitudes ?

L'analyse des systèmes d'informations utilisés dans les entreprises nous permis d'identifier les principales limites de ces systèmes face à ce problème : en termes de (i) gestion des incertitudes et (ii) leur approche réactive favorisant le problème de nervosité de planification en horizon glissant. Ainsi, nous avons pu formuler et introduire notre **problématique de recherche** comme suit :

Comment intégrer les incertitudes dans le processus de prise de décision déterministe d'un planificateur pour l'aider à replanifier ?

L'intégration des incertitudes permet au décideur de passer d'une approche réactive (nervosité importante) vers une approche proactive (aidera le décideur à chercher le bon compromis stabilité-performance (robustesse)).

CHAPITRE II. AIDE A LA PLANIFICATION TACTIQUE DE LA SC SOUS INCERTITUDE

1.	Introduction.....	49
2.	Classification des travaux de planification tactique de la SC sous incertitude.....	49
2.1.	Sources d'incertitude dans la planification de la SC	50
2.1.1.	Analyse des revues de la littérature	50
2.1.2.	Positionnement	51
2.2.	Approches de modélisation des incertitudes.....	52
2.2.1.	Représentations des connaissances imparfaites.....	52
2.2.2.	Choix d'utilisation des ensemble flous et de la théorie de possibilité.....	54
2.2.3.	Positionnement : première question de recherche	55
2.3.	Approches de gestion de l'incertitude	56
2.3.1.	Application de la démarche de gestion des risques	56
2.3.2.	Réduction d'occurrence des risques à la source.....	57
2.3.3.	Stratégies de maîtrise des impacts des risques	57
2.3.4.	Approches quantitatives pour supporter la maîtrise des risques ...	58
2.3.5.	Positionnement : Deuxième et troisième questions de recherche .	62
2.4.	Caractéristiques du problème étudié.....	62
2.4.1.	Analyses des revues de littérature	62
2.4.2.	Positionnement : quatrième question de recherche	63
3.	Aide à la planification tactique sous incertitude.....	64
3.1.	Outils d'aide à la planification.....	64
3.1.	Aide à la planification en horizon glissant	66
3.2.	Conclusion	68
4.	Conclusion	68

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons pu positionner la problématique industrielle de cette thèse liée à la complexité de la replanification à horizon glissant face aux incertitudes. De plus, nous avons introduit la problématique de recherche : l'intégration des incertitudes dans le processus de décision des planificateurs de SC pour à la fois enrichir leurs informations incomplètes, et capitaliser ces informations pour les aider à augmenter leur proactivité dans le cadre de la planification à horizon glissant.

Dans ce chapitre, nous examinons la littérature de la planification sous incertitude afin d'identifier les principales limites et directions de recherche, de positionner notre travail et d'identifier les questions de recherche que nous adresserons par la suite.

Dans ce sens, nous présentons une analyse des travaux de planification avec incertitude. Nous détaillons les différents critères de classification dans le domaine, les limites associées à chaque critère ainsi que notre positionnement et nos motivations suite à ces analyses. Dans une seconde partie, nous nous intéressons principalement à l'état de l'art des travaux sur l'aide à la planification tactique. Les travaux traitant particulièrement de l'aide à la décision en horizon glissant et les systèmes interactifs d'aide à la décision sont considérés. Enfin, la dernière partie récapitule notre positionnement par rapport aux travaux dans le domaine de la planification sous incertitude.

2. Classification des travaux de planification tactique de la SC sous incertitude

Plusieurs revues de la littérature existent dans le domaine et ont utilisé des critères différents pour classer les travaux relatifs à la planification de la SC sous incertitude. Sur la base d'une sélection de 10 revues réalisées sur la période 2006-2020, nous proposons une fusion des critères utilisés pour intégrer les différentes dimensions permettant de classer les travaux de littérature et donc de nous positionner. Nous proposons ainsi cinq critères principaux (tableau 2).

Critères	Types	Revues
(C1) Niveau de décision	• Stratégique • Tactique • Opérationnel	(Peidro et al. 2009; Kumar et al. 2020)
(C2) Source d'incertitude	• Demande • Processus • Approvisionnement	(Dolgui et Prodhon 2007a; Peidro et al. 2009; Simangunsong, Hendry, et Stevenson 2012; Dolgui et al. 2013; Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Baryannis et al. 2019)

(C3) Approche de modélisation des incertitudes	• Déterministe • Aléatoire ○ Approche par scénarios (discret) ○ Approche par intervalles (Continu) ○ Approche stochastique (continu/discret) • Floue	(Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019; Kumar et al. 2020)
(C4) Approche de gestion des incertitudes	• Réduction des incertitudes • Flexibilité/ agilité • Modèles quantitatifs : ○ Flou ○ Stochastique ○ Simulation ○ Métaheuristique ○ Raisonnement approché • Mitigation des risques	(Mula, Poler, Garcia-Sabater, et al. 2006; Peidro et al. 2009; Simangunsong, Hendry, et Stevenson 2012; Baryannis et al. 2019; Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019; Jamalnia et al. 2019; Kumar et al. 2020)
(C5) Caractéristiques du problème étudié	• Nombre d'objectifs • Nombre d'articles • Nombre de périodes • Stages SC ...	(Dolgui et Prodhon 2007a; Dolgui et al. 2013; Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019; Kumar et al. 2020)

Tableau 2. Critères de classification des travaux sur la planification sous incertitude de la SC

Le premier critère de classification des travaux de planification sous incertitude est le niveau de planification concerné (stratégique, tactique ou opérationnel), que nous avons détaillé au premier chapitre. Dans les sous-sections suivantes, nous détaillons chacun des autres critères du *tableau.1* dans l'ordre (C2, C3, C4, C5), en nous concentrant sur le niveau tactique de la planification.

2.1. Sources d'incertitude dans la planification de la SC

2.1.1. Analyse des revues de la littérature

Les sources d'incertitude sont nombreuses dans la planification de la SC. Ainsi, les travaux de la littérature sur les problèmes de planification sous incertitude peuvent être classés en fonction des paramètres ou des données d'entrée de planification adressés comme sources d'incertitude dans ces problèmes ((C2) du tableau 1).

La demande et les approvisionnements planifiés sont deux entrées principales du processus de planification d'une entité de la SC. Les paramètres liés au processus interne de cette entité sont aussi importants à contrôler afin d'assurer la fiabilité des plans générés de la planification.

Ainsi, les sources d'incertitude sont généralement classées en trois catégories dans la littérature (demande, processus, approvisionnements). (Baryannis et al. 2019) précise que les incertitudes sur la demande et les incertitudes sur les approvisionnements sont des sources d'incertitudes internes de la supply chain mais externes par rapport l'entité elle-même. En revanche les incertitudes liées au process (incertitudes sur la performance des opérations, incertitudes sur la qualité, défaillance du système et changements dans la structure du produit ...) sont internes à l'entité.

(Dolgui et Prodhon 2007a) ajoutent que ces incertitudes peuvent être liées aux quantités planifiées ou aux délais ou aux deux. Ainsi, quatre catégories de sources d'incertitude sont listées plus en détails :

- 1/ Les incertitude du client qui modifie la date de la commande (Dates de commande incertaines).
- 2/ La variabilité de la demande du client (quantité demandée incertaine).
- 3/ Les incertitudes sur les délais de production (processus) et d'approvisionnement.
- 4/ Les incertitudes sur la quantité de livraison/approvisionnement.

Dans ce sens, (Ben Ammar 2014) propose une revue, plutôt au niveau du MRP (Material Requirement Planning), dans laquelle il classe les travaux existants en trois catégories : 1/ les travaux considérant une demande incertaine, 2/ les travaux considérant une demande et délai approvisionnement incertains, 3/ les travaux considérant que le délai d'approvisionnement comme incertain. Dans cette classification, l'incertitude sur la quantité de d'approvisionnement n'est pas prise en compte, car les travaux qui considèrent cette dimension sont rares.

Les résultats de l'analyse détaillée de la littérature, que ce soit celle de (Peidro et al. 2009), (Guillaume 2011), (Sahin, Narayanan, et Robinson 2013) ou (Ben Ammar 2014) ou encore celle plus récente de (Baryannis et al. 2019) ou (Jamalnia et al. 2019), parviennent à la même conclusion qu'il y a une concentration de travaux sur les incertitudes sur la demande et que peu de travaux prennent en compte différentes sources d'incertitudes en même temps.

Pour les incertitudes sur les approvisionnements, il existe des travaux qui se concentrent sur l'incertitude sur les délais, mais il est rare de trouver des travaux considérant les incertitudes sur la quantité d'approvisionnement (Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Tinani et Kandpal 2017; Jabbarzadeh, Fahimnia, et Sheu 2017). Parmi ces travaux, nous trouverons (Guillaume, Grabot, et Thierry 2013) qui considèrent une capacité imprécise ou des travaux très récents comme (Lima, Relvas, et Barbosa-Póvoa 2021) qui se concentrent sur les problèmes de planification tactique (Master Planning) et considèrent à la fois les incertitudes sur les quantités de demande et d'approvisionnement. (Ghasemy Yaghin et Darvishi 2021) considèrent trois sources d'incertitudes à la fois (demande, temps des opérations et capacité).

Parmi les travaux récents, (Attia 2021; Pudasaini 2021; Almeida et al. 2021; Touzout, Ladier, et Hadj-Hamou 2021) ne considère qu'une seule source d'incertitude qui est la demande. (Fathi et al. 2021) considèrent plutôt le délai de livraison et la demande. (Suryawanshi et Dutta 2021) considèrent également les incertitudes sur la demande mais aussi les incertitudes du processus en termes de quantité (détérioration/qualité du produit).

2.1.2. Positionnement

Motivés par les différentes analyses de la littérature présentées dans cette partie, mais aussi par l'importance de la gestion des incertitudes au niveau tactique bien soulignée dans (Dolgui et

Prodhon 2007a; Herrera et Thomas 2009; Ben Ammar 2014; Herrera et al. 2016b), nous focalisons travail sur la planification tactique en considérant à la fois les incertitudes sur la demande (plan partagé par le client) et sur les approvisionnements (plan partagé par le fournisseur).

Cette prise en compte est effectuée dans un contexte d'une SC interne décentralisée basée sur un partage des plans de demande/approvisionnement. Dans ce contexte nous considérons le problème industriel de replanification en horizon glissant et la propagation de la nervosité des plans dans le cadre de ce partage. Nous focalisons donc sur la zone de compromis (horizon flexible), la plus concernée par le problème de nervosité des décisions des acteurs de la SC, afin d'augmenter la proactivité d'un décideur. Ainsi, nous négligeons les incertitudes liées à l'opérationnel (processus) impactant plutôt les exécutions des plans en interne de chaque entité au début de chaque horizon de planification

2.2. Approches de modélisation des incertitudes

2.2.1. Représentations des connaissances imparfaites

La connaissance que nous avons de tout système interférant avec son environnement est généralement imparfaite (El-Shayeb, Verdel, et Didier 1999).

L'imperfection englobe l'incertitude (doute sur la validité d'une connaissance), l'imprécision (impossibilité de dénoncer une connaissance sûre et précise), et l'incomplétude (absence de connaissance, ou connaissance partielle de certaines caractéristiques) (Bouchon-Meunier, Yager, et Zadeh 1995; Dubois et al. 2005; Guillaume 2011).

Cette imperfection est intrinsèque dans les processus de planification. En effet, la planification de la SC porte sur la prise de décision anticipée sur un horizon de temps futur. Au moment de sa prise de décision, un décideur possède des informations incomplètes sur des bouts d'horizon. Ainsi, à une date donnée, il se base sur des données incertaines et des paramètres imprécis pour l'élaboration de ses plans (Liang 2006; Liang 2011).

La modélisation des incertitudes est une étape importante pour les prendre en compte et les intégrer dans le processus de planification afin de les gérer (François Galasso 2007).

Le choix de l'approche de modélisation ou la représentation adéquate des incertitudes est très corrélé à l'environnement considéré, aux données à disposition mais aussi au choix de l'approche adoptée pour le traitement de ces modèles. Dans la littérature, différentes approches peuvent être identifiées :

- La première approche suppose que les paramètres incontrôlables de planification sont connus ou fixés au préalable de la planification (Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019; Kumar et al. 2020).
- Ces paramètres incontrôlables peuvent être représentés par des intervalles. Il s'agit de la représentation la plus simple de l'incertitude (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017). Dans cette représentation, un intervalle fermé est attribué à chaque variable, ce qui signifie que

sa valeur possible prend une valeur dans l'intervalle, mais qu'il n'est pas possible de prédire laquelle. Ici, une approche discrète à base de scénarios peut exister. Dans ce cas, la représentation par intervalle revient à exprimer que ces scénarios sont tous aussi vraisemblables.

- Si les paramètres incontrôlables sont continus ou discrets et que leurs probabilité est connue il s'agit d'une approche stochastique pour la représentation des incertitudes (Birge et Louveaux 2011). Ces variables sont représentées avec une distribution de probabilité continue ou discrète selon la nature des variables. Par ailleurs, on trouve aussi dans cette catégorie des représentations à base de scénario, chaque scénario ayant une probabilité. Cela peut correspondre à des approches de type Monte-Carlo où les scénarios sont issus de combinaison de valeurs de différentes variables, valeurs tirées d'après la distribution de probabilité des variables aléatoires (Baležentis et Streimikiene 2017).
- Enfin, les ensembles flous peuvent être utilisés pour représenter différentes formes d'incertitude (Grabot et al. 2005). Ils peuvent représenter une flexibilité (contraintes élastiques) (voir (Dubois, Fargier, et Fortemps 2003; Mula, Poler, et Garcia 2006)), une préférence (voir (Dubois, Prade, et Touazi 2013)) ou une incertitude. La différence entre flexibilité et incertitude est détaillée dans (Dubois, Fargier, et Fortemps 2003) pour des problèmes de coordination en production. La fonction d'appartenance d'un ensemble flou est interprété comme une distribution de possibilité (L. A Zadeh 1978). « une distribution de possibilités représente le niveau d'information d'une personne par rapport à certaines circonstances possibles, soit les circonstances présentes, soit les circonstances typiques » (Lima, Relvas, et Barbosa-Póvoa 2021).

Une distribution de possibilité est une fonction $\pi: S \rightarrow [0,1]$ de l'espace S dans l'intervalle $[0,1]$. Avec $\pi(v) = 1$ est un des éléments de S minimum.

(Hawer, Schönmann, et Reinhart 2018) proposent un guide utile pour modéliser l'incertitude en fonction du contexte et des données disponibles. Ce guide est un organigramme sous la forme d'un questionnaire avec des questions à réponse "oui" ou "non". Il agrège les différentes techniques de modélisation et attribue le domaine théorique pertinent aux résultats. Trois domaines sont différenciés dans leurs proposition : La théorie des ensembles flous, les intervalles et la théorie des probabilités.

Dans le domaine de SCRM (Supply Chain Risk Management), l'approche stochastique basée sur des scénarios est la plus populaire (Baryannis et al. 2019). La définition du risque était initialement rattachée aux probabilités. Toutefois cette définition est devenue beaucoup plus générique aujourd'hui pour englober toute les représentations possibles des incertitudes (Guillaume 2011) selon la nature des données à disposition.

Dans notre travail nous optons pour une représentation basée sur les ensembles flous et la théorie de possibilité dont le choix est justifié ci-après.

2.2.2. Choix d'utilisation des ensemble flous et de la théorie de possibilité

Il est possible de se demander : ***pourquoi utiliser les ensembles flous et la théorie des possibilités ?***

La réponse peut être formulée comme suit : ***" Il vaut mieux être pertinent que précis "*** (Lotfi A. Zadeh 1965). Plus l'information est imprécise, plus elle est certaine : si nous donnons l'ensemble des valeurs possibles, il sera certain que la variable prendra l'une de ces valeurs. De plus, " La logique floue et la théorie des possibilités ont montré leur intérêt dans un large éventail de problèmes où l'incertitude peut être évaluée subjectivement " (Grabot et al. 2005).

La théorie des possibilités est introduite par Zadeh en 1978. Elle permet de traiter l'imprécision et de considérer, en même temps, le caractère incertain de l'information. Les incertitudes considérées par cette théorie sont non probabilistes : l'hypothèse est la probabilité de leur occurrence ne peut être évaluée. L'avantage de ce formalisme par rapport aux probabilités est sa capacité à représenter l'ignorance et les informations incomplètes.

La théorie des possibilités et la théorie des probabilités ont été étendues dans une théorie commune qui est la théorie de l'évidence (Yager et Liu 2008).

La théorie de la possibilité peut être envisagée à travers la notion d'ensembles flous. Les ensembles flous sont introduits par L.A. Zadeh en 1965. (Bouchon-Meunier 2007) affirme que les ensembles flous présentent, au moins, deux intérêts principaux. Le premier intérêt est de modéliser une connaissance imprécise (approximation : il mesure environ 75,5 m) ou vague (il est grand). Le second est que les ensembles flous permettent de traiter les connaissances numériques (issues d'un instrument) et les connaissances exprimées symboliquement par un observateur (compétences en langage naturel).

La théorie des possibilité et les ensembles flous permettent donc de modéliser des incertitudes en cas d'insuffisance de données pour déterminer une distribution de probabilité (Guillaume, Thierry, et Grabot 2011). Un ensemble flou permet ainsi de représenter un ensemble de distributions de probabilités comprises dans ses bornes. Il peut ainsi représenter une incertitude sur une distribution de probabilités (Garg et Kaur 2020).

Pourquoi utiliser les ensembles flous/ la théorie des possibilités dans la planification de la SC et plus précisément en planification à horizon glissant ?

Généralement, dans la planification de la SC, certains types de paramètres (saisonnalité, tendance de demande, capacité, temps de traitement ...) sont imprécis et ne peuvent pas être connus avec certitude. Si ces paramètres sont stables sur des historiques suffisants, des statistiques de fréquence permettent d'en estimer une distribution de probabilité. Si l'historique est faible, « Il n'est pas approprié de décrire ces types d'incertitudes par une distribution de probabilité basée sur la fréquence » (Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019).

Particulièrement, dans notre contexte de planification à horizon glissant les décideurs replanifient leurs activités dans l'incertitude en attendant les informations actualisées des autres acteurs dans les prochains cycles. Ainsi, ils se basent sur des informations incomplètes ou imprécises qui seront peut-être précisées dans les cycles de planification futurs (Liang 2006; F. Galasso et Thierry 2009).

Dans les modèles de planification déterministes basés sur une révision périodique en horizon glissant, les plans des autres acteurs sont supposés être connus avec certitude au préalable de la planification au début d'un cycle de planification. Cependant, ces hypothèses ne sont pas cohérentes avec les caractéristiques réelles des plans transmis et le comportement des autres acteurs dans l'horizon glissant. (Khellaf, Lamothe, et Guillaume 2020) analysent le glissement de plans issu d'un acteur pour identifier des horizons où les variabilités des plans transmis sont différentes. Pour chacun de ces horizons des encadrements de l'incertitude sont produits et permettent d'en définir une représentation par intervalle ou floue.

Autre part, pour obtenir une distribution de probabilité, un historique très important est nécessaire pour que les différentes situations se soient suffisamment posées. Aussi, l'application des modèles stochastiques reste problématique à cause de : « *lack of computational efficiency and inflexible probabilistic doctrines which might not be able to model the real imprecise meaning of decision maker* » (Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019). Contrairement aux approches basées sur les ensembles flous qui sont en mesure de prendre en compte les dire d'expert (Ghasemy Yaghin et Darvishi 2021).

2.2.3. Positionnement : première question de recherche

Dans notre contexte, la théorie des ensembles flous est appropriée pour modéliser l'imprécision et l'incomplétude des plans partagés par les autres acteurs de la SC du fait de l'insuffisance de données pour générer des distributions de probabilité. Aussi, l'utilisation de la théorie des ensembles flous va permettre d'intégrer à la fois les incertitudes sur les données ayant servi à produire le plan transmis par un acteur dans la SC (volatilité des marchés) mais, aussi sur le comportement décisionnel du partenaire (lissage, priorités, politique de sécurité, aversion ou pas au risque, etc.). Surtout, parce que l'utilisation de ces approches est particulièrement fréquente dans le domaine où le jugement humain, son évaluation et ses décisions sont importantes (Bellman et Zadeh 1970; Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019).

Cependant, « il est difficile d'expliquer intuitivement le flou à des chefs d'entreprise qui n'ont que peu ou pas de connaissances en mathématiques » (Jamalnia et al. 2019). Ainsi, nous formalisons notre première question de recherche pour répondre à ce problème :

Première question de recherche (QR1)

Comment intégrer la connaissance d'un expert sur les incertitudes dans les plans transmis par les autres acteurs du SC (demande & approvisionnement) y compris les comportements de ces acteurs, avec une modélisation basée sur des ensembles flous ?

2.3. Approches de gestion de l'incertitude

(Simangunsong, Hendry, et Stevenson 2012) identifient dans la littérature deux types d'approches de gestion de l'incertitude. Soit réduire l'incertitude en agissant directement sur sa source, soit y faire face en réduisant son effet sur les activités de la chaîne logistique sans influencer sa source.

Dans le cadre d'une démarche de gestion des risques pour la planification de la SC, réduire les incertitudes à la source revient à réduire la probabilité/l'occurrence du risque. Par ailleurs, réduire l'effet des incertitudes revient à réduire l'impact du risque en appliquant des stratégies de mitigation des risques ou des stratégies permettant de maîtriser leur impact en s'appuyant sur des modèles quantitatifs pour soutenir la décision sous incertitude.

2.3.1. Application de la démarche de gestion des risques

Le cadre méthodologique pour faire face aux incertitudes est celui des démarches de gestion de risques. Une démarche de gestion des risques comporte généralement 4 étapes : sur l'identification, l'analyse, l'évaluation et le traitement des risques (ISO31000 : 2018).

Différents outils peuvent être utilisés pour mener chaque étape de la démarche (Marquès 2010). Pour la définition des risques à gérer dans une SC, il est possible de se référer à une opinion d'expert, à l'analyse d'événements passés ou à l'analyse des opérations (audit, VSM, SCOR...) selon le type de problèmes adressé.

Selon les critères et l'environnement incertain considérés, l'analyse des risques peut être basée sur une approche qualitative (nature des risques, dépendance entre les risques...) et/ou quantitative basée sur l'analyse de scénarios et la mesure des risques (probabilité x impact).

De même, l'évaluation des risques peut se baser sur différentes approches (analyse AMDEC, classification ABC (Pareto) ou matrice de risques...) pour évaluer la criticité des risques et leur priorité de traitement.

Enfin, le traitement ou la mitigation des risques dans la SC implique le développement et l'évaluation de différentes stratégies de mitigation en termes de valeur potentielle et d'investissements requis. (Tarei, Thakkar, et Nag 2021) résument six stratégies principales :

- Ignorer : une stratégie rare utilisée quand le risque ne peut pas être étudié ou que son impact est trop minime.
- Accepter : adaptée quand le coût d'action de gestion de risque est plus important que son impact ou pas assez de temps pour élaborer l'action.
- Contrôler : plus adaptée aux problèmes opérationnels quotidiens comme augmenter le nombre de contrôles qualités ou mieux former les opérateurs ...
- Diminuer : mise en œuvre de plans plus sophistiqués élaborés pour diminuer l'impact du risque ou leur vraisemblance.
- Transférer : adaptée quand le risque est partagé entre les entités de la SC ou encore concerne des perturbations à forte impact comme des catastrophes naturelles avec des assurances, ou des contrats de de partage de risques...

- Éviter : Cette stratégie nécessite une identification de la cause racine du risque pour l'éviter.

Toutefois, ces démarches présentent encore des limitations dans leur application pour la planification et la gestion de la SC sous incertitude. Au niveau de l'analyse des risques et leur évaluation, (Ramesh et Sarmah 2021) et (K.T, Sarmah, et Tarei 2020) insistent sur le besoin de quantifier les risques dans la SC en utilisant des techniques d'aide à la décision. En outre, ils considèrent que les bonnes pratiques de gestion des risques sont celles qui aideront les décideurs à atténuer les occurrences de risques et leur impact négatif. Par ailleurs, (Tarei, Thakkar, et Nag 2021) soulignent dans leur revue de littérature que l'utilisation de systèmes d'aide à la décision (DSS) dans la gestion des risques dans la SC est relativement rare (i.e. (Tuncel et Alpan 2010)).

Une autre limite est identifiée concernant l'évaluation des risques liés aux approvisionnements et à leurs impacts sur la performance de la SC (K.T, Sarmah, et Tarei 2020). Presque les mêmes conclusions sont fournies par (Baryannis et al. 2019) suite à une revue quantitative des travaux dans la littérature considérant les différentes étapes de la gestion des risques (identification, évaluation et réponse aux risques). Ils soulignent que l'évaluation des risques est rarement traitée de manière quantitative et indépendante et que la plupart des travaux utilisant la gestion des risques comme moyen de faire face à l'incertitude se concentrent sur la réponse aux risques sans fournir aucune forme de systèmes d'aide à la décision pour gérer ces risques.

2.3.2. Réduction d'occurrence des risques à la source

Généralement, réduire l'incertitude consiste principalement à réduire les temps de cycle (en intégrant des principes du Lean et du Juste-À-Temps (JAT) par exemple), à utiliser des logiciels de gestion de la relation client et à améliorer la qualité des données en implémentant de nouvelles technologies de traçabilité comme IoT (Internet of Things) (Manavalan et Jayakrishna 2019; Garcia-Neveu 2020) . Sur un niveau plus stratégique, il y a aussi la réduction des incertitudes via la reconception de la SC ou des produits et la définition de nouvelles politiques et procédures décisionnelles (Simangunsong, Hendry, et Stevenson 2012; Vlachos et Malindretos 2021).

2.3.3. Stratégies de maîtrise des impacts des risques

Plus l'agilité de la SC est importante, moins il est nécessaire de bien estimer l'incertitude et plus les impacts des risques sont maîtrisés. La flexibilité est un levier essentiel pour l'agilité de la SC qui lui permet de s'adapter efficacement face aux incertitudes (Tang et Tomlin 2008; Lelievre 2011; Huo, Gu, et Wang 2018).

En interne, chaque entité de la SC peut adopter un ensemble de stratégies visant à améliorer sa réactivité et son agilité. Ces stratégies ont besoin en amont de sources de flexibilité sur :

- des entrées : diversification des fournisseurs (Snyder et Shen 2019) pour disposer d'une flexibilité des sources d'approvisionnement.

- des sorties : développement des relations flexibles avec les client (clients moins sensibles aux délais de livraison) (i.e.(Huo, Gu, et Wang 2018; Ströhle, Flath, et Gärttner 2019; Ghomi et al. 2021))
- des processus notamment :
 - La flexibilité des ressources (machines adaptables, effectifs polyvalents ...) (i.e. (Kaminsky et Wang 2019)).
 - L'incorporation des concepts de retardement permettant le report des opérations sensibles à l'incertitude (Rau, Daniel Budiman, et Monteiro 2021; Kristianto 2010; Krajewski, Wei, et Tang 2005).
 - Et l'utilisation de stocks stratégiques de découplage (Sánchez-Vega et al. 2018).

Par ailleurs, une approche collaborative de la SC peut être adoptée pour agir rapidement et disposer d'une structure de plan concertée à l'avance pour éviter tout risque majeur entraînant une baisse des performances de la chaîne (Ramesh et Sarmah 2021). Le partage d'information reste un levier important pour améliorer la visibilité dans une chaîne logistique et ainsi accélérer la détection des problèmes, accélérer les prises de décision, augmenter la confiance et réduire l'effet bullwhip (G. Rius-Sorolla et al. 2021). Par ailleurs, les acteurs de la chaîne peuvent convenir des modalités de flexibilité dans le cadre des relations fournisseur/client au sein de la SC (voir chapitre 1).

2.3.4. Approches quantitatives pour supporter la maîtrise des risques

Cette catégorie fait appel à l'ensemble des travaux basés sur l'utilisation de la recherche opérationnelle afin de réduire l'effet des incertitudes et supporter la maîtrise des risques. (Jamalnia et al. 2019) classifient ces techniques en cinq catégories :

- **Approches floues** : qui se basent sur optimisation robuste floue, l'optimisation floue multi-objectifs, la programmation floue linéaire et non linéaire, contrôle par logique floue, raisonnement approximatif, programmation possibiliste linéaire, optimisation possibiliste linéaire multi-objectifs ou la programmation possibiliste linéaire interactive ... Elles s'appuient sur une modélisation linéaire ou non linéaire du problème de planification posé et sur des distributions de possibilité de certains paramètres de ce modèle.
- **Approches stochastiques** : ces approches font appel l'optimisation robuste, à la programmation stochastique linéaire ou non linéaire, l'optimisation stochastique mono ou multi-objectifs, ...Elles s'appuient sur une modélisation linéaire ou non linéaire du problème de planification posé et d'un ensemble de scénario probabilisés représentatifs des situations possibles. Les scénarios pouvant être générés selon une approche Monte Carlo. Le but de l'optimisation est alors d'optimiser une combinaison de la moyenne, de l'écart type, de l'étendue ou des pires cas rencontrés.
- **Simulation** : la simulation à événements discrets et la dynamique des systèmes sont deux approches qui permettent de modéliser le comportement de décideurs face à des situations rencontrées à partir d'une hypothèse d'évolution discrète ou continue de l'état du système étudié.
- **Métaheuristiques** : algorithmes génétique, Recuit simulé, HS (*harmony search*) ; par essais particuliers... sont utilisés pour produire des solutions proches de l'optimum (mais non

garanties) à des problèmes de planification. À l'image des approches stochastiques, de multiples scénarios peut être évalués pour produire une quasi-optimisation en moyenne, étendue ou pire cas.

- **Raisonnements approchés** (*Evidential Reasoning*): BRB (*Belief-Rule-Based inference method*) ... Ces méthodes sont basées sur des modélisations de l'incertitude par des fonctions de croyance et sont susceptibles de traiter des informations et des connaissances qui comportent des niveaux variables d'incertitude, provenant principalement de l'ignorance et de l'inexactitude (Shafer 1987).

Des combinaisons entre ces différents modèles sont largement étudiées dans la littérature (i.e. programmation linéaire et simulation, algorithmes génétiques et simulation...). Ce type de modèles est appelé hybride dans la classification proposée par (Peidro et al. 2009).

L'utilisation de la théorie de possibilité et de l'optimisation floue en planification de la SC est souvent appelée "*Fuzzy MRP*" ou "*fuzzy planning*" (i.e. (Grabot et Geneste 1998; Grabot et al. 2005; Sun, Liu, et Lan 2011; Gholamian, Mahdavi, et Tavakkoli-Moghaddam 2016; Díaz-Madroñero et al. 2017)). L'utilisation de modèles flous permet d'inclure un plus grand nombre de paramètres incertains (Baryannis et al. 2019). L'utilisation des modèles stochastique, en particulier celle basée sur des scénarios, est identifiée comme la plus utilisée (représente 50% des articles analysés dans (Baryannis et al. 2019)) pour le traitement des incertitudes. La même conclusion est obtenue dans (Peidro et al. 2009). Les approches fondées sur de la simulation sont, quant à elles, plus adaptées aux problèmes complexes comportant de multiples sources d'incertitude que les modèles analytiques peuvent difficilement représenter (Mula, Poler, Garcia-Sabater, et al. 2006).

Ces conclusions sont ressorties également suite à notre investigation menée sur la littérature à l'intersection de deux champs :

- La planification tactique dans une chaîne logistique aussi bien en production qu'en distribution.
- La gestion de l'incertitude et des risques et leurs diverses formes de modélisation : floue, stochastique, robuste... Mais aussi celle sur l'aide à la décision pour la planification tactique.

Cette investigation a été menée sur la base de données 'Scopus', le 29/10/21, en utilisant la requête suivante, limitée aux articles de journaux et de revue : (*TITLE-ABS-KEY ("supply chain") AND TITLE-ABS-KEY ("master plan*" OR "tactical plan*" OR "distribution plan*" OR "MPS" OR "distribution requirement planning" OR "delivery plan*") AND TITLE-ABS-KEY ("uncertain*" OR "risk" OR "stochastic" OR "fuzzy" OR "fuzziness" OR "robust*" OR "DSS" OR "planning support" OR "decision support") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))*).

Le résultat est de 210 articles de l'année 2000 à 2021. Nous avons analysé ces articles en utilisant les méthodes « bibliométrix ».

Sur la carte de co-occurrence des mots-clés des auteurs de la figure 16, nous pouvons distinguer des paquets qui croisent des problématiques de planification avec des méthodes : (i) rouge : ‘*Production-distribution planning*’ et ‘*simulation*’, (ii) bleu : ‘*production planning*’ et ‘*optimisation*’ (iii) vert : ‘*SC planning*’ et ‘*stochastic programming*’, (iv) violet : ‘*master planning*’ et ‘*fuzzy sets*’. Des techniques de résolution comme ‘*fuzzy mathematical programming*’ est plutôt associé à la simulation.

Dans la figure 17, la courbe cumulative de l'occurrence des mots-clés des auteurs par année montre bien que le champ d'étude (planification tactique sous incertitude) est un champ d'étude en pleine croissance. Une tendance à se focaliser sur les approches basées sur l'optimisation stochastique et robuste est notée dans les travaux qui s'intéressent à la gestion de l'incertitude dans la planification tactique des SC (voir l'analyse des tendances dans figure 18).

Les critères d'optimisation robuste les plus courants dans la planification SC sont : coût minimax (minimisation du coût maximal parmi les scénarios), regrets minimax (minimisation du regret maximal parmi les scénarios) (i.e. (Pishvaei, Rabbani, et Torabi 2011; Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017)). Le regret d'une solution est la différence entre le coût de la solution d'un scénario et le coût de la solution optimale pour ce scénario. Cette approche est plus utilisée dans un contexte stochastique (Snyder et Daskin 2006).

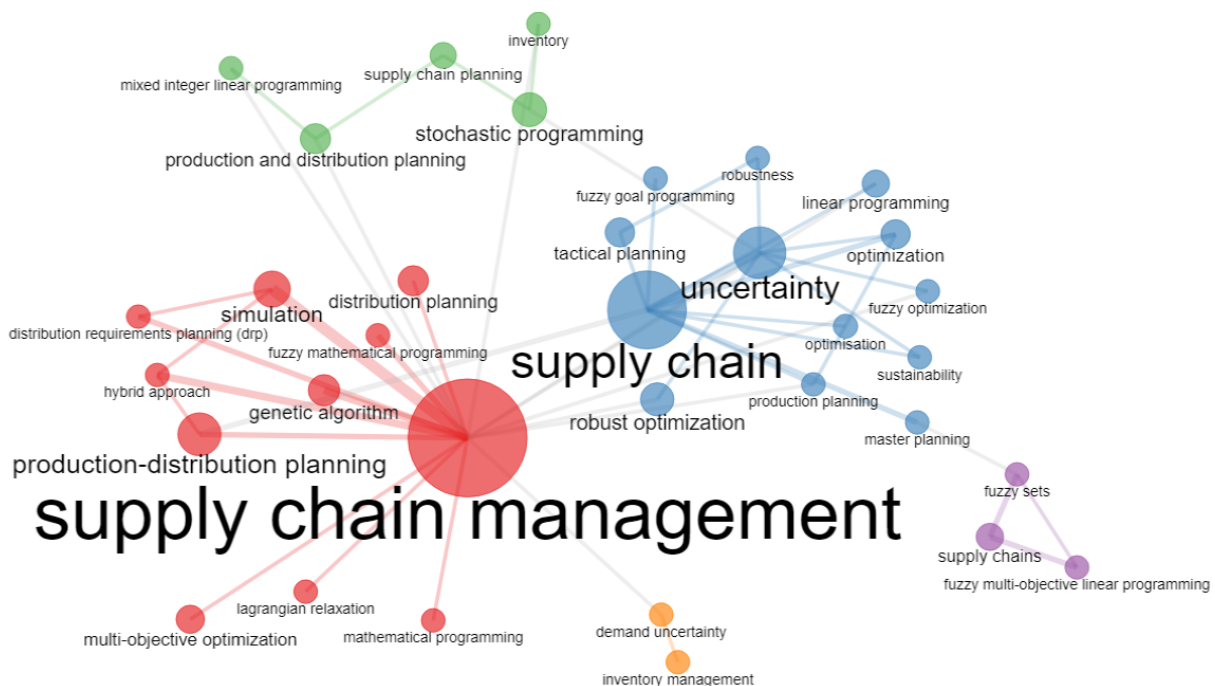


Figure 16. ‘Co-occurrence map’

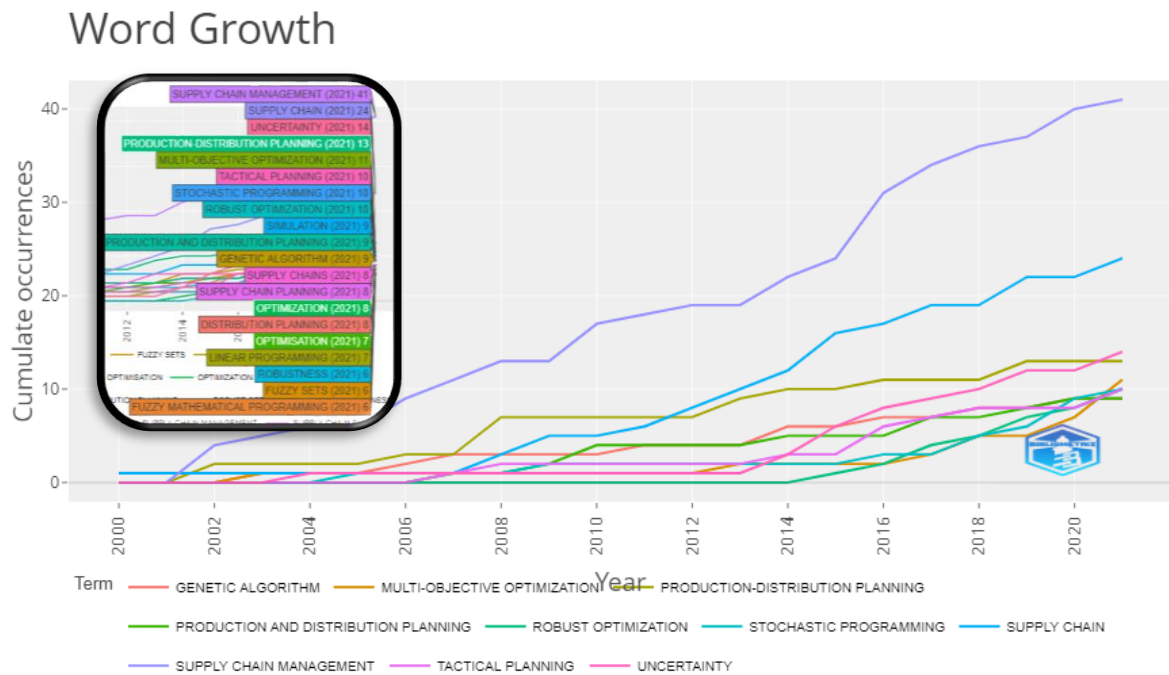


Figure 17. Évolution des mots clés des auteurs en planification tactique sous incertitude

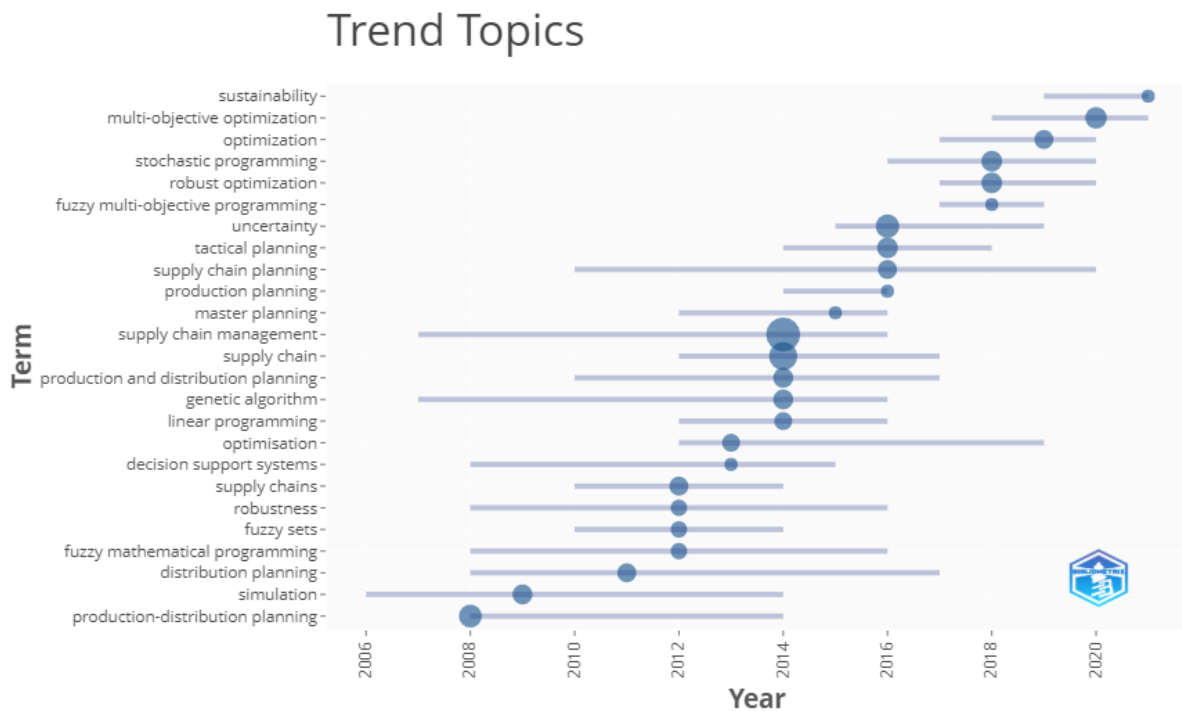


Figure 18. Analyse de la tendance des sujets par année

Toutefois, les approches d'optimisation ne favorisent pas la coordination et la collaboration entre les acteurs de la SC et il n'est pas toujours facile de formaliser leur fonction objectif dans un contexte ambigu (Lima, Relvas, et Barbosa-Póvoa 2021). Aussi, elles supposent que les préférences des décideurs soient parfaitement identifiées. Cependant, « les préférences du décideur évoluent tout au long du processus décisionnel et la nature conflictuelle des objectifs ne permet pas une optimisation simultanée de ces derniers » (Igoulalene 2014).

2.3.5. Positionnement : Deuxième et troisième questions de recherche

Dans notre travail, nous n'agissons pas sur les sources d'incertitude, et nous ne cherchons pas à changer les politiques ou les technologies utilisées dans le contexte industriel étudié. Nous partons du principe que l'échange de planification tactique de la SC est réalisé en mode déterministe par l'ERP et/ou le DRP et nous n'avons pas l'intention de "remplacer" cette pratique industrielle. Notre travail s'inscrit plutôt dans une stratégie visant à aider chaque décideur à faire face aux incertitudes qu'il constate dans la planification tactique de la SC en réduisant leurs effets dans le cadre d'une application de la démarche de mitigation des risques.

Motivés par l'analyse des revues de littérature sur les applications de cette approche, nous proposons une approche de type aide à la décision basée sur une approche quantitative d'évaluation des risques qui est rarement utilisée dans le traitement des problèmes de planification sous incertitude.

Ainsi, nous formalisons deux questions de recherche pour adresser ce problème :

Deuxième question de recherche (QR2)

Comment aider un décideur à prendre en compte l'incertitude dans les plans transmis par les autres acteurs de la chaîne (demande et plans d'approvisionnements) pour l'évaluation des risques et de la robustesse des plans élaborés à une date donnée ?

Troisième question de recherche (QR3)

Quelles seraient les caractéristiques et les fonctionnalités d'un système d'aide à la replanification intégrant les incertitudes dans les plans transmis par d'autres acteurs de la chaîne ?

2.4. Caractéristiques du problème étudié

2.4.1. Analyses des revues de littérature

Un problème de planification se caractérise par le nombre de périodes de planification considérées (une seule période ou multi-périodes), le nombre de produits (un seul produit ou multiproduits), le nombre d'objectifs (mono ou multi-objectifs) et concerne une SC ayant une structure donnée

(nombre de maillons, type de structure, nombre de centre de décision...). Les travaux dans la littérature sont souvent classifiés selon ces différentes caractéristiques et la complexité du contexte considéré (Dolgui et Prodhon 2007a; Dolgui et al. 2013; Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Cheraghalikhani, Khoshalhan, et Mokhtari 2019; Kumar et al. 2020).

L'écart entre la recherche et les applications industrielles, est considéré comme la limite principale des travaux traitant des incertitudes dans les problèmes de planification de la SC (Baryannis et al. 2019; Jamalnia et al. 2019; Peidro et al. 2009). Cela est justifié par l'insuffisance de la prise en compte de la spécificité des contextes industriels (Jamalnia et al. 2019) et par le manque de prise en compte des problèmes de planification à horizon glissant que ce soit en mode déterministe ou incertains (Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Jamalnia et al. 2019).

Afin de réduire cet écart, (Sahin, Narayanan, et Robinson 2013; Dolgui et al. 2013) proposent d'adopter des représentations plus étendues des problèmes de planification (multi-périodes, multi-produits, multi-acteurs...) afin de mieux refléter les pratiques industrielles. (Sahin, Narayanan, et Robinson 2013) considèrent également la prise en compte des pratiques de planification à horizon glissant et le facteur humain dans la prise de décision pour combler le décalage entre la théorie et la pratique. Par ailleurs, (Baryannis et al. 2019; Jamalnia et al. 2019; Peidro et al. 2009) soulignent l'importance d'accorder plus d'attention à l'étude de l'applicabilité des approches théorique dans des contextes industriels dynamiques.

2.4.2. Positionnement : quatrième question de recherche

Dans ces travaux, nous considérons une structure divergente d'une SC industrielle multi-acteurs (contexte industriel). Dans ce contexte, nous étudions un problème de planification dynamique à horizon glissant, multiproduits, multi-périodes dans cette SC multi-acteurs. D'ailleurs, cette complexité est au cœur de notre problématique industrielle d'aide à la décision détaillée dans le chapitre 1.

Sensibilisés, dans cette partie, par l'importance de l'étude de l'applicabilité de notre approche dans ce contexte industriel, nous formalisons une quatrième question de recherche comme suit :

Quatrième question de recherche (QR4)

Comment le système d'aide à la replanification pourrait-il s'intégrer dans le contexte de planification complexe et dynamique existant ?

3. Aide à la planification tactique sous incertitude

3.1. Outils d'aide à la planification

Nous analysons ici quelques travaux sur l'aide à la décision pour la planification sous incertitude proposant une aide à la décision et donc une interaction avec un planificateur pour l'aider dans sa prise de décision.

Nous tenons à souligner que dans ces deux dernières années, de plus en plus de travaux s'intéressent à des contextes industriels précis en considérant de plus en plus la complexité et la spécificité de chaque environnement dans les modèles d'aide à la décision proposés. Ceci est dû à la cohésion et aux rapprochements évolutifs des académiques et des industriels dans le cadre de projets commun comme celui dans lequel s'inscrit cette thèse.

Dans les SCs pharmaceutiques (PSC) correspondant à notre contexte industriel, (Marques et al. 2020) fournissent une analyse approfondie et détaillée de la littérature des travaux d'aide à la planification de ces SCs sur différents niveaux afin de saisir les principaux problèmes, tendances et défis de l'optimisation de la planification des processus d'aide à la décision stratégique et tactiques. Ils proposent ainsi un modèle de référence pour assister les chercheurs dans la création de leurs modèles d'aide à la décision basé sur l'optimisation pour la planification de ce type de SC. Dans leur modèle de référence d'aide à la décision, l'intégration des incertitudes est le levier principal de performance des opérations de la Supply chain sur les différents niveaux de décisions.

Dans le contexte des SCs pétrolières aval, (Lima, Relvas, et Barbosa-Póvoa 2021) proposent un modèle MILP (Mixed-Integer Linear Programming) pour une optimisation à deux niveaux. Un niveau stratégique de la conception du réseau de distribution (localisation et exploitations des entrepôts). Un niveau tactique des plans de distribution des produits (flux, satisfaction de la demande, affectation des transports). L'objectif du modèle est d'optimiser ces opérations de manière économique en fonction d'une demande floue et de coûts de réseaux flous avec des contraintes de capacité, en proposant le meilleur plan de distribution en termes de coûts. Ces paramètres flous sont considérés comme une distribution de possibilités. Dans ce travail les auteurs adoptent différents modèles basés sur des mesures de la théorie de possibilité pour représenter différentes préférences du décideur. Une mesure de possibilité pour représenter un caractère optimiste du décideur. Une mesure de nécessité pour représenter un caractère pessimiste. Les auteurs présentent ces approches floues comme complémentaires et pouvant faire référence à trois stratégies de prévention de risques pour aider le décideur à gérer l'incertitude et d'émettre de meilleures décisions. Cependant les auteurs n'ont pas détaillé l'applicabilité de ces méthodes dans le contexte réel des systèmes de planification de ces SCs ni les interactions du décideur avec ces outils et leur utilisation.

Pour le même type de SC pétrolière, (Pudasaini 2021) s'intéresse aux décisions tactiques et stratégiques. Cependant, ils proposent plutôt une approche stochastique multi-objectifs, MILP basée sur des scénarios de demandes (optimiste, réaliste et pessimistes) calculés à partir d'une demande nominale selon de différents taux de croissance. Les auteurs proposent ce modèle comme

un outil d'aide à la décision qui assiste le décideur dans le choix de la solution préférée parmi l'ensemble des solutions générées par le POS (*Pareto optimal solutions*). Les problèmes considérés par ces modèles sont statiques et concernent une période de planification. Toutefois, un niveau avancé de complexité est considéré dans ces différents modèles pour mieux refléter la réalité de ce type de SC (multi-objectifs, multi-produit, multi-modes de transports ...) et permettre au décideur de les exploiter pour comprendre la complexité, la flexibilité et les risques de la prise de décision sous incertitude

(Papaleonidas et al. 2020) s'intéressent à des SCs de gaz naturel. Dans le cadre d'amélioration de la proactivité de ces SC, les auteurs proposent un outil d'aide à la décision pour la planification tactique basé sur un modèle hybride d'optimisation (MILP et algorithme génétique) d'un problème du transport maritime dans une approche déterministe. Le temps d'exécution du modèle requis est significatif et augmente proportionnellement au niveau de complexité de la SC considérée. Le même problème et contexte sont traités par (Bittante, Pettersson, et Saxén 2018) avec une tentative préliminaire d'aborder l'incertitude sur la demande.

(Akbarian-Saravi, Mobini, et Rabbani 2020) visent l'optimisation de la planification tactique et stratégique dans une SC bioéthanol. Ils proposent un outil d'aide à la décision basé sur ANN (*Artificial Neural Network*), modélisation mathématique multi-objectifs et une approche hybride qui vise à trouver la solution préférée du décideur selon ses préférences définies dans la fonction objectif.

(Laguna-Salvadó et al. 2019) proposent un modèle mathématique déterministe d'optimisation du MP (Master Planning) pour soutenir la planification tactique des SC humanitaires. Une démonstration numérique est élaborée pour l'étude de l'implémentation de l'outil et la validation de son utilité tout en intégrant les choix de priorisation du décideur.

(Liang 2006) considèrent un problème de planification de distribution flou multi-objectifs qui vise à la fois minimiser le coût total de distribution et le temps de livraison total avec des approvisionnements et demande flous et des capacités limitées. Ils proposent une méthode interactive pour la résolution du problème (*interactive fuzzy multi-objective linear programming (i-FMOLP)*) où les décideurs peuvent modifier les paramètres flous de planification jusqu'à trouver l'ensemble des solutions satisfaisantes.

Afin de dépasser les limites de l'utilisation de la programmation linéaire qui fournit une solution unique, (Gaudreault et al. 2017) proposent un outil d'aide à la décision basé sur l'optimisation interactive appliquée aux problèmes linéaires de planification tactique de la SC. Le système proposé est un système de prise de décision hybride basé sur la collaboration entre la machine et le décideur pour produire une solution dans un contexte itératif et interactif (Mixed-Initiative-System (MIS)). Via un tableau de bord, le décideur peut modifier et interagir avec les variables de décision et lancer la re-optimisation pour obtenir les nouvelles solutions dans peu de temps. Les auteurs proposent également un modèle fournissant une tolérance d'optimalité autour de la solution optimale générée. Ce modèle vise à prendre en compte la tendance des décideurs à rechercher un compromis entre flexibilité et optimalité.

(Ogier et al. 2015) considèrent une SC multi-échelon avec une planification décentralisée à horizon glissant avec un partage d'information minimal par négociation (propositions de commande/approvisionnement). Ils utilisent une approche hybride (simulation avec système multi-agent et optimisation) pour permettre au décideur d'évaluer différentes stratégies d'allocation sous incertitude par la simulation en horizon glissant. Leur travail fournit un cadre prometteur vers un outil décentralisé d'aide à la décision.

Les travaux utilisant des approches basées sur une évaluation quantitative des risques dans la planification tactique sont relativement rares.

Parmi ces travaux, (F. Galasso et Thierry 2009) proposent une approche d'aide à la planification tactique basée sur l'analyse des risques point de vue fournisseurs et point de vue clients sous incertitude dans la demande. Ces incertitudes sont modélisées à partir des scénarios de demande (min, nominale, max) donnés par le client dans le cadre d'un processus de planification collaborative, dans un contexte dynamique de planification à horizon glissant. Les auteurs fournissent un tableau de bord basé sur les résultats de simulation selon différentes stratégies et différents niveaux de visibilité (la longueur d'horizon firme communiqué par les clients). Ce tableau de bord comprend des diagrammes de risques construits selon différents critères (Hurwicz Laplace, Wald and Savage). Ainsi les décideurs peuvent coopérer dans le choix des stratégies de planification tout en intégrant leurs connaissances d'expert. Le système consiste principalement en un module intégrant le processus de simulation de stratégies permettant la génération des indicateurs affichés dans l'interface proposée.

(Guillaume, Grabot, et Thierry 2013) proposent aussi une approche de traitement des incertitudes basée sur la gestion des risques. Leur méthode vise à générer en sortie le plan le moins risqué en considérant l'imprécision dans les dates des commandes clients et la capacité et d'autres paramètres de planification. Le client est impliqué dans le choix du critère du plan généré et utilise ses connaissances pour la modélisation des paramètres imprécis et des entrées du modèle d'optimisation. Un processus de décision est détaillé pour la sélection du plan. Une matrice des risques est proposée pour la visualisation des résultats d'évaluation des risques d'un plan en termes de leur mesure de possibilité pour aider le décideur dans sa sélection du plan le moins risqué.

3.2. Aide à la planification en horizon glissant

Dans cette partie, nous analysons particulièrement les travaux sur les problèmes de planification à horizon glissant liés à notre problématique industrielle définie dans le premier chapitre. Au-delà des approches traditionnelles déjà intégrées dans les pratiques des industriels (horizon, surdimensionnement des capacités, délais de sécurité ...) (Whybark et Williams 1976; Koh, Saad, et Jones 2002; Mula, Poler, García-Sabater, et al. 2006; Dolgui et Prodhon 2007b; Lalmazloumian et Wong 2012; Damand, Derrouiche, et Barth 2013; Mundi et al. 2019; Atadeniz et Sridharan 2020),

différents travaux adressent ce problème en intégrant les incertitudes sur les paramètres de planification pour réduire la nervosité dans la planification tactique de la SC.

Le travail de (Genin, Lamouri, et Thomas 2007) vise à « se débarrasser de la nervosité » en utilisant une approche déterministe. Ils proposent une approche réactive basée sur un modèle linéaire qui vise à faire un compromis entre la stabilité et l'optimalité de la replanification sur l'horizon glissant. Elle réduit les déviations, à la fois, par rapport à un "plan de référence" conservé du cycle de planification précédent et par rapport à un plan optimisé. Ils utilisent la simulation pour reproduire le comportement dynamique de la prise de décision à l'aide d'un modèle de ré-optimisation pour la replanification sur l'horizon glissant. Les résultats de la simulation permettent aux auteurs de confirmer que leur approche est prometteuse et qu'elle peut être intégrée dans le système APS pour en améliorer la stabilité et la robustesse.

(F. Galasso, Mercé, et Grabot 2009) adoptent une représentation par intervalle de l'incertitude sur la demande et présentent un cadre de simulation de l'horizon glissant qui peut être utilisé pour l'aide à la décision afin de choisir une stratégie de planification pour faire face à cette incertitude dans la planification à horizon glissant. Le modèle est basé sur l'évaluation de l'impact de l'incertitude sur la demande sur les coûts et les risques. Une approche par simulation valide que la visibilité sur la demande réduit significativement les coûts tant que cette visibilité est suffisamment précoce pour réagir aux perturbations. Les auteurs fournissent comme perspective de ce travail, l'utilisation de la théorie des possibilités pour une considération plus explicite de l'incertitude sur la demande.

De même, (Herrera et al. 2016b) proposent une approche réactive qui vise à atténuer l'instabilité des plans tactiques en tenant compte l'incertitude sur la demande. L'utilisation de différentes combinaisons d'objectifs basées sur des modèles de programmation en nombres entiers mixtes montre que viser une amélioration de la stabilité du plan est un bon objectif qui n'implique pas nécessairement une forte augmentation des coûts de production.

(Demirel, Özelkan, et Lim 2018) proposent un nouveau modèle de planification à horizon glissant sous un profil de besoins de flexibilité pour éviter les instabilités découlant du modèle traditionnel de planification à horizon glissant. Ils proposent une formulation '*mixed integer linear programming*' pour générer des plans de production sous formes de limites inférieures et supérieures appelée '*flex-limits*'.

(Esteso et al. 2019) proposent une aide à la révision des plans de livraison. Ils traitent le problème de réallocation des approvisionnements. Ils proposent un modèle de simulation SD (System Dynamics) basé sur une approche MILP (mixed-integer linear programming) pour la maximisation des profits dans la réallocation en cas de rupture.

(Campuzano-Bolarín et al. 2020) proposent une approche intégrée pour les gestionnaires de production afin de fournir de nouvelles perspectives en combinant la planification à horizon glissant et un modèle de simulation de systèmes dynamiques pour la gestion de la demande avec des délais variables. Ils montrent, à partir des résultats de la simulation, l'apport de cette approche

dans un environnement dynamique et incertain, en termes de réduction du coûts et effet de Bullwhip.

Étant motivés par le manque de moyens efficaces d'adaptation face aux événements inattendus dans le cadre de la planification dynamique, (Ferreirinha et al. 2020) a développé un prototype connecté au logiciel MRP et utilise des méta heuristiques pour générer un plan prédictif. La replanification est faite via un module d'événements dynamiques. Ce travail fait partie des rares travaux qui se sont concentrés sur une étude analytique approfondie de l'applicabilité de l'outil proposé.

3.3. Conclusion

Si nous reprenons la définition du système d'aide à la décision (DSS) adoptée dans cette thèse, qui considère un DSS comme : un *système d'information*, supportant un *décideur* à performer un *processus de décision* pour atteindre un *objectif* déterminé. Nous remarquons qu'au moins une de ces composantes est manquante et non définie dans les travaux sur l'aide à la planification sous incertitude, du moins ceux présentés dans cette section. La plupart du temps, la mise en œuvre et l'analyse de l'applicabilité de ces outils sont présentées dans les perspectives de ces travaux. La plupart des travaux, principalement ceux basés sur l'optimisation, peuvent être considérés comme des propositions de modules de planification avancée supplémentaires pouvant être intégrés dans les APS, ou comme de nouveaux systèmes de planification avancée. Toutefois, d'autres travaux, basés notamment sur des indicateurs via des interfaces utilisateurs, proposent des modules externes qui s'alimenteront des données des ERP et des APS. Cependant leurs interactions avec les données dynamiques de ces systèmes ne sont jamais étudiées. Ceci est également vrai pour les différents travaux de la littérature qui se sont intéressés au traitement du problème de la nervosité dans un contexte de planification à horizon glissant. Ils sont principalement basés sur l'optimisation intégrant le critère de stabilité des variables de décision en horizon glissant, et sur la simulation de stratégies de planification sous incertitude pour l'aide à la décision. Toutefois, les travaux utilisant une approche de gestion des risques pour traiter ce problème dans le contexte de la planification à horizon glissant sont rares.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié cinq critères utilisés dans la littérature pour classer les travaux de planification sous incertitude : le niveau de décision, la source d'incertitude, l'approche de modélisation de l'incertitude, l'approche de gestion de l'incertitude et les caractéristiques du problème étudié. Nous avons focalisé dans un deuxième temps sur des travaux proposant une aide à la planification sous incertitude de façon générale et des travaux sur le traitement du problème de la nervosité de la planification en horizon glissant de façon particulier.

Pour chaque critère, l'analyse de la littérature a permis d'identifier les principales limites et de positionner les travaux de cette thèse.

Les travaux de cette thèse concernent le niveau tactique de la planification d'une SC, très important pour le contrôle de la nervosité du système de planification.

Pour répondre à la limitation qui consiste à ne pas considérer plusieurs sources d'incertitude en même temps, en particulier les incertitudes au niveau de l'approvisionnement, nous considérons à la fois les incertitudes dans les plans d'approvisionnement prévus par le fournisseur et les incertitudes dans les plans de demande des clients.

Afin d'intégrer à la fois les incertitudes dans les plans transmis et le comportement décisionnel des planificateurs de ces plans en l'absence de données suffisantes pour représenter les distributions de possibilités de ces incertitudes, nous optons pour une représentation basée sur les ensembles flous.

Face aux limites des modèles de maîtrise de l'incertitude basés sur l'optimisation les plus utilisés et la concentration des travaux sur les approches de réponse au risque sans système d'aide à la décision, les travaux de cette thèse se concentrent sur la planification sous incertitude, basée sur l'évaluation quantitative des risques associés aux plans d'un décideur sous incertitude.

Enfin, le domaine de la planification sous incertitude connaît un écart important entre la recherche et les applications industrielles. Ainsi, nous considérons un problème de planification étendu (multi-produits, multi-périodes, multi-acteurs...) et nous considérons que l'analyse de l'applicabilité de l'approche proposée dans un contexte industriel réel en dynamique est importante pour participer à combler cet écart. Pratiquement, cette analyse doit être basée sur la proposition d'un système d'aide à la décision impliquant le décideur et l'analyse des interactions de l'outil avec les données dynamiques des systèmes d'information de planification existants.

Ainsi, nous avons formulé quatre questions de recherche pour répondre à la problématique de recherche sur l'aide à la planification en horizon glissant sous incertitude :

- **QR1** : Comment intégrer la connaissance d'un expert sur les incertitudes dans les plans transmis par les autres acteurs du SC (demande & approvisionnement) y compris les comportements de ces acteurs, avec une modélisation basée sur des ensembles flous ?
- **QR2** : Comment aider un décideur à prendre en compte l'incertitude dans les plans transmis par les autres acteurs de la chaîne (demande et plans d'approvisionnements) pour l'évaluation des risques et de la robustesse des plans élaborés à une date donnée ?
- **QR3** : Quelles seraient les caractéristiques et les fonctionnalités d'un système d'aide à la replanification intégrant les incertitudes dans les plans transmis par d'autres acteurs de la chaîne ?
- **QR4** : Comment le système d'aide à la replanification pourrait-il s'intégrer dans le contexte de planification complexe et dynamique existant ?

CHAPITRE III. CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

“It is important to get results from experiment but the most important is the process in getting the results”

Dr. Nik Ahmad Nizan

1.	Introduction.....	73
2.	Problématique et questions de recherche.....	73
3.	Concepts fondamentaux.....	77
3.1.	Hypothèses de performances des plans de livraison /approvisionnements : faisabilité, satisfaction, fiabilité, stabilité	77
3.2.	Hypothèses de planification sous incertitudes : Incertitude, Risque, robustesse	78
4.	Notre approche de gestion des risques pour l’aide à la replanification	79
4.1.	Processus de gestion des risques.....	79
4.2.	Périmètre d’application, contexte et critères.....	80
4.3.	Identification des risques	81
4.4.	Analyse des risques.....	82
4.5.	Évaluation des risques	84
4.6.	Traitement des risques	86
5.	Aide à la planification.....	87
5.1.	Processus d’aide à la décision.....	88
5.2.	Processus de négociation	89
6.	Conclusion	91

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons positionné la problématique de cette thèse ainsi que les questions de recherche relevant de l'analyse de la littérature. Dans ce chapitre, nous visons à présenter un cadrage théorique et méthodologique du travail de cette thèse pour répondre à ces questions.

Tout d'abord, nous rappelons le positionnement de la problématique de cette thèse et les questions de recherche. Nous présentons ainsi les apports de ces travaux associés à chaque question de recherche. Ensuite, nous présentons le cadre théorique de cette thèse où nous définissons les principaux concepts utilisés dans notre contexte. Nous détaillons ensuite la méthodologie que nous avons adoptée pour répondre aux différentes questions de recherche.

Nous détaillons ensuite la méthodologie de gestion des risques proposée pour répondre à nos questions de recherche. Nous présentons à chaque étape les hypothèses et les méthodes utilisées. Enfin, nous décrivons également les processus d'aide à la décision implémentés dans l'outil d'aide à la décision proposé.

2. Questions de recherche et contributions

Dans le contexte d'une planification tactique assurée par les modules déterministes des systèmes d'information de l'entreprise, les performances de plans d'un décideur ne peuvent être améliorées qu'en prenant en compte des informations supplémentaires qui dépassent la portée de son domaine de planification individuel. Ceci est dû à l'interdépendance des activités des différents maillons de la chaîne. Ainsi, la coordination de différents plans tactiques est nécessaire pour diminuer la variabilité des quantités de production et de distribution planifiées et augmenter l'agilité du réseau face aux événements inattendus. Cette coordination est assurée la plupart des temps via un partage d'information minimal basé principalement sur un échange de plans de demande et d'approvisionnement dans le cadre des relations client/fournisseur au sein d'une chaîne logistique. Cette coordination peut paraître suffisante pour améliorer la fiabilité de planification adoptant une vision statique de la planification pour une date donnée. Pourtant, elle est effectuée dans un environnement très dynamique, où les aléas ne viennent pas seulement des changements du carnet de commandes des clients mais aussi des aléas d'exécution des plans sur des différents niveaux de la chaîne ou encore d'une correction de prévisions de ventes nécessitant une réadaptation des ressources ou du comportement et des choix de stratégies de planification du décideur.

Afin de détecter et d'intégrer ces fluctuations suffisamment tôt pour réagir, le processus de planification à horizon glissant est important pour réviser les plans et coordonner les processus de la chaîne. Toutefois, les perturbations qui impactent chacun des acteurs ne sont pas toujours détectées suffisamment en avance. La coordination entre les acteurs est d'autant plus complexe et difficile que chaque décideur doit faire face à des variations des plans des acteurs en amont et en aval en horizon glissant. Ceci est particulièrement vrai quand il s'agit de décider de modifications

augmentant la nervosité du système de planification alors que le ou les autres partenaires risquent de changer à nouveau d'avis lors de la planification suivante. Dans ce cas, le décideur est confronté à un dilemme entre réactivité-stabilité. Par ailleurs, ces modifications concernent un grand nombre de références d'articles qui peuvent être différents dans leurs modes de gestion et qui ont un stock partagé entre plusieurs clients, ce qui augmente les dimensions de la prise de décision et par conséquent sa complexité.

Le partenaire industriel a souligné qu'en plus de la complexité inhérente aux activités de replanification, le décideur doit gérer des profils de clients variés qui diffèrent de la qualité de leurs prévisions et de leur réactivité. Aussi, les procédures de gestion des multiples produits et marques sont variées. De plus, le temps requis pour la replanification et les ressources allouées à cette activité sont importants.

Christophe Rousse (directeur Supply Chain au sein de Pierre Fabre Derme-Cosmétique) :

« En général, environ 50% du temps travaillé d'un planificateur est sur la révision des plans. Il faut environ un mois pour réviser 4500 références de produits par 7 planificateurs. »

Cette multitude de dimensions et la grande complexité de la prise des décisions de replanification conduisent à la problématique industrielle que nous abordons dans cette thèse :

Problématique industrielle :

Comment aider un décideur au sein d'une chaîne logistique à limiter la nervosité de sa planification tactique sur l'horizon glissant face aux incertitudes ?

Ainsi, nous proposons d'intégrer les incertitudes dans le processus de prise de décision du décideur pour l'aider à replanifier et à améliorer la robustesse de ses décisions pour répondre à la problématique industrielle. Ceci conduit à formuler la problématique de recherche comme suit :

Problématique de recherche :

Comment intégrer les incertitudes dans le processus de décision déterministe d'un planificateur pour l'aider à replanifier ?

L'idée est que chaque acteur puisse d'abord prendre en compte l'incertitude dans les plans déterministes transmis par les acteurs de la chaîne en amont et en aval dans son processus de décision de replanification. Cela ne change rien au fait que les décideurs échangeront toujours des plans déterministes. Nous avons formulé notre première question de recherche dans le chapitre précédent :

Première question de recherche (QR1)

Comment intégrer la connaissance d'un expert sur les incertitudes dans les plans transmis par les autres acteurs du SC (demande & approvisionnement) y compris les comportements de ces acteurs, avec une modélisation basée sur des ensembles flous de ces incertitudes ?

Ces incertitudes sont intégrées dans un processus d'évaluation des risques et de la robustesse de ces décisions. D'où notre deuxième question de recherche :

Deuxième question de recherche (QR2)

Comment prendre en compte l'incertitude dans les plans transmis par les autres acteurs de la chaîne (demande et plans d'appro) pour l'évaluation des risques et de la robustesse des plans d'un décideur élaborés à une date donnée ?

De plus, nous visons à fournir aux planificateurs un système d'aide à la replanification en plus des modules ERP/DRP. Ce système est accessible par différents acteurs de la chaîne et évalue les risques des décisions de planification de chacun selon le type de son activité sous des entrées incertaines, tout en respectant son autonomie. Ainsi, un acteur du SC peut utiliser l'outil pour évaluer la robustesse des décisions de planification en les confrontant aux incertitudes de la demande et des plans d'appro de ces fournisseurs au même temps. Cet objectif conduit à la troisième question de recherche :

Troisième question de recherche (QR3)

Quelles seraient les caractéristiques et les fonctionnalités d'un système d'aide à la replanification intégrant les incertitudes dans les plans transmis par d'autres acteurs de la chaîne ?

Par ailleurs, la mise en place de ce système d'aide à la décision consiste à son intégration dans un contexte dynamique de replanification dans le cadre d'un processus existant de planification effectuée via les modules d'ERP/DRP. Cela conduit à la quatrième question liée à l'intégration de l'outil dans le contexte existant de planification :

Quatrième question de recherche (QR4)

Comment le système d'aide à la replanification pourrait-il s'intégrer dans le contexte de planification dynamique existant ?

Pour répondre à ces questions de recherche (QR1, QR2, (QR3 & QR4) respectivement), notre travail apporte trois contributions principales :

Contribution 1 (C1) :

Une formalisation des types d'informations métier qu'un décideur peut fournir pour décrire les incertitudes dans les plans cumulés et la traduction de ces informations pour une modélisation des incertitudes basée sur les ensembles flous.

Contribution 2 (C2) :

Une approche de gestion des risques pour augmenter la robustesse des décisions de planification tactique face à l'incertitude, basée sur des mesures de théorie des possibilités, en considérant simultanément des demandes et des approvisionnements flous.

Contribution 3 (C3) :

Une proposition de cadre conceptuel du système d'aide à la replanification et la mise en place d'une plateforme cloud d'aide à la planification dans le cadre d'un cas industriel.

La troisième contribution (C3) est une contribution dans le cadre du projet ANR CAASC avec le partenaire industriel PFDC le fournisseur du cas industriel. La présentation de la plateforme, son implémentation ainsi que l'études de cas permettant d'évaluer l'outil dans un contexte dynamique seront présentées dans le chapitre V.

Dans la section suivante, nous détaillons la méthodologie adoptée en vue de l'intégration des incertitudes et de l'évaluation des risques pour l'aide à la replanification.

3. Concepts fondamentaux

3.1. Hypothèses de performances des plans de livraison /approvisionnements : faisabilité, satisfaction, fiabilité, stabilité

La gestion des opérations dans une chaîne logistique repose sur deux activités principales : la planification et le contrôle des performances. D'abord, nous rappelons que la planification est un ensemble d'activités qui vise à assurer l'équilibre des ressources avec les besoins de la chaîne logistique pour générer un ensemble de plans. Un plan correspond aux quantités à opérer dans des périodes futures données, élaborées à une date donnée.

Ensuite, le suivi des performances de cette planification est très important pour veiller à son exécution et, par conséquent, au bon fonctionnement global de la SC.

Comme la satisfaction des clients est au cœur des préoccupations de la SC, les performances de livraison sont considérées comme une mesure essentielle des performances globales de la SC (Stadtler et Kilger 2008, 53-54), (voir figure 19).

Une *promesse de livraison* ou prévision d'approvisionnement est un plan élaboré par un fournisseur pour répondre aux besoins de ses clients en fonction de la disponibilité des produits en stock ou des capacités de ses ressources internes. Cette promesse est utilisée comme un plan de référence qui engage un fournisseur envers son client jusqu'à son exécution sur l'horizon glissant. Ainsi, la performance d'une promesse de livraison peut se mesurer en termes de sa satisfaction des contraintes externes (clients) et internes (capacité). Le taux de service est la mesure classique de la *satisfaction de la demande* des clients ou encore le taux d'indisponibilité quantifiant l'écart entre cette promesse et la demande.

En ce qui concerne les contraintes internes, les unités gérant le stock en interne doivent le maintenir à un niveau objectif afin d'éviter de programmer des ruptures de stock lors de l'établissement des promesses de livraison. Par ailleurs, pour les unités de production qui ne gèrent pas de stock mais qui sont chargées d'approvisionner les centres de distribution, la contrainte interne sera principalement sa capacité et donc la maîtrise du taux de charge généré suite à sa promesse d'approvisionnement. Dans les deux cas, l'objectif des unités est de garantir la *faisabilité* de leur promesse de livraison ou d'approvisionnement établie par rapport aux contraintes internes.

Le processus de planification est mené périodiquement pour assurer la stabilité des performances du plan en termes de respect des contraintes sur un horizon glissant. Cependant, cette révision périodique pourrait se faire au détriment de la *stabilité de la promesse* sur l'horizon glissant et par conséquent augmenter la nervosité du système de planification. Ainsi, la *fiabilité de la promesse* de livraison est également une mesure importante de sa performance. Elle fait référence à la capacité d'une entité à tenir sa promesse de livraison à une date donnée. Typiquement, elle est évaluée par le pourcentage de livraisons tardives qui sont livrées après la date de livraison promise (Stadtler et Kilger 2008).

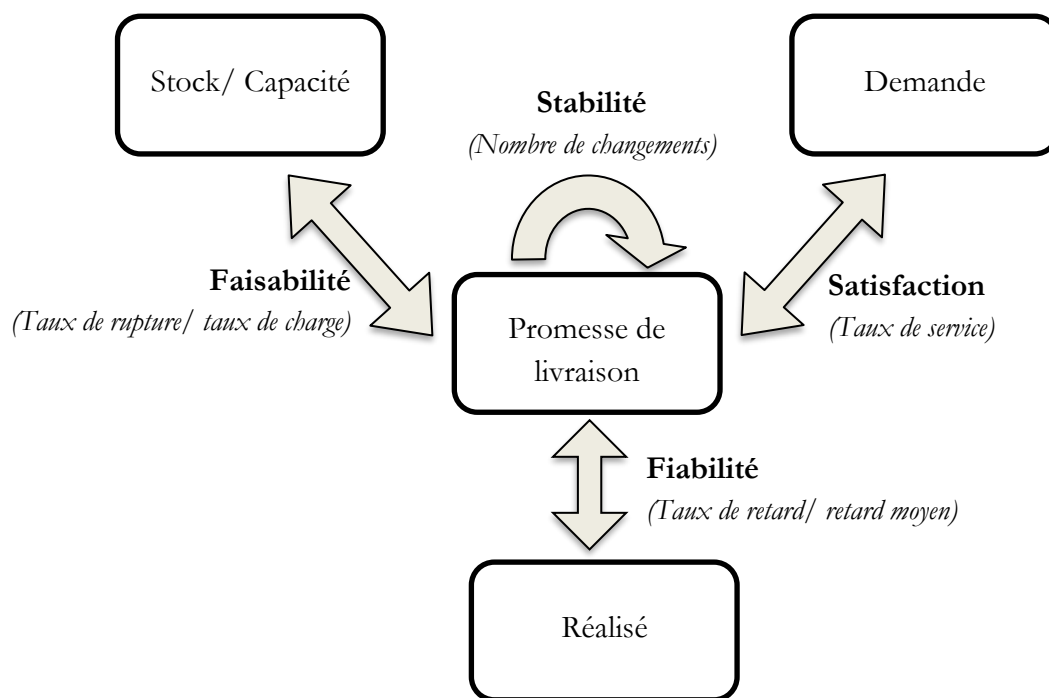


Figure 19. Mesures des performances d'une promesse de livraison (satisfaction, stabilité, faisabilité, fiabilité)

3.2. Hypothèses de planification sous incertitudes : Incertitude, Risque, robustesse

Les incertitudes dans la SC entraînent des difficultés pour établir des promesses de livraison et programmer la production. De plus, elles affectent souvent la performance de la SC et génèrent des écarts négatifs par rapport aux objectifs.

Dans le contexte de la planification sous incertitude, le risque représente l'effet de ces incertitudes sur les performances de la planification. Un risque est lié à un événement qui représente une " occurrence ou un changement d'un ensemble particulier de circonstances " (ISO 31000 :2018). Les événements liés à ces risques sont des dégradations ou des déviations par rapport aux objectifs de performance.

La robustesse est un concept qui coexiste souvent dans la littérature avec celui du risque. Cela semble assez évident, puisque les risques évaluent les changements possibles de cette fonction face à des scénarios de perturbations possibles.

Dans ces travaux, nous considérons la robustesse d'une décision de planification comme une mesure de la résistance de cette décision aux incertitudes au regard de la stabilité des performances. Nous nous référons principalement au travail de (Fargier et Thierry 2000) qui mesure l'étendue de la performance d'un plan en termes de respect des contraintes afin d'évaluer sa robustesse, en

utilisant la mesure de nécessité en théorie des possibilités. Dans notre cas, mesurer la robustesse d'une promesse de livraison ou d'approvisionnement revient à mesurer à quel point cette décision reste satisfaisante face aux incertitudes de la demande et en même temps faisable face aux incertitudes des approvisionnements, et donc nous évaluons l'étendue possible de sa fiabilité. Cela revient également à évaluer l'absence de risques liés à la dégradation de ces performances mentionnées antérieurement.

4. Notre approche de gestion des risques pour l'aide à la replanification

4.1. Processus de gestion des risques

Notre approche d'aide à la replanification sous incertitude est basée sur la gestion des risques. Nous nous référons au processus défini dans la norme (ISO 31000 :2018) pour la gestion des risques. Ce processus se compose de trois activités principales (voir la figure 20).

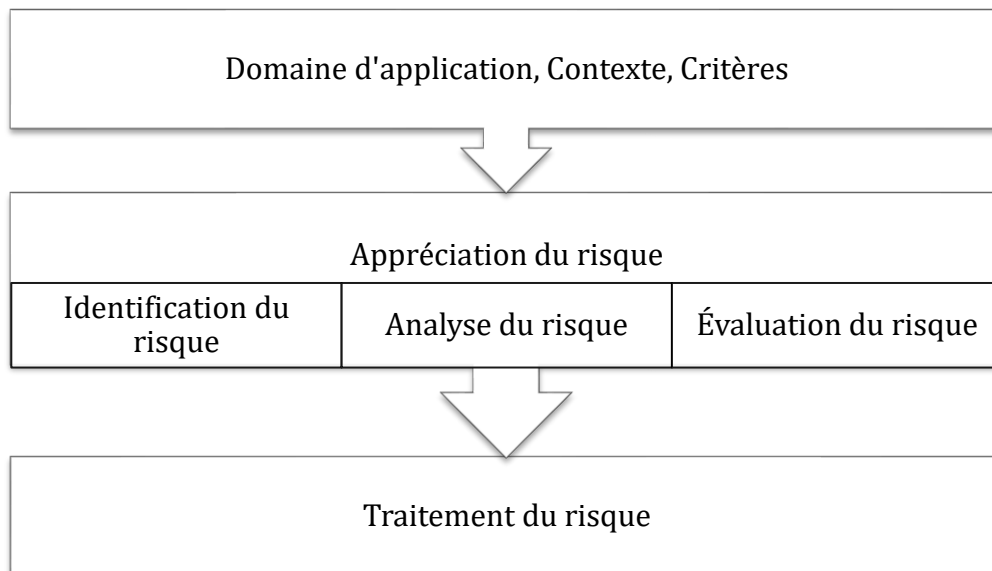


Figure 20. Processus de gestion des risques selon la norme (ISO 31000 :2018)

Tout d'abord, le contexte et la portée des activités de gestion des risques sont établis.

La deuxième activité consiste en une appréciation des risques avec trois étapes principales :

- Identifier et décrire les risques liés aux objectifs et au contexte définis.
- Identifier les techniques d'analyse pour quantifier les risques en estimant leurs conséquences et leurs vraisemblances qui sont combinées pour déterminer la criticité du risque.
- Évaluer l'importance du risque ce qui permet de décider si le risque est tolérable ou non, en fonction des objectifs et des critères du décideur. Cette étape consiste à élaborer une base de comparaison des niveaux de risque qui alimente le processus de décision sous incertitude.

Sur la base des résultats de la phase d'appréciation du risque, le décideur doit être en mesure d'évaluer s'il est nécessaire ou non de traiter un risque.

Enfin, le traitement du risque consiste à élaborer des options et des stratégies pour traiter et atténuer les risques identifiés comme intolérables suite leurs appréciation.

4.2. Périmètre d'application, contexte et critères

Dans une chaine logistique décentralisée, nous considérons un réseau divergeant de distribution constituée de deux niveaux. D'abord, un Centre de Distribution Centrale (CDC) où les produits fabriqués à l'usine sont stockés avant d'être répartis sur des Centres de Distribution Locaux (CDL) implantés dans différents endroits à l'échelle internationale. Pour aborder notre problème et répondre aux questions de recherche de cette thèse, nous optons pour la perspective d'un planificateur du CDC qui aura comme fournisseur une usine de production et comme clients des CDLs.

Dans un centre de distribution, à une date donnée, pour chaque produit géré j , un décideur :

1. reçoit un ensemble de plans de besoins d'approvisionnement (demande) $\{(d_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in \{IJ\}}$ de l'ensemble ses clients $\{IJ\}$ consommant le produit j pour l'ensemble de période $\{t\}$ d'un horizon de taille T .
2. reçoit un plan de réceptions programmées (appros) $(r_t^j)_{t \in [T]}$ du produit j de son fournisseur pour l'ensemble de période $\{t\}$ d'un horizon de taille T .
3. promet un ensemble de plans de livraison $\{(x_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in \{IJ\}}$ destinés à l'ensemble de ses clients $\{IJ\}$ consommant le produit j pour l'ensemble de périodes $\{t\}$ d'un horizon de taille T .

Ainsi, les décisions à supporter sont les plans de livraison $\{(x_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in \{IJ\}}$ par produit destinés aux différents clients.

La nervosité des plans du planificateur de production en amont $(r_t^j)_{t \in [T]}$ et des plans des décideurs au niveau des CDL en aval $\{(d_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in \{IJ\}}$ sont les deux sources d'incertitudes considérées dans ces travaux. En effet, leur nervosité se propage et impacte la stabilité de la décision du planificateur de distribution centrale. Nous négligeons par ailleurs les incertitudes liées au processus interne de l'unité de distribution.

Nous estimons qu'un expert est capable de communiquer des informations sur les incertitudes dans les quantités cumulées des plans des décideurs.

Nous nous basons principalement sur l'analyse détaillée par (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017) sur les incertitudes dans la demande cumulée pour une représentation basée sur les intervalles.

Nous approfondissons cette analyse ensuite dans le chapitre IV, pour intégrer les dimensions pratiques et métiers pour la prise en compte de la connaissance des experts sur les incertitudes dans les quantités cumulées d'un plan. L'objectif est d'assurer une bonne interprétation des informations des experts pour une représentation basée sur des ensembles flous.

Nous négligeons les aléas d'exécution et nous focalisons sur les décisions de planification de l'horizon flexible, les plus impactées directement par les changements des prévisions des autres acteurs et leurs comportement faces aux incertitudes.

Concernant l'identification des risques, nous optons pour une approche basée sur l'opinion d'experts qui peut être enrichie par d'autres meilleures approches.

Pour l'analyse des risques, nous utilisons une approche quantitative et nous utilisons la matrice des risques pour l'évaluation.

4.3. Identification des risques

L'objectif d'un planificateur est de faire des promesses de livraison aussi fiables que possible qui seront maintenues jusqu'à leur exécution, malgré les variations des besoins d'approvisionnement (demande) des partenaires en amont (clients) et les variations de l'approvisionnement (réceptions programmées) des partenaires en aval (fournisseurs). En effet, une promesse de livraison pour une période t ne peut être fiable que si elle demeure réalisable et satisfaisante sur l'horizon glissant.

Ainsi, dans ces travaux, nous allons nous intéresser aux risques dont l'occurrence aura un impact direct sur la stabilité de la décision sur l'horizon glissant jusqu'à la date d'exécution et qui sont liés aux incertitudes des décisions transmises par les autres partenaires du SC. Nous ne considérons que les incertitudes de planification et nous négligeons les aléas d'exécution.

$(d_t^j)_{t \in [T]}$ et $(x_t^j)_{t \in [T]}$ sont respectivement les plans totaux (tous clients confondus) agrégés par produit j des ensembles des plans $\{(d_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in [IJ]}$ et $\{(x_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in [IJ]}$, calculés pour chaque période comme suit $x_t^j = \sum_{i \in [IJ]} x_t^{ij}$ et $d_t^j = \sum_{i \in [IJ]} d_t^{ij}$.

$\{(D_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in [IJ]}$, $(R_t^j)_{t \in [T]}$ et $\{(D_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in [IJ]}$ sont les plans cumulatifs (depuis le début du plan) calculés pour chaque période comme suit : $D_t^{ij} = \sum_{s=1}^t d_s^{ij}$, $R_t^j = \sum_{s=1}^t r_s^j$, $X_t^{ij} = \sum_{s=1}^t x_s^{ij}$.

S_0^j est le stock initial du produit j à la date de planification.

Les risques qui pourraient être définis dans cette phase dépendront principalement du niveau de visibilité du décideur des données de planification des autres acteurs. Plus précisément celles des clients, car les décisions de livraison ont un impact direct sur leurs stocks et leurs performances. Par conséquent, cela dépendra du niveau de partage d'information dans la SC. Dans une chaîne où le partage d'information va au-delà d'un partage minimal de plan de demande/approvisionnements, le planificateur du CDC est en mesure d'inclure un plus grand nombre de risques à évaluer sous incertitude.

Dans le contexte de ces travaux, nous négligeons le risque de surstockage et considérons plutôt une SC basée sur un partage minimal de l'information. Ainsi, notre étude se concentre sur les risques ayant un impact sur la performance interne du point de vue du planificateur au niveau du

CDC. Le tableau 3 contient les événements examinés qui ont un impact sur la performance de la planification, les risques associés et les paramètres d'incertitude qui les impliquent.

Événement	Formulation	Description	Source d'incertitude	Risque connexe	Type
$L1$	$R_t^j < X_t^j - S_0$	Promesse infaisable/irréalisable	Approvisionnement R_t^j	Risque de rupture	Menace
$L2$	$D_t^j > X_t^j$	Une promesse insatisfaisante	Demande totale D_t^j	Risque d'insatisfaction de la demande totale	Menace
$L3$	$D_t^{ij} > X_t^{ij}$	Une promesse insatisfaisante	Demande du client i , D_t^{ij}	Risque d'insatisfaction du client i	Menace
$L4$	$L1 \cup L2$	Une promesse peu fiable	Approvisionnement R_t^j et Demande totale D_t^j	Risque de replanification Ou Risque de défaut d'exécution	Menace
$L5$	$\overline{L1} \cap \overline{L2}$	Une promesse fiable	Approvisionnement Et demande totale	Robustesse	Opportunité

Tableau 3. Risques, incertitudes et événements connexes

Le maintien de la promesse de livraison x_t^{ij} sur différents cycles de planification jusqu'à sa réalisation dépend principalement de la disponibilité des quantités prévues dans le stock ($\overline{L1}$). Cependant, la satisfaction du client augmente en minimisant l'écart entre cette promesse et la demande. Nous négligeons le risque de surstockage et nous considérons que les clients ont une capacité de stockage infinie. Un client (i) est satisfait si la quantité de livraison X_t^{ij} promise pour une période t répond au moins à sa demande D_t^{ij} (**hypothèse : taux de service objectif = 100%**), ($\overline{L3}$).

Planifier une quantité de livraison aux clients qui dépasse le stock prévu ($L1$) (**risque de rupture**) ou promettre une quantité inférieure à la demande des clients ($L2$) (**risque d'insatisfaction de la demande totale**), implique soit un risque de ne pas tenir cette promesse dans les cycles de planification futurs, donc un **risque de replanification**, soit un risque de ne pas l'exécuter si le décideur tient cette promesse, donc un **risque de défaut d'exécution**.

Cependant, l'évaluation du risque lié à l'événement $L5$ sous une demande et des approvisionnements incertains revient à évaluer de la **robustesse** du plan face aux incertitudes (respect des contraintes $\overline{L1}$ et $\overline{L2}$ simultanément).

4.4. Analyse des risques

Dans cette phase, le type de modélisation de l'incertitude considéré aura un impact sur la modalité et l'approche de l'analyse de risque.

Dans ce travail, nous considérons deux formes de représentation des incertitudes : une représentation basée sur des ensembles flous et une représentation basée sur des intervalles. Nous ramenons la représentation basée sur les intervalles à une représentation basée sur les ensembles flous modélisant une ignorance totale sur les intervalles fournis.

Notre approche de l'analyse des risques se base principalement sur les mesures de la théorie des possibilités (possibilité, nécessité) pour estimer la vraisemblance des risques ainsi que l'analyse de leur criticité à partir d'une représentation avec des ensembles flous d'incertitudes. Nous considérons les trois dimensions de l'analyse de la criticité d'un risque : sa sévérité, sa fréquence et l'adaptabilité à ce risque. De plus, nous mesurons la robustesse du plan afin de filtrer les plans les moins vulnérables face aux incertitudes.

Dans ces travaux, l'objet de chaque processus d'analyse est un plan d'approvisionnement $(x_t^j)_{t \in [T]}$ total des CDL élaboré par le CDC pour un produit j dont nous analysons les risques associés. Pour ce faire, nous mesurons d'abord la vraisemblance de chaque risque pour chaque période t . Ensuite, nous mesurons la fréquence d'occurrence du risque sur l'horizon de planification T . Puis, à un niveau agrégé, nous estimons la gravité de ce risque. La gravité permet de mesurer à quel point le risque est imposant, voire sûr, compte tenu des différentes mesures de vraisemblance sur l'horizon T . Enfin, l'adaptabilité estime dans quelle mesure le plan en cours d'analyse est adaptable via des opérations de lissage (i.e. re-répartition des quantités entre les périodes $\{t\}$) pour éviter ou réduire les risques identifiés. Cette dernière mesure est basée sur l'analyse des quantités totales cumulées de toutes les périodes de l'horizon X_T^j .

Afin d'aider le décideur à réviser la répartition du plan total sur ces différents clients, nous proposons aussi de la même manière une analyse des plans par client $\{(d_t^{ij})_{t \in [T]}\}_{i \in [I]}$ pour le produit j .

Le principe d'analyse est le même pour les deux types de représentations (intervalles et ensembles flous). Nous mesurons l'impact des risques dans le pire et le meilleur des cas en utilisant des combinaisons des bornes des intervalles de demande et d'offre. Cette mesure d'impact est basée sur l'estimation des déviations par rapport aux objectifs en termes de respect des contraintes. Ainsi, le décideur pourra identifier les plans les plus critiques et aussi quantifier les déviations de sa décision afin de mener les bonnes actions d'adaptation de ses plans pour améliorer leur robustesse.

La particularité de notre approche réside dans la finesse de cette analyse de risque d'un plan dans un contexte multi-période, multi-produit, multi-couple (produit*client) et multi-source d'incertitude. De fait, nous utilisons différents niveaux de mesure, par période, par produit et par couple (produit*client) pour parcourir les différentes dimensions de l'analyse de risque. Elle se caractérise également par sa scalabilité en termes de nombre de risques pouvant être pris en compte ainsi que des incertitudes à l'origine de ces risques. À cela s'ajoute la flexibilité de l'approche et la facilité de l'adapter et de la personnaliser aux différents contextes et activités planifiées.

Dans le chapitre V, nous présenterons le modèle d'analyse et d'estimation des différentes dimensions de caractérisation des risques.

4.5. Évaluation des risques

La norme (ISO 13849-1, 2008) définit la structure classique de l'arbre d'évaluation des risques (figure 21). Cette évaluation est basée sur trois niveaux principaux : la gravité du risque, puis sa fréquence et enfin la possibilité de le prévenir.

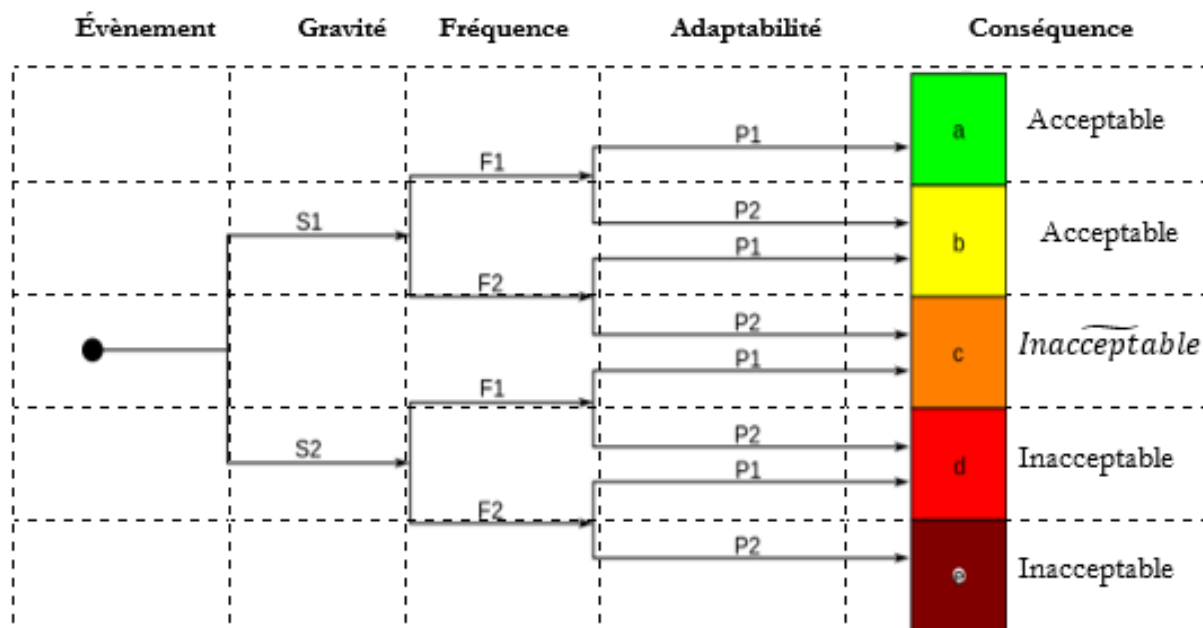


Figure 21. Arborescence d'évaluation de criticité des risques selon la norme (ISO 13849-1, 2008)

Cette analyse arborescente permet de comparer les risques en prenant en compte les résultats des mesures de la phase d'analyse. Ceci permet de classer les risques en fonction de leur criticité.

Nous nous appuyons sur cette arborescence pour fournir un niveau agrégé d'évaluation des risques par plan par produit et nous l'adaptions au contexte et aux objectifs de gestion des risques (voir figure 22). Notre idée derrière cette évaluation est de permettre au décideur d'identifier les plans les plus risqués et, en même temps, de reconnaître les plans ayant une robustesse très importante face aux incertitudes. Ainsi, le décideur peut orienter ses décisions de replanification vers les plans les plus critiques et éviter les modifications insignifiantes des plans à forte robustesse.

Sachant que les risques et la robustesse évoluent inversement face aux incertitudes. Nous ajoutons un premier niveau d'évaluation de la robustesse pour concentrer l'évaluation de la criticité des risques des plans moins robustes et donc optimiser le processus d'évaluation.

Robustesse = $\text{Min} (\text{Nécessité de } L5(t) \text{ pour } t \in T)$. Ainsi, plus un plan est robuste et plus on est sûr qu'il n'aura pas à être adapté malgré les variabilités considérées.

Gravité = Max (Nécessité de L4 pour $t \in T$). Ainsi, plus un plan est grave et plus on est sûr qu'il devra être remis en cause pour au moins une période.

Fréquence = fréquence de possibilité de L4 forte pour $t \in T$. Ainsi, la fréquence mesure la proportion de périodes pour lesquelles une remise en cause du plan est possible.

Adaptabilité = Possibilité forte de L5 pour $t = T$. Ainsi, un plan est adaptable s'il peut répondre à la fin de l'horizon à la demande cumulée par les approvisionnements cumulés. Auquel cas, ses risques peuvent être évités par un meilleur lissage dans le temps des livraisons. À contrario, un plan peu adaptable a un problème de quantité totale insuffisante en plus du problème de répartition dans le temps.

Sur les différents niveaux d'évaluation de l'arbre, le décideur peut paramétrer r , s , f et a comme points de coupure de l'arbre afin de moduler les tolérances du système de classification des plans par produit en fonction de la criticité de leurs risques associés.

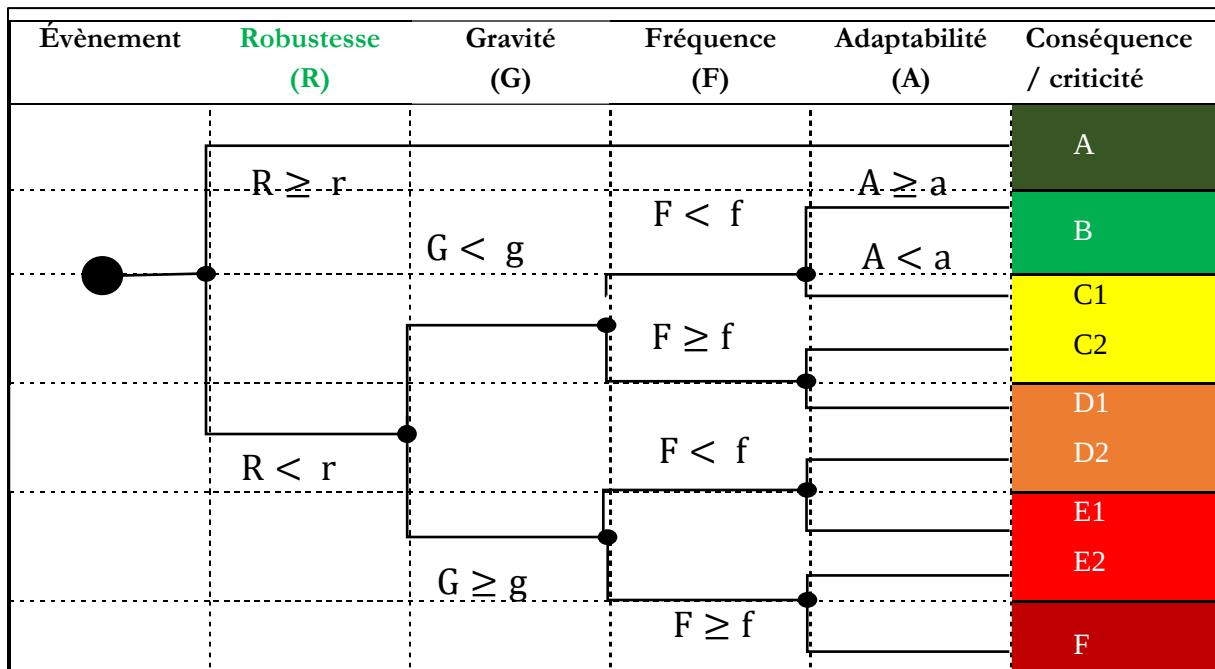


Figure 22. Arborecence d'évaluation de la robustesse et de la criticité des risques associés à un plan

Enfin, la matrice des risques de la figure 23 permet de positionner les plans par produit en fonction des résultats de la classification dans l'arbre. L'axe horizontal représente deux critères d'évaluation qui sont la fréquence et la gravité du risque. L'axe vertical contient le troisième critère qui est l'adaptabilité du plan avec des opérations de lissage. De plus, une zone est dédiée aux plans identifiés comme robustes suite à leur évaluation.

Plan non robuste	Lissage insuffisant		C1	D1	E1	F
	Lissage suffisant		B	C2	D2	E2
Plan Robuste		A				
R	A G/F	Plan Robuste	Rare à Impossible	Fréquent Possible	Rare Sûr	Fréquent Sûr
R			Plan non robuste			

Figure 23. Matrice des risques proposée

4.6. Traitement des risques

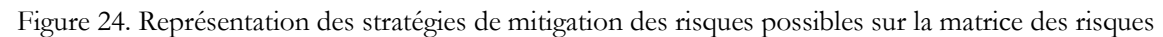
Nous ne traitons pas les risques mais proposons des stratégies adaptées aux résultats de l'évaluation qui permettent de diminuer le risque ou de le répartir entre les clients ou d'utiliser l'alternative de la négociation avec les autres acteurs en cas d'absence d'alternatives en interne.

Pour chaque classe de l'arbre, un ensemble de stratégies potentielles peut être défini. Une combinaison de stratégies permet d'identifier un chemin dans la matrice pour atténuer le risque de replanification et passer à une classe moins critique.

La première étape pour le décideur est d'identifier les plans les plus risqués par produit puis d'entrer dans les détails de l'évaluation du risque d'insatisfaction par ses clients dans un second temps.

Nous distinguons trois stratégies différentes pour diminuer le risque et passer à une classe moins critique (Voir figures 24 et 25).

Pour atténuer le risque de replanification en se déplaçant horizontalement dans la matrice vers une classe moins critique, il faut réduire la gravité (S1) ou la fréquence (S2). Cela est possible principalement par des opérations de lissage des plans en révisant l'allocation des quantités entre les périodes et/ou les clients. Cependant, pour se déplacer verticalement et avoir un risque évitable par l'opération de lissage, il faut augmenter l'adaptabilité (S3). Pour ce faire, le décideur a principalement deux choix : soit réduire la quantité totale de livraison programmée si elle est encore réalisable compte tenu du risque de rupture, soit négocier avec le fournisseur (augmenter les approvisionnements) ou les clients (retarder des besoins en consommant le stock de sécurité) pour trouver une décision de compromis.



Dans une chaîne logistique décentralisée, la planification de la production est généralement effectuée par un ensemble de modules MRP (Manufacturing Resource Planning). Pour la planification des activités de distribution, les entreprises ayant une stratégie "Make To Stock" s'appuient généralement sur des processus DRP (Distribution Resource Planning). Afin de coordonner ces différentes activités, différents modules ERP (Enterprise Resource Planning) sont généralement connectés à une plateforme Cloud de l'entreprise permettant un partage minimal

d'informations (plan de demande/approvisionnement) entre les acteurs des différents maillons de la chaîne ou encore un partage via des échanges de fichiers de planification entre acteurs.

Notre objectif dans ce contexte n'est pas de remplacer ces systèmes de planification existants mais plutôt de mettre en place une plateforme hors ligne fournissant un ensemble de services. Le service principal est le service "évaluation" permettant à chaque décideur de la chaîne, en fonction de son rôle, d'évaluer les risques liés à ses décisions de manière indépendante en intégrant les incertitudes des plans partagés par les autres acteurs. Nous considérons trois rôles : planificateur de production, planificateur CDC ou planificateurs CDL. Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur le rôle du planificateur du CDC et ce service a donc été personnalisé uniquement pour ce décideur. Cependant, ce service pourrait être étendu aux autres acteurs de la chaîne. Cela nécessite principalement une personnalisation de l'étape d'identification des risques en fonction du type d'activité et des contraintes de chaque acteur.

Ensuite, afin d'aider ce décideur à réviser ses plans pour améliorer leur robustesse face aux variations possibles des plans des autres partenaires (demande ou réceptions programmées), nous fournissons deux services supplémentaires. Un service de "prise de décision" qui permet au décideur (i) d'éditer ses décisions pour tester l'impact des modifications sur la criticité des risques associés à ses plans ou (ii) d'évaluer leur performance. L'historique des tests effectués par un planificateur est sauvegardé à la demande du décideur afin d'optimiser le processus de prise de décision du planificateur. Enfin, le service "négociation" permet au décideur de négocier avec les autres acteurs dans le cas où les modifications ne sont pas suffisantes pour éviter les événements qui dégradent la robustesse des plans.

5.1. Processus d'aide à la décision

Le planificateur du CDC utilise l'outil d'aide à décision en effectuant une boucle de test de modifications visant à réduire la criticité des risques et par conséquent à améliorer la robustesse de ses plans de livraison selon le processus représenté dans la figure 26.

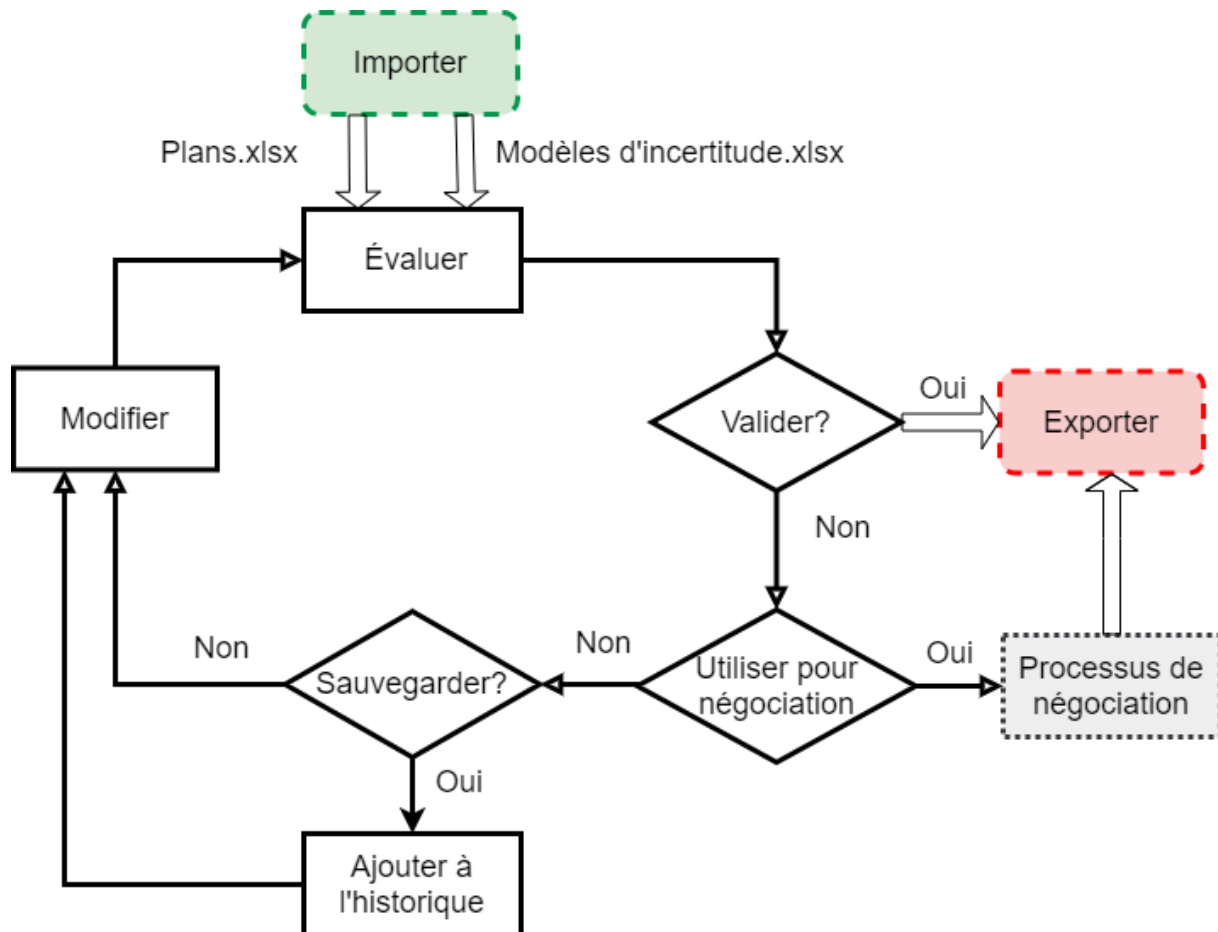


Figure 26. Processus d'aide à la décision sur la plateforme d'aide à la replanification sous incertitudes

Le processus de prise de décision d'un planificateur commence par une activité d'importation des plans de l'ERP/DRP qui inclut également les plans transmis par les autres acteurs de la chaîne. Ensuite, le décideur importe les modèles d'incertitude disponibles liés à la demande de ses clients et aux réceptions programmées de ses fournisseurs. Une fois cette étape franchie, il peut lancer l'évaluation de la robustesse des plans d'approvisionnement de ses clients. En fonction des indicateurs générés, il décide de continuer dans son processus de décision ou de valider et exporter les décisions évaluées. Si le planificateur décide de continuer, il aura le choix entre utiliser ces plans dans le cadre d'un processus de négociation afin de chercher un compromis (figure 27 dans §5.2) ou de tester un autre scénario de plans d'approvisionnement. Dans ce dernier cas, il aura le choix de sauvegarder le scénario qu'il vient de tester ou pas et continuer à en tester un autre. Une interface de modification lui permet d'éditer ses plans et de relancer l'évaluation jusqu'à ce qu'il trouve une décision de compromis et qui sera plus robuste.

5.2. Processus de négociation

Au cours du processus de décision, le décideur peut identifier des événements qui sont inévitables même avec l'application des opérations de lissage du plan. Dans ce cas, il peut choisir d'initier un processus de négociation (voir Figure 27) avec un client et/ou son fournisseur pour trouver un compromis qui lui permettra d'éviter une rupture planifiée ou un taux de service significativement dégradé. Ce processus peut ainsi être initié soit avec un client pour proposer une modification de

sa demande et négocier la promesse de livraison, soit avec un fournisseur pour négocier une augmentation de ses approvisionnements.

Généralement, un processus de négociation engage un fournisseur et un client. Un acteur de la SC peut être impliqué dans autant de processus de négociation que le nombre de liens directs qu'il a avec les autres maillons de la chaîne. Dans chaque lien, il peut avoir un rôle de client ou de fournisseur.

Le processus de négociation est basé principalement sur un échange de plans montrant les déviations par rapport aux quantités planifiées dans les périodes passées. Cette négociation est soumise à des contraintes, principalement le délai minimum d'approvisionnement prédéfini et des stratégies pour assurer la stabilité des plans à court terme, comme l'horizon gelé.

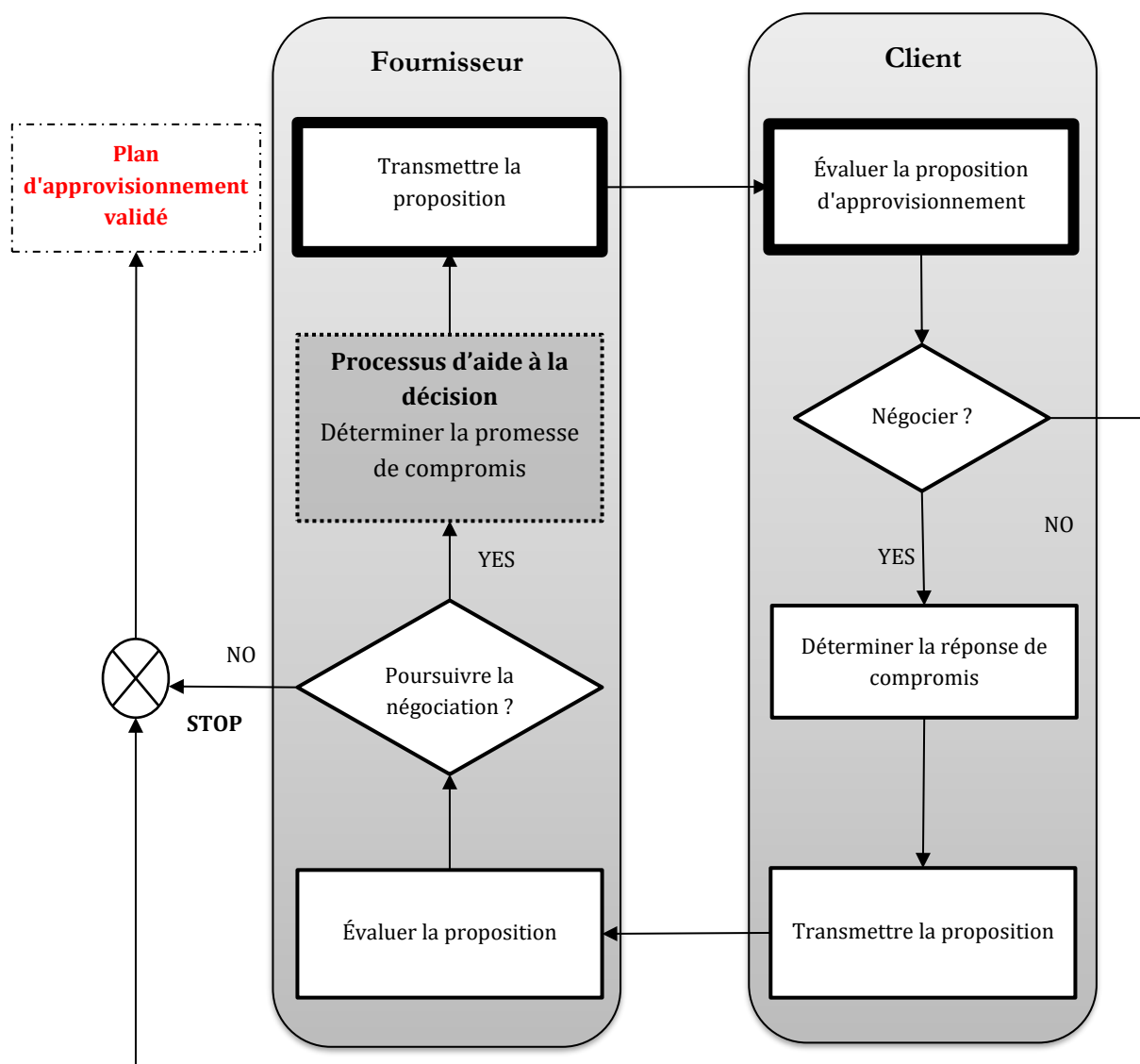


Figure 27. Processus de négociation

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté la problématique de recherche, les questions de recherche et les contributions associées, le cadre théorique, la méthodologie suivie pour répondre aux différentes questions et les hypothèses de cette thèse.

Nous avons identifié trois contributions :

- Une contribution métier qui permet de traduire les informations d'un expert afin de modéliser les incertitudes des plans des autres acteurs.
- Une contribution méthodologique et théorique de gestion des risques pour aider le décideur à évaluer les risques de ses plans en prenant en compte les incertitudes dans les plans des autres acteurs.
- Une contribution pratique est liée à la définition des fonctionnalités du système d'aide à la décision basé sur ce modèle et à son implémentation dans un contexte dynamique à horizon glissant.

Nous avons suivi la démarche classique de gestion des risques définie dans la norme (ISO 31000 :2018). Nous avons spécifié les méthodes et hypothèses de chaque activité de ce processus depuis la définition du périmètre jusqu'à l'évaluation. Ces méthodes et approches sont principalement quantitatives.

Dans le chapitre suivant, nous détaillons notre apport théorique d'analyse de risque et de robustesse des plans d'un décideur, tout en intégrant les connaissances d'un expert pour la modélisation de l'incertitude dans les plans cumulés des autres acteurs.

CHAPITRE IV : ANALYSE DES RISQUES POUR L'AIDE A LA REPLANIFICATION

1.	Introduction.....	95
2.	Background : ensembles flous et mesures de la théorie de possibilité	96
3.	Modélisation des incertitudes dans les plans cumulés transmis à un décideur.....	96
3.1.	Modélisation basée sur un dire expert	96
3.2.	Illustration I.1	102
4.	Approche possibiliste d'analyse des risques : Théorie de possibilité.....	104
4.1.	Mesure des risques.....	104
4.2.	Illustration I.2	104
4.3.	Agrégation des indicateurs d'évaluation de criticité des plans par produit ...	107
4.4.	Illustration I.3	108
5.	Approche d'analyse des risques basée sur des intervalles comme cas particulier des ensembles flous	111
5.1.	Qualification des risques.....	111
5.2.	Extension des indicateurs basés sur des distances aux bornes des intervalles	114
5.3.	Illustration I.4	116
6.	Conclusion	119

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé des contributions pour répondre à la problématique de recherche et aux différentes questions de recherche soulevées par la revue de la littérature et l'analyse des besoins industriels. Nous avons aussi détaillé la méthodologie adoptée pour chaque contribution.

Les résultats de ce chapitre s'inscrivent dans la démarche de gestion de risque détaillée dans le chapitre précédent (voir figure 28). Nous focalisons sur l'activité d'analyse des risques qui vise à évaluer les risques selon les critères prédéfinis.

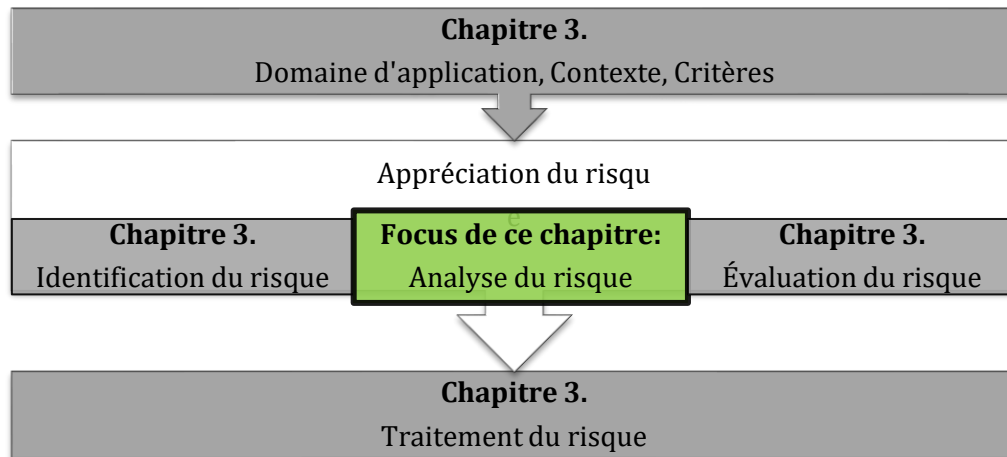


Figure 28. Positionnement du chapitre 1 dans le cadre d'application de la démarche de gestion des risques

Ici, nous répondons aux deux questions de recherche (QR1, QR2) de notre contribution théorique sur l'évaluation des risques, qui sont les suivantes :

QR1.

Comment intégrer la connaissance d'un expert sur les incertitudes dans les plans transmis par les autres acteurs du SC (demande & approvisionnement) y compris les comportements de ces acteurs, avec une modélisation basée sur les ensembles flous ?

QR2.

Comment intégrer ces incertitudes pour une analyse et une évaluation quantitative des risques liée à une décision (un plan) élaboré à une date donnée par ce décideur ?

Dans un premier temps, nous présentons le background théorique du modèle proposé lié à l'utilisation des mesures de la théorie des possibilités. Ensuite, nous formalisons les différentes informations qu'un décideur peut fournir sur les incertitudes dans les plans cumulés des autres acteurs, afin de les intégrer pour modéliser ces incertitudes avec des ensembles flous. Nous détaillons ensuite le modèle d'analyse des risques et les indicateurs agrégés pour leur évaluation. Nous présentons également une approche d'évaluation des risques dans le cas d'une représentation

par intervalles des incertitudes. Nous représentons cette approche comme un cas particulier du modèle précédent. Une illustration est proposée tout au long de cette partie comme exemple d'application de ces modèles.

2. Background : ensembles flous et mesures de la théorie de possibilité

La nécessité et la possibilité d'un évènement A sont les deux mesures principales décrivant l'incertitude de cet évènement à partir d'une distribution de possibilité (Zadeh 1965).

La possibilité $\Pi(A)$ évalue à quel point l'évènement A est possible :

$$\Pi(A) = \sup_{x \in A} (\pi(x)) \quad (1)$$

La nécessité $N(A)$ évalue à quel point l'évènement A est sûr (certain) et elle est liée à la mesure de possibilité par la propriété de dualité (contrairement aux probabilités autoduales, $P(A) = 1 - P(A^C)$) suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^C) = \inf_{x \notin A} (1 - \pi(x)) \quad (2)$$

Ces mesures satisfont les conditions de normalisation suivantes :

$$\Pi(A) + \Pi(A^C) \geq 1 \quad (3)$$

$$N(A) \leq \Pi(A) \quad (4)$$

$$\forall A, B \subseteq S, \Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)) \quad (5)$$

$$\forall A, B \subseteq S, N(A \cap B) = \min(N(A), N(B)) \quad (6)$$

k est un nombre précis, les mesures de possibilité et de nécessité de l'évènement ' $x \geq k$ ' et de l'évènement ' $x \leq k$ ' sont les suivantes :

$$\Pi(x \geq k) = \Pi(x \in [k, +\infty[) = \sup_{x \geq k} (\pi(x)) \quad (7)$$

$$\Pi(x \leq k) = \Pi(x \in]-\infty, k]) = \sup_{x \leq k} (\pi(x)) \quad (8)$$

$$N(x \geq k) = 1 - \Pi(x < k) = \inf_{x < k} (1 - \pi(x)) \quad (9)$$

$$N(x \leq k) = 1 - \Pi(x > k) = \inf_{x > k} (1 - \pi(x)) \quad (10)$$

3. Modélisation des incertitudes dans les plans cumulés transmis à un décideur

3.1. Modélisation basée sur un dire expert

La première étape pour prendre en compte des incertitudes est de les modéliser. Cette modélisation peut être issue d'une analyse de l'historique des plans à horizon glissant ou faite à 'dire expert'. Ainsi, nous détaillons dans cette section la représentation des incertitudes dans les données cumulées de planification, comme des informations qui peuvent être fournies par un expert afin de

modéliser les incertitudes dans la demande et les approvisionnements cumulés par des ensembles flous.

Il semble important d'insister tout d'abord sur la différence entre les incertitudes dans les quantités planifiées et les incertitudes dans les quantités cumulée prévues dans un plan sur un horizon de planification. (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017) soulignent bien la différence entre le fait d'exprimer les incertitudes en termes d'écart Δ_t de la demande par rapport la demande nominale par période t (représentation (a) de la figure 29) ; et exprimer les incertitudes sur la demande cumulée par rapport à la demande cumulée nominale d_t par période t (représentation (b) de la figure 29). Le cumulé des écarts par période dans le premier cas (a) n'est pas forcément l'écart par rapport à la quantité cumulée pour une période t (b). En effet : **l'écart par rapport à la quantité cumulée ($Q_t = \sum_{i=1}^t q_i$) à une période t est inférieur ou égal au cumul des écarts jusqu'à la période t par rapport la quantité q_t** . La raison est dans des phénomènes de compensation d'incertitudes entre des périodes consécutives (« si on vend plus que prévu à une période donnée, on vendra souvent un peu moins aux périodes suivantes »), mais aussi à des phénomènes de lissage des décisions en réaction à ces incertitudes.

En plus : « Contrairement à l'incertitude spécifique à une période, qui ne peut pas modéliser les réductions d'incertitude dans certaines parties d'un horizon de planification, définir l'incertitude sur la demande cumulée permet au décideur de saisir une variation de l'incertitude tout au long d'un horizon de planification » (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017).

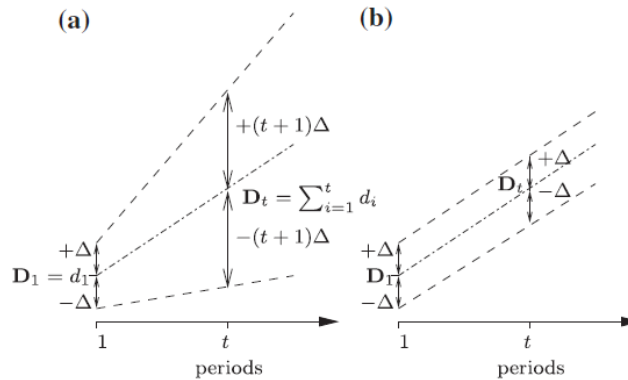


Figure 29. (a) Cas avec incertitude sur la demande d_t . (b) Cas avec incertitude sur la demande cumulée D_t (source : (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017))

Ainsi, dans notre travail nous focalisons sur la représentation des incertitudes sur les quantités cumulées d'un plan. La représentation d'incertitudes autour d'une quantité cumulée Q_t d'une période t , la plus intuitive pour un décideur est la suivante : $[Q_t - \underline{\Delta}_t; Q_t + \overline{\Delta}_t]$. $\underline{\Delta}_t$ et $\overline{\Delta}_t$ sont les écarts maximaux par rapport à la quantité cumulée Q_t .

À partir de l'analyse de (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017), nous différencions trois type d'informations que l'expert peut fournir sur la base de ses connaissances sur les plans cumulés transmises par les autres acteurs :

- **(I1)** : Écart constant tout au long de l'horizon de planification : $(\underline{\Delta}_t = \overline{\Delta}_t = K, \forall t \in T)$

- **(I2)** : Variation proportionnelle par rapport aux quantités cumulées Q_t jusqu'à une période t : $\Delta_t = \alpha Q_t, \forall t \in T, \alpha \in [0,1]$.
- **(I3)** : Variation due au lissage des quantités entre les périodes consécutives, $\underline{\Delta}_t = \alpha q_t; \overline{\Delta}_t = \alpha q_{t+1}, \alpha \in [0,1]$.

Dans nos travaux, nous nous basons sur les ensembles flous pour la représentation des incertitudes autour des demandes cumulées $\{(D_t^{ij})\}_i$ des clients $\{I\}$ consommant le produit j et des plans cumulés d'approvisionnements (R_t^j) . De façon générale, nous représentons les incertitudes autour d'une quantité cumulée Q_t jusqu'à une période t avec une distribution de possibilité trapézoïdale ayant comme paramètres $(\underline{A}_t; \underline{B}_t; \overline{C}_t; \overline{D}_t)$ (figure 30).

Des variations de la quantité Q_t sont tout à fait possibles (Possibilité=1) dans $[\underline{B}_t, \overline{C}_t]$ et impossible au-delà de $[\underline{A}_t, \overline{D}_t]$. Ainsi les mêmes informations (I1, I2, I3) peuvent être fournis pour décrire les incertitudes de Q_t pour chacun des intervalles $[\underline{B}_t, \overline{C}_t]$ et $[\underline{A}_t, \overline{D}_t]$.

Une distribution de possibilité triangulaire ou une distribution rectangulaire sont des cas exceptionnels où respectivement $(\underline{B}_t = \overline{C}_t = Q_t)$ où $(\underline{A}_t = \underline{B}_t \text{ et } \overline{C}_t = \overline{D}_t)$.

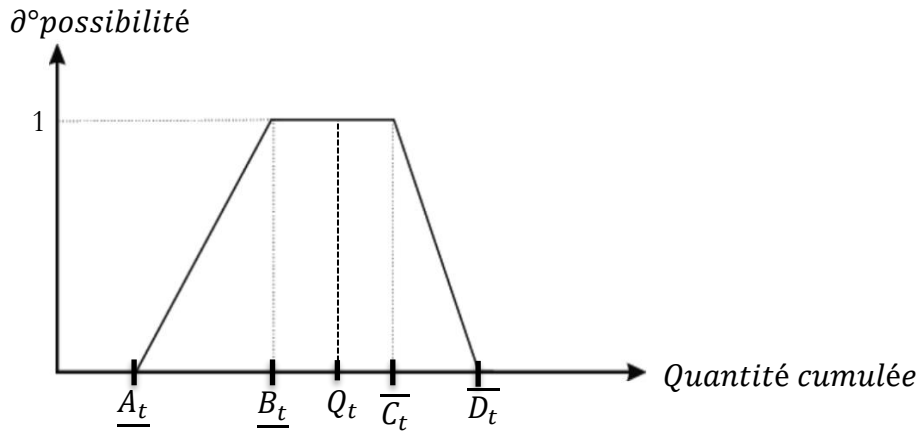


Figure 30. Distribution de possibilité autour d'une quantité cumulée Q_t

Les **types de variations** autour de la quantité Q_t peuvent être :

- à la hausse : $\underline{A}_t = \underline{B}_t = 0$;
- à la baisse : $\overline{C}_t = \overline{D}_t = 0$;
- possible dans les deux sens à la hausse et à la baisse (cas exceptionnel : centrée autour de Q_t : $\overline{D}_t = -\underline{A}_t$ et $\overline{C}_t = -\underline{B}_t$).

De plus, nous constatons que les professionnels ont tendance à découper l'horizon de planification afin de décrire l'évolution de l'incertitude sur l'horizon de planification.

Généralement, un expert exprime un pourcentage de déviation par rapport à une quantité cumulée sur un horizon de taille T . Cette donnée caractérise l'**amplitude de variation**. Cependant, cette information admet plusieurs interprétations possibles. Ainsi, nous considérons qu'une formalisation est nécessaire pour orienter l'expert sur l'interprétation de l'information qu'il donne.

Soient α_1, α_2 les données de l'expert sur l'amplitude de variation par rapport à une quantité de référence F_t , appliquées sur la quantité cumulée Q_t jusqu'à la période t ; $\forall t \in [T]$. Nous formulons les hypothèses suivantes :

- soit T la taille d'un horizon qui commence d'une période t_0 : l'expert formule une information qui est valable pour toutes les périodes de $[t_0+1 ; t_0 + T]$;
- $\underline{\Delta}_t = \alpha_1 F_t$, tel que : $\forall t \in [T] \alpha_t = \alpha_1$: l'estimation basse de l'incertitude est similaire sur toutes les périodes de l'intervalle ;
- $\overline{\Delta}_t = \alpha_2 F_t$, tel que : $\forall t \in [T] \alpha_t = \alpha_2$: l'estimation haute de l'incertitude est similaire sur toutes les périodes de l'intervalle;
- Ainsi l'incertitude s'exprime sur $[Q_t - \underline{\Delta}_t ; Q_t + \overline{\Delta}_t]$;

L'enjeu est ainsi dans la formulation de F_t à partir de l'interprétation des dires d'expert. Dans notre proposition, nous distinguons plusieurs types de dires d'expert et la quantité de référence F_t est différente selon le **type** de modèle ($I1 ; I2 ; I3$) et l'**horizon** de référence considérés ((H1) horizon total (T) ; (H2) horizon jusqu'à la période t ($[t_0 ; t] \forall t \in [T]$)).

Nous détaillons dans le tableau 4 les différents calculs de cette quantité de référence selon ces deux dimensions (type de modèle, horizon de référence).

Horizon Type	(H1) Horizon total (T)	(H2) Horizon jusqu'à la période $t \forall t \in [T]$
(I1) $\underline{\Delta}_t = K_1 = \alpha_1 F_t$ $\overline{\Delta}_t = K_2 = \alpha_2 F_t$	$F_t = \mu = \frac{\sum_{t_0}^{t_0+T-1} q_t}{T}$ La quantité moyenne prévue par période sur tout l'horizon T	$F_t = \mu'_t = \frac{\sum_{t_0}^t q_t}{(t - t_0 + 1)}$ La quantité moyenne prévue par période exprimée sur les quantités cumulées depuis le début de l'horizon t_0 jusqu'à t .
(I2) $\underline{\Delta}_t = \alpha_1 F_t$ $\overline{\Delta}_t = \alpha_2 F_t$	$F_t = Q_T = \sum_{t_0}^{t_0+T-1} q_t$ La quantité totale cumulée sur tout l'horizon T	$F_t = \sum_{t_0}^t q_t$ La quantité cumulée depuis le début de l'horizon jusqu'à la période t
(I3) Cas exceptionnel de I1	Conséquence du lissage entre deux périodes successives t et $t+1$ • $\alpha_1 q_t$ est la quantité maximale qui peut être décalée de la période t à la période $t+1$.	

$\underline{\Delta_t} = \alpha_1 q_t ;$ $\overline{\Delta_t} = \alpha_2 q_{t+1}.$	• $\alpha_2 q_{t-1}$ est la quantité maximale qui peut être décalée dans la période t depuis la période t-1.
---	---

Tableau 4. Les différentes applications possibles des informations d'un expert sur les quantités cumulées d'un plan

D'un point de vue métier, le type de modèle I3 modélise une possibilité de lissage entre deux périodes consécutives. Il représente un modèle qui traduit un lissage en faisant l'hypothèse que le lissage ne se décale jamais de plus d'une période.

Le type de modèle I1 traduit également un phénomène de lissage dans lequel une opération de lissage peut se faire sur plus d'une période sans connaître les périodes sources et destination du lissage à considérer dans l'horizon. Ainsi, le lissage est exprimé en pourcentage de décalage sur une quantité moyenne.

Le type de modèle I2 permet de traduire des incertitudes qui s'accumulent sur un horizon de temps mais qui ne se compensent que partiellement. Plus on avance dans le temps, plus les incertitudes croît.

La figure 31 illustre une application des différents modèles détaillés dans la matrice du tableau 1 (I1.H1 ; I1.H2 ; I2.H1 ; I2.H2 ; I3), sur un même plan cumulé et un même modèle d'incertitude (type de variation = centré ; amplitude = $\alpha_1 = \alpha_2 = 80\%$) donné sur un horizon de taille de 9 périodes à partir de la période 1.

Par ailleurs, le découpage de l'horizon et l'application de notre représentation d'un dire d'expert sur chaque horizon peut impliquer une incohérence dans le modèle global résultant (l'exemple de la figure 31 où les min de la quantité cumulées de I2.H1 ne sont pas cohérents car ils baissent dans le temps). Ainsi, un post-traitement visant à assurer la cohérence globale du modèle est nécessaire.

Pour cela, nous procédons à la fusion possibiliste d'une connaissance par période t et nous appliquons la contrainte : un plan cumulé ne peut pas décroître dans le temps. Nous formulons ci-après les contraintes à respecter pour deux valeurs successives du plan cumulé représenté par des distributions de possibilités (cf. figure 30) :

- $\underline{A_t} \geq \underline{A_{t-1}} ;$
- $\underline{B_t} \geq \underline{B_{t-1}} ;$
- $\overline{C_t} \leq \overline{C_{t+1}} ;$
- $\overline{D_t} \leq \overline{D_{t+1}}.$

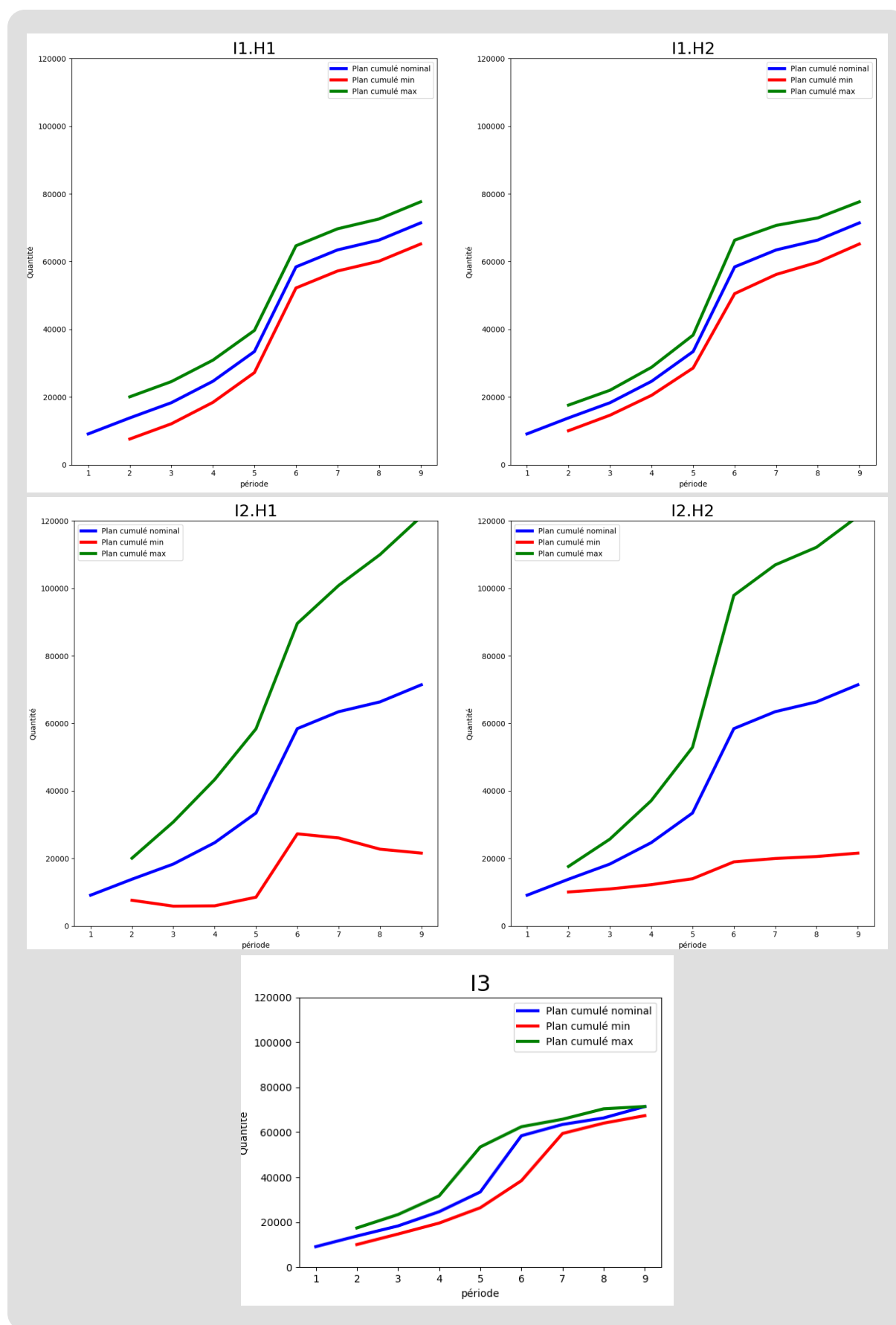


Figure 31. Illustrations des modèles (I1.H1 ; I1.H2 ; I2.H1 ; I2.H2 ; I3) du tableau 1

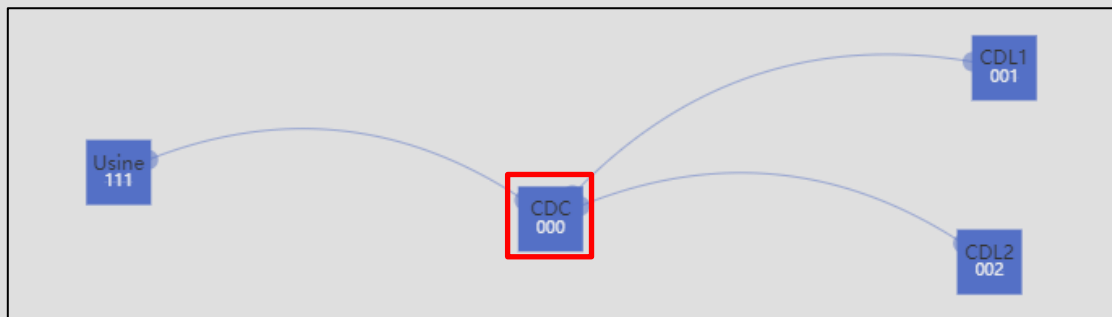
3.2. Illustration I.1

Nous déroulons une illustration d'application du modèle d'interprétation pour la génération des distributions de possibilité. Nous allons nous baser sur cette même illustration pour le reste de ce chapitre.

ILLUSTRATION (I.1) :

MODELISATION DES INCERTITUDES SUR LA DEMANDE ET LES APPROPOS AVEC LES ENSEMBLES FLOUS, A PARTIR DES DONNEES D'EXPERT

Dans un centre de distribution central CDC, le stock du produit P est partagé entre deux centres de distribution locaux CDL1 et CDL2 (clients). Le CDC s'approvisionne également auprès d'une usine produisant le produit fini P . Ci-dessous la représentation de la SC considérée.



À la fin de la période 1, le CDC possède d'un stock initial de 0. En se basant sur les plans transmis de la part des autres acteurs, le CDC a élaboré des plans d'approvisionnement (livraison) de chacun des CDL1 et CDL2 à la période 2. Nous représentons ces différents plans cumulés regroupés par produit et par client dans les graphes des figures 32, figure 33.

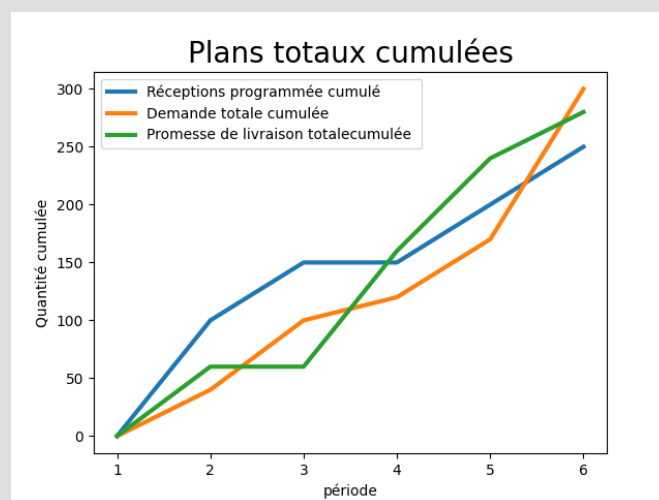


Figure 32. Plans cumulés pour produit P (Réceptions, demande totale, plan de livraison totale)

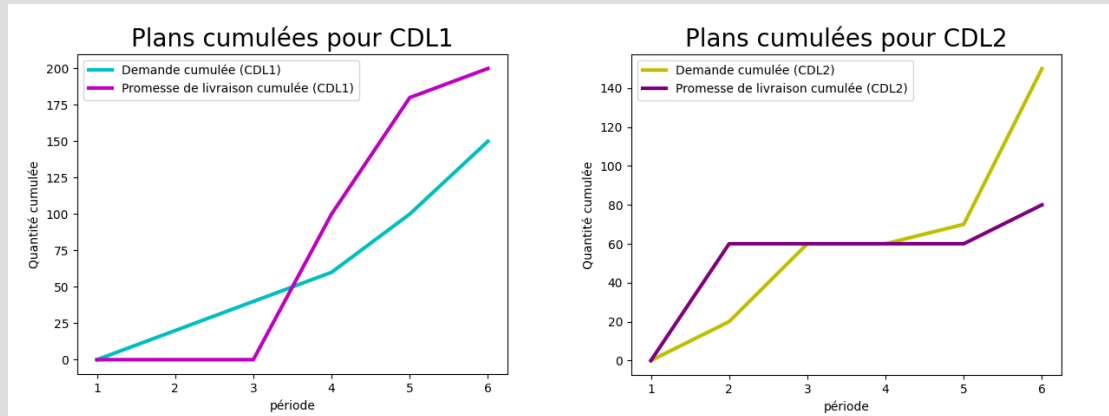


Figure 33. Plans cumulés de demande du CDL1 et CDL2 et les promesses de livraison du CDC

Sur cet horizon de 6 périodes, l'expert a décrit un modèle de type I2.H2 sur la demande et un modèle de type I1.H2 sur les réceptions programmées de l'usine. Dans les deux modèles les variations de 10% à la hausse comme à la baisse sont tout à fait possibles. Des variations au-delà de 50% sont impossibles. Ainsi, les deux modèles ont une amplitude de ($\alpha_1=10\%$, $\alpha_2=50\%$) et un type de variation centrée autour des quantités cumulées programmées.

À la période 6, l'application du modèle permet d'obtenir les distributions de possibilités de chaque quantité des plans des autres acteurs. Ci-dessous les distributions de possibilité identifiées par les paramètres (A, B, C, D) résultants de l'application de ce modèle (figure 34). Les décisions du CDC qui sont les promesses de livraison sont toujours déterministe. Elles sont positionnées sur chacune des distributions.

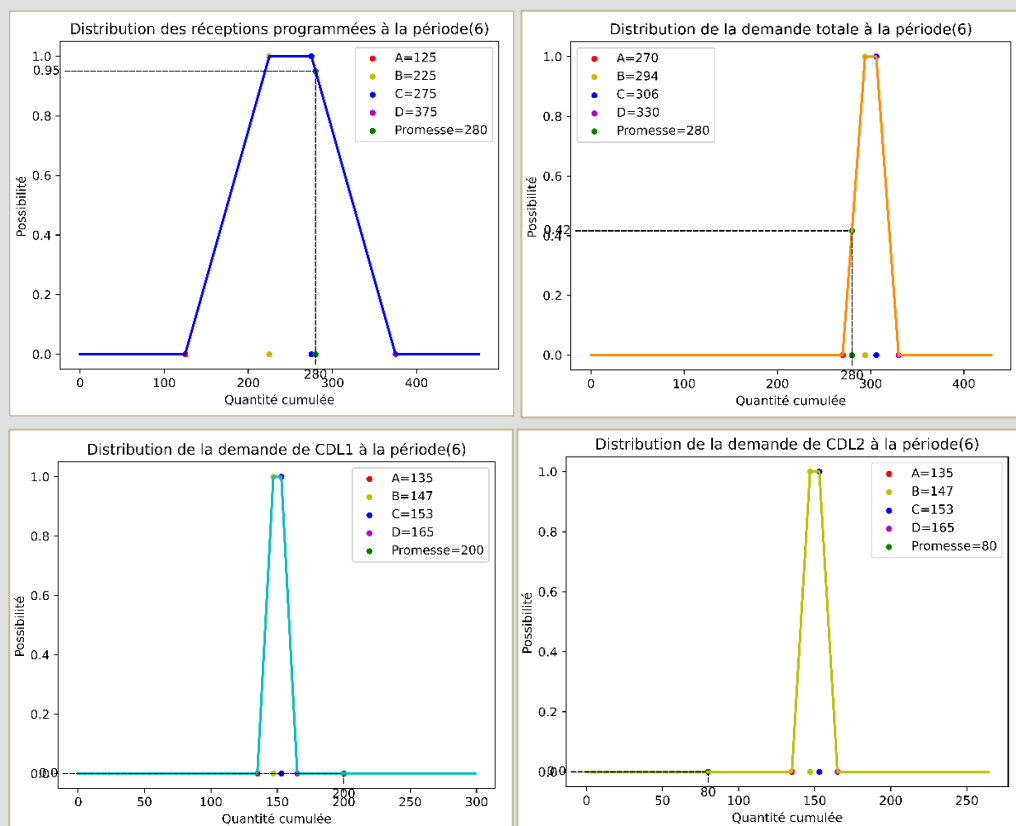


Figure 34. Distributions de possibilité générées à partir du modèle expert

4. Approche possibiliste d'analyse des risques : Théorie de possibilité

4.1. Mesure des risques

Soient $K1$, $K2$, $K4$ respectivement le risque de rupture, le risque d'insatisfaction de la demande totale et le risque de replanification liés à une promesse de livraison totale cumulée X_t^j jusqu'à d'une période t pour un produit j .

Soit $K3i$ le risque d'insatisfaction du client i lié à la promesse de livraison cumulée X_t^{ij} d'une période t et un produit j de ce client.

Ces risques ont été identifiés et définis dans le chapitre 3, dans le cadre de la première activité de définition des risques du processus de leur appréciation.

$L1$, $L2$, $L3i$, $L4$ sont respectivement les événements associés aux risques $K1$, $K2$, $K3i$, $K4$, tels que : $L1 = R_t^j < X_t^j - S_0^j$; $L2 = D_t^j > X_t^j$, $L3i = D_t^{ij} > X_t^{ij}$; $L4 = L1 \cup L2$.

R_t^j représente les réceptions programmées cumulées jusqu'à une période t d'un produit j . D_t^j est la demande totale cumulée jusqu'à une période t d'un produit j , consolidée à partir des demandes D_t^{ij} de l'ensemble des clients $\{Ij\}$ partageons le stock du produit j .

Pour la caractérisation et l'analyse de ces risques nous utilisons les mesures de la théorie de possibilité (possibilité $\Pi(L)$ et nécessité $N(L)$) (cf. §2).

Ainsi, pour chaque période t , nous caractérisons le risque $K \in \{K1, K2, K3i, K4\}$ associé à un événement $L \in \{L1, L2, L3i, L4\}$ par la mesure de la paire $(\Pi(L), N(L))$.

4.2. Illustration I.2

Nous nous basons sur les résultats de l'illustration I.1 pour illustrer les différentes mesures des risques $K1$, $K2$, $K3$, $K4$ liés aux événements $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ pour la période 6.

ILLUSTRATION (I.2) :

MESURES DES RISQUES K1, K2, K3, K4

Toujours à la période 6, en fonction chaque distribution de possibilités des données des autres acteurs demandes réceptions (R_t^j, D_t^j, D_t^{ij}) nous traçons les distributions du couples $(P_i(L), N(L)) / L \in \{L1, L2, L3i, L4\}$ mesurant les risques $K \in \{K1, K2, K3i, K4\}$ en fonction de la décision du CDC, par client X_t^{ij} et totale X_t^j .

Nous positionnons les décisions effectives à la période 6 par rapport à ces distributions. Nous obtenons ainsi les résultats suivants (voir les figures ci-dessous) pour une promesse totale de 280 à la période 6 répartie en 200 pour CDL1 et 80 pour CDL2 :

- $K1 = (P_i(L1), N(L1)) = (1, 0.05)$; Risque de rupture d'appro est tout à fait possible mais pas certaine
- $K2 = (P_i(L2), N(L2)) = (1, 0.58)$; Risque d'insatisfaction de la demande est tout à fait possible et assez certain.
- $K3_{CDL1} = (P_i(L3_{CDL1}), N(L3_{CDL1})) = (0, 0)$; Le risque d'insatisfaction de la demande ne concerne pas CDL1.
- $K3_{CDL2} = (P_i(L3_{CDL2}), N(L3_{CDL2})) = (1, 1)$; Insatisfaction de la demande certaine pour CDL2 dans le cadre de la répartition actuelle de la promesse totale entre CDL1 et CDL2.
- $K4 = (P_i(L4), N(L4)) = (1, 0.58)$. Le besoin de replanification sera par conséquent avec un degré de certitude fort.

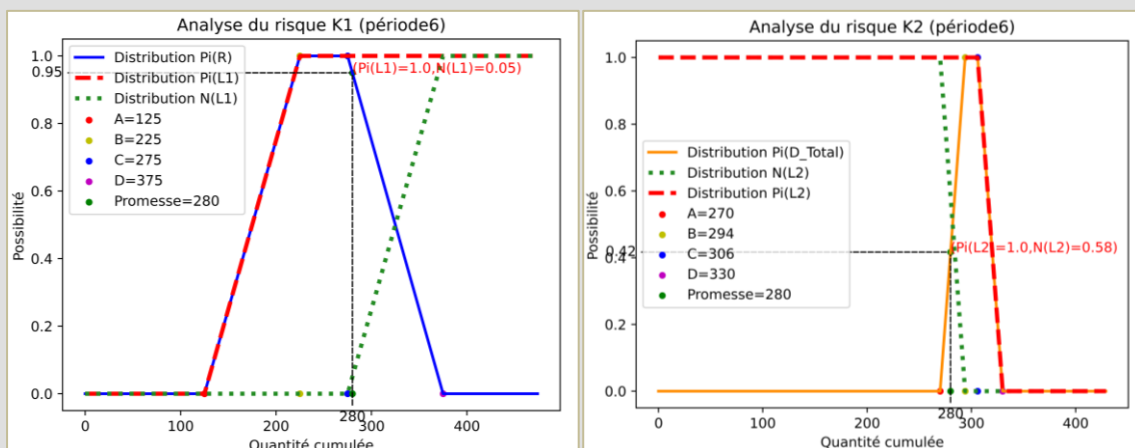


Figure 35. Mesures des risques K1, K2 en fonction de la promesse cumulée de livraisons totales à la période

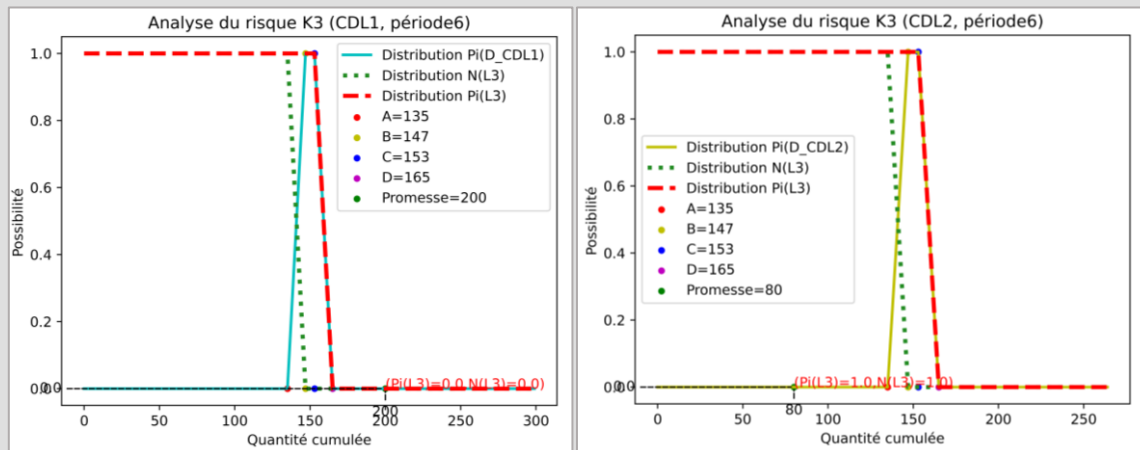


Figure 36. Mesures du risques K3 par client, en fonction de la promesse de livraison de chacun

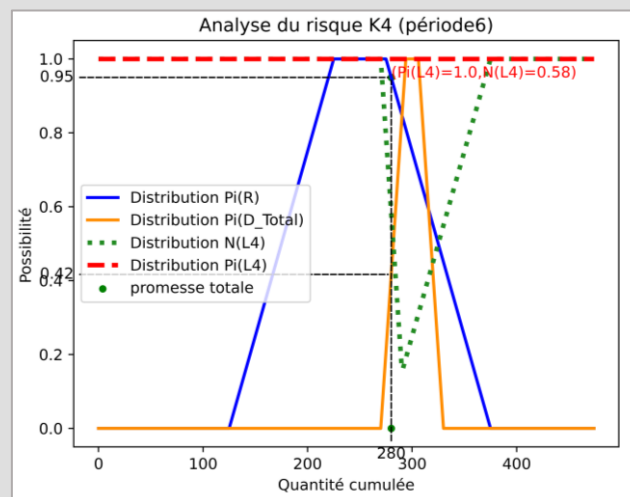


Figure 37. Mesures du risques K4, en fonction de la promesse de livraison totale

Compte tenu des décisions du planificateur au niveau du CDC à la période 6 et des mesures des risques associés à ces décisions, nous parvenons aux conclusions suivantes :

- Il est tout à fait possible que le décideur programme une rupture de son stock à cette période et sûrement à 5%, en gardant cette décision dans les prochains cycles de replanification.
- Il est sûr à 58% que la promesse totale ne satisfera pas les demandes totales des clients. Ce risque est principalement associé au client CDL2. Il est sûr à 100% que quelle que soit la demande de ce client, en gardant la même promesse, cette demande ne sera pas satisfaite. Ainsi le CDC risque d'entraîner une rupture chez le CDL2. Contrairement au client CDL1, la promesse qui lui a été confié permettra toujours de satisfaire sa demande quelle que soit cette demande.
- Ainsi, une replanification de la promesse de la période 6 dans les prochains cycles est tout fait possible et sûre à 58% compte tenu des variations possibles des plans des autres acteurs.

4.3. Agrégation des indicateurs d'évaluation de criticité des plans par produit

Nous utilisons le résultat des mesures de la vraisemblance des risques pour générer les différents indicateurs agrégés qui seront utilisés dans la phase suivante de l'évaluation arborescente pour la classification des plans par produit : **Robustesse**, **Gravité**, **Fréquence**, **Adaptabilité**. Ces indicateurs sont agrégés par produit, donc associés à la décision totale X_t^j et aux plans par produit des autres acteurs (Σ clients, fournisseurs). Ainsi, les mesures associées à ces indicateurs seront basées sur les mesures du risque global de replanification K4 associés à l'événement ($L4 = L1 \cup L2$).

Nous associons la mesure de *robustesse* (*Rob*) d'une promesse de livraison totale du produit j pour la période t , X_t^j , au degré de certitude de supporter toutes les variations possibles de la demande et des approvisionnements, même les plus contraignantes, en continuant à satisfaire les contraintes impliquées. Elle est donc associée au degré de certitude de sa fiabilité malgré les variations possibles des plans des autres acteurs sur l'horizon glissant.

Ainsi, nous établissons la mesure de robustesse de cette promesse X_t^j comme une mesure de nécessité de satisfaire les contraintes qui peuvent être impliquées par les incertitudes de la demande et des approvisionnements simultanément, comme suit :

$$\text{Rob}(X_t^j) = N(\overline{L4}) = N(\overline{L1} \cap \overline{L2}) \quad (3)$$

Nous associons la robustesse globale du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$ à la robustesse la plus faible mesurée sur les différentes périodes t de l'horizon $[T]$. Ainsi, nous agrégeons la robustesse globale de ce plan comme suit :

$$\text{Rob}((X_t^j)_{t \in [T]}) = \bigcap_{t \in [T]} \text{Rob}(X_t^j) = \min_{t \in [T]} \text{Rob}(X_t^j) \quad (4)$$

La *gravité du risque* global de replanification impliqué K4, relative à une promesse de livraison X_t^j , correspond à l'impossibilité de maintenir cette promesse dans les prochains cycles, sauf en cas de :

- changement des objectifs en termes de taux de service (hypothèse ici : taux de service objectif = 100%)
- ou présence des alternatives ou des leviers de flexibilité permettant l'adaptation des ressources pour l'exécution de cette promesse.

Dans les autres cas, il sera impossible de maintenir la promesse car elle ne supportera aucune des variations possibles des paramètres incertains considérés, même les moins contraignantes. Cela se produit lorsque le risque n'est pas seulement possible mais qu'il a un certain degré de certitude.

Ainsi, la gravité (G) du risque de replanification K4 du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$ se traduit par la nécessité maximale mesurée sur les périodes $t \in [T]$ liée au risque de replanification, comme suit :

$$G((X_t^j)_{t \in [T]}) = \max_{t \in [T]} (N(L4)_t) \quad (5)$$

La fréquence du risque dépend du nombre de périodes $t \in [T]$ pour lesquelles le risque présente au moins un degré de possibilité. Soit $[N]$ un ensemble de périodes t de taille N , sur lesquelles :

$$[N] \subset [T], \forall t \in [N], \Pi(L4)_t > 0 \quad (6)$$

Ainsi, la fréquence (F) d'occurrence du risque de replanification sur l'horizon $[T]$ du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$, est formulée comme suit :

$$F = \frac{N}{T} \quad (7)$$

La dernière dimension de notre analyse est *l'adaptabilité face aux incertitudes*. Son objectif est d'évaluer dans quelle mesure les risques peuvent être évités avec un lissage des quantités entre les différentes périodes t .

Pour qu'un lissage permet d'éviter les risques, et améliorer la robustesse d'un plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$, il faut que la quantité totale cumulée des promesses de livraison sur tout l'horizon, X_T^j , soit suffisante pour répondre aux contraintes impliquées par la demande totale D_T^j et les approvisionnements R_T^j . Ainsi, nous mesurons l'adaptabilité (A) d'un plan comme suit :

$$A((X_t^j)_{t \in [T]}) = \Pi(\overline{L4})_{t=T} = 1 - N(L4)_T \quad (8)$$

Pour capitaliser les mesures de ces différents indicateurs pour la classification des plans par produit selon la criticité de leurs risques associés, le décideur doit d'abord définir des seuils pour exprimer ces tolérances par rapport la mesure de chaque indicateur. Ces seuils représentent :

- r : la valeur au-dessous du quelle le décideur considère que son plan n'est pas robuste et qu'il faut qu'il fasse objet d'évaluation des risques en termes de gravité, de fréquence et d'adaptabilité face à ces risques ;
- g : la valeur de gravité (certitudes de l'évènement) à partir du quelle le risque est considéré grave ;
- f : la fréquence du risque au-delà duquel le risque devient imposant ;
- a : le niveau de possibilité d'adaptation face au risque au-dessous duquel le plan est considéré inévitable par une opération de lissage.

La définition de ces différents seuils permet de découper les différentes branches de l'arborescence d'évaluation adaptée pour la classification des plans par produit dans la matrice des risques.

4.4. Illustration I.3

Toujours dans le cadre de l'illustration déroulée dans ce chapitre et suite aux résultats de mesures des risques obtenus dans l'illustration I.2 , nous étendons de la même façon ces mesures sur le reste

des périodes (2,3,4,5) de l'horizon de planification afin de calculer les indicateurs agrégés d'évaluation et classer le produit dans la matrice des risques.

ILLUSTRATION (I.3) :

ANALYSE ET EVALUATION DE LA CRITICITE D'UN PLAN DE LIVRAISON EN FONCTION DES MESURES DU RISQUE DE REPLANIFICATION K4 PAR PERIODE

Les mesures de risque de replanification liées à un plan de livraison d'un produit P sous demande et approvisionnements flous obtenues par période, sont comme suit :

Période	2	3	4	5	6
Risque de rupture $K1 = (\Pi(L1), N(L1))$	(0.25, 0)	(0, 0)	(1, 0)	(1, 0.25)	(1, 0.05)
Risque d'insatisfaction de la demande totale $K2 = (\Pi(L2), N(L2))$	(0, 0)	(1, 1)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0.58)
Risque de replanification $K4 = (\Pi(L4), N(L4))$	(0.25, 0)	(1, 1)	(1, 0)	(1, 0.25)	(1, 0.58)
Indicateurs d'évaluation de criticité	Rob=0	G=1	F=5/5	A=0.42	

Tableau 5. Résultats de mesures des risques K1, K2, K4 et d'indicateurs agrégés d'évaluation

Les mesures de nécessité liées au risque de replanification nous permettent d'agréger les mesures de robustesse (Rob=0) et de gravité (G=1) et de conclure à une mesure d'adaptabilité (A=0,42), tandis que les mesures de possibilité nous permettent d'obtenir les mesures de fréquence (F=5/5) comme illustré ci-dessus.

Malgré l'importance de la gravité mesurée, la replanification est certaine au moins pour une période de l'horizon (période 2, $N(L4) = 1$) : il est possible à 42% d'éviter le risque en évitant les deux risques K1 et K2 en appliquant des opérations de lissage car la quantité totale cumulée prévue sur les cinq périodes satisfait possiblement les contraintes associées aux variations possibles des plans des autres acteurs.

À partir de ces indicateurs, on procède à l'évaluation et la classification du plan de livraison du produit P selon les tolérances définis par le décideur.

Les tolérances du décideur par rapport chaque indicateur sont définies comme suit : $(r(\text{Rob}), g(G), f(F), a(A)) = (0.5, 0.5, 0.5, 0.5)$. Dans ce cas, nous obtenons la classification représentée dans l'arbre ci-dessous (figure 38) indiquant une criticité importante du plan de livraison évalué (classe F de la matrice des risques). Parmi des centaines voire des milliers de références produits, le décideur sera alerté grâce aux résultats de cette évaluation de la nécessité de réviser ce plan du produit P plutôt que d'autres qui sont plus robustes.

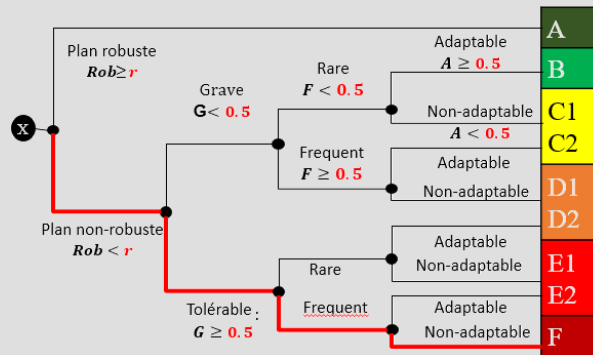


Figure 38. Évaluation de la criticité du risque K4 associé au plan de livraison du produit P

Lorsque le décideur aura choisi de se concentrer sur un produit, il disposera des détails de l'évaluation par période et par client pour orienter plus finement ses modifications vers les décisions les plus critiques par période et par client.

Ici, d'après les détails d'évaluation par période (tableau 5) le décideur sera amené à réviser sa promesse totale afin au moins de diminuer la nécessité du risque au minimum possible (≈ 0.1) (voir les distributions du risques K4, figure 39). En effet, le risque de replanification est possible quelle que soit la décision de livraison puisque le risque d'insatisfaction de la demande totale et le risque de rupture coexistent, tout au long des distributions de possibilités des paramètres flous. Le décideur sera sûrement amené à replanifier en cas de promesse de livraison infaisable qui dépasse les approvisionnements maximaux possible ou en cas de promesse insatisfaisante qui est inférieure à la demande minimale possible. Ainsi, il est important d'éviter dans ce cas les promesses de livraison dans les intervalles $[0, 270]$ et $[375, \infty]$. Une décision dans $[330, 375]$ est plus cohérente avec une vision optimiste des réceptions attendues (R) ou en cas de tolérance de consommation de stock de sécurité avec une priorité de garantir une promesse satisfaisante. A l'inverse, pour une décision dans $[125, 270]$, la priorité sera donnée au maintien du stock au niveau objectif.

Afin de diminuer la nécessité du risque K4, le décideur peut d'abord commencer par augmenter la quantité totale de sa promesse à la période 6 dans ces différents intervalles. Ensuite, il redispatchera les produits entre les CDL1 et CDL2 (*Illustration. I.2*) puis lissera les quantité entre les différentes périodes pour éliminer d'abord la nécessité du risque à chaque période (période 3) et ensuite la possibilité du risque si possible dans chacune des périodes afin de diminuer la fréquence du risque.

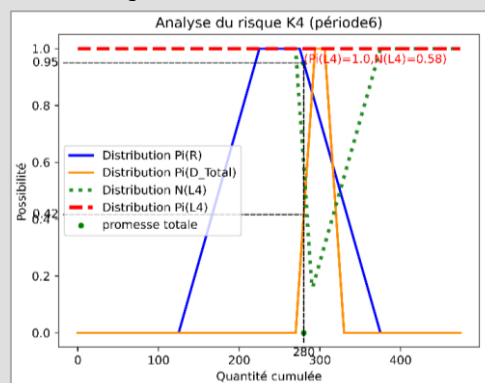


Figure 39. Risque K4 dans les quantité totale programmée sur l'horizon de planification

5. Approche d'analyse des risques basée sur des intervalles comme cas particulier des ensembles flous

5.1. Qualification des risques

Dans cette section, nous considérons le cas où les incertitudes des plans des demandes $\{(D_t^{ij})\}_i$ des clients $\{IJ\}$ consommant le produit j et des plans approvisionnements (R_t^j) sont représentées par des intervalles, respectivement $D_t^{ij} \in [\underline{D}_t^{ij}, \overline{D}_t^{ij}]$; $R_t^j \in [\underline{R}_t^j, \overline{R}_t^j]$ pour chaque période t de l'horizon $[T]$.

Cette représentation par des intervalles correspond à un cas particulier d'ensembles flous traduisant une ignorance totale sur les intervalles. Cette ignorance consiste à ne pas pouvoir savoir si une quantité contingente Q_t dans l'intervalle $[\underline{Q}_t, \overline{Q}_t]$ est plus ou moins possible qu'une autre quantité Q'_t dans le même intervalle. Cela correspond ainsi à une représentation rectangulaire de la distribution des possibilités des incertitudes (figure 40).

°possibilité

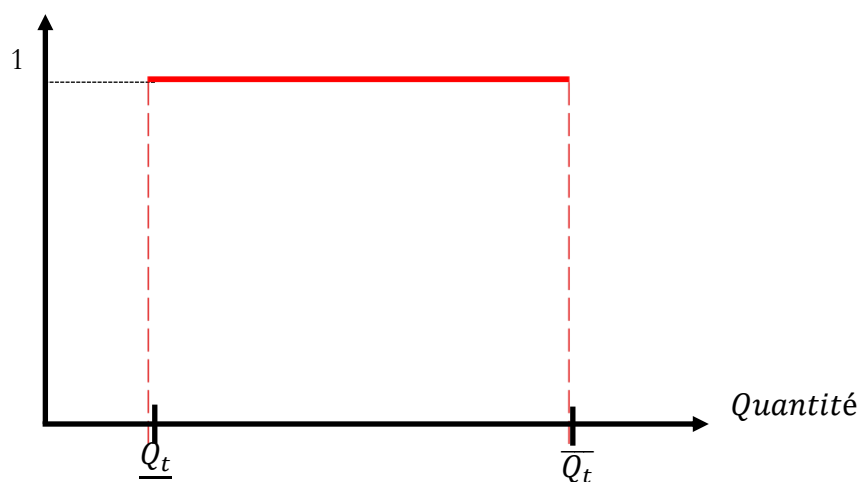


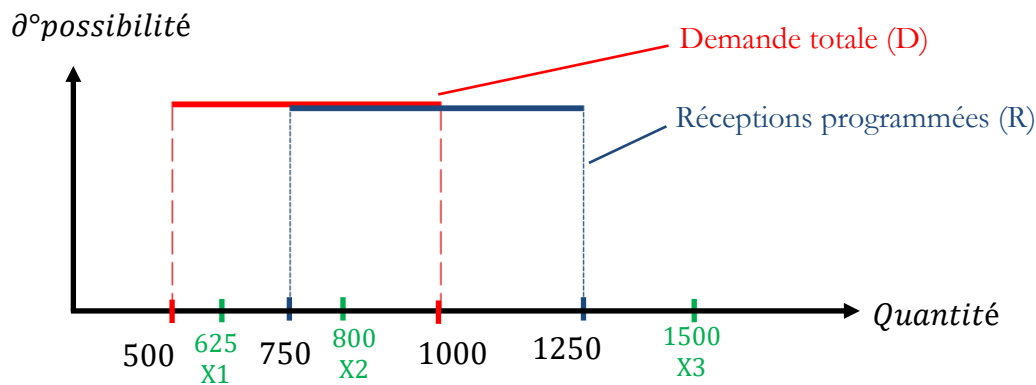
Figure 40. Distribution rectangulaire de possibilité

Si nous ramenons cette représentation par intervalle à une distribution de possibilité afin de pouvoir mesurer les risques et analyser leur criticité selon le modèle de la section précédente, les différentes mesures seront des valeurs binaires (0 ou 1). Le risque peut être calculé comme suit :

- impossible : $(\Pi(L)=0, N(L)=0)$;
- possible : $(\Pi(L)=1, N(L)=0)$;
- sûr : $(\Pi(L)=1, N(L)=1)$.

Exemple :

Nous caractérisons les risques liés à trois promesses différentes pour une même période t ($X1= 625$; $X2=800$; $X3= 1500$). La demande totale des clients peut varier dans les limites d'un intervalle de $[500,1000]$ et les quantités des réceptions programmées de cette période peuvent varier dans l'intervalle $[750,1250]$.



Les risques de rupture, d'insatisfaction de la demande totale et de replanification correspondants à chacune des décisions $X1$, $X2$ et $X3$ sont les suivants :

Risque Décision	Rupture	Insatisfaction de demande totale	Replanification
$X1$	Impossible	Possible	Possible
$X2$	Possible	Possible	Possible
$X3$	Sûr	Impossible	Sûr

Les indicateurs de robustesse (Rob), de gravité (G) et d'adaptabilité (A) qui se basent sur ces différentes mesures de risques prendront également des valeurs binaires de 0 ou 1.

Du point de vue du décideur, qui gère un stock de chaque produit et son allocation aux différents clients pour minimiser les replanifications, l'acceptation d'une demande à la baisse (proche de (D_t^{ij})) se fait généralement de manière automatique. Cependant, l'acceptation d'une demande à la hausse est soumise à plus de vigilance. Ainsi, la combinaison pessimiste correspond au fait que tous les clients augmentent leur demande au maximum possible $\overline{\{(D_t^{ij})\}}$ et que simultanément le fournisseur décide de reprogrammer les approvisionnements pour passer au minimum possible (R_t^j) . Une décision qui satisfait cette combinaison satisfera toutes les autres combinaisons des quantités possibles dans les intervalles considérés. Réciproquement, la combinaison de demandes minimales $\{(D_t^{ij})\}$ pour tous les clients i contre des approvisionnements maximales (R_t^j) sera la combinaison la plus optimiste. Si une promesse de livraison ne satisfait pas les contraintes pour cette combinaison, elle ne les satisfera pas non plus pour toutes les autres quantités possibles dans les intervalles.

Ainsi, nous considérons deux combinaisons $C_o(t)$ et $C_p(t)$ de plans possibles des demandes $\{(D_t^{ij})\}$ et de plan possible d'approvisionnement (R_t^j) , correspondant respectivement à une combinaison optimiste et à une combinaison pessimiste, telles que :

$$C_o(t) = (\{(D_t^{ij})\}; (\overline{R_t^j})) / \forall t \in [T]; \forall i \in [IJ]; D_t^{ij} = \underline{D_t^{ij}} \text{ et } \forall t \in [T]; R_t^j = \overline{R_t^j} \quad (9)$$

$$C_p(t) = (\{\overline{(D_t^{ij})}\}; (\underline{R_t^j})) / \forall t \in [T]; \forall i \in [IJ]; D_t^{ij} = \overline{D_t^{ij}} \text{ et } \forall t \in [T]; R_t^j = \underline{R_t^j} \quad (10)$$

Pour chaque période t , en croisant les intervalles d'incertitude de la demande totale (D) et ceux des approvisionnements (R), nous avons pu identifier trois zones principales (voir figure 41) pour aider visuellement le décideur à qualifier sa promesse de livraison par période et à améliorer sa robustesse.

Promesse totale	-	$\underline{R} + S0$	$\overline{R} + S0$	+
-	$\underline{D}$	$(\Pi(L1)=0, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=1)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=1)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=1)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=1)$
		$(\Pi(L4)=1, N(L4)=1)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=1)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=1)$
	$\overline{D}$	$(\Pi(L1)=0, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=0)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=0)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=1)$ $(\Pi(L2)=1, N(L2)=0)$
		$(\Pi(L4)=1, N(L4)=0)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=0)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=0)$
+	$\underline{D}$	$(\Pi(L1)=0, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=0, N(L2)=0)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=0)$ $(\Pi(L2)=0, N(L2)=0)$	$(\Pi(L1)=1, N(L1)=1)$ $(\Pi(L2)=0, N(L2)=0)$
		$(\Pi(L4)=0, N(L4)=0)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=0)$	$(\Pi(L4)=1, N(L4)=0)$

$Z_r; Z_o; Z_v$

Figure 41. Caractérisation des risques à l'intersection des intervalles d'incertitudes de demande et des réceptions

Sur la figure 41, nous distinguons :

- Une zone rouge (Z_r) où la promesse a une robustesse égale à 0 mais aussi une gravité importante car elle ne satisfait même pas les contraintes de la combinaison optimiste. Le décideur sera sûrement amené à replanifier cette promesse.
- Une zone orange (Z_o) où la promesse qui lui appartient satisfait au moins les contraintes liées à la combinaison optimiste et donc la gravité des risques dans cette zone est toujours nulle et mais la robustesse est faible. Il est possible que le décideur soit amené à modifier ces promesses dans les prochains cycles de planification pour s'adapter aux variations des plans des autres acteurs.
- Enfin, une zone verte (Z_v) où nous trouverons une promesse qui satisfait la combinaison pessimiste, elle aura donc une robustesse à 100% et la promesse sera respectée.

$$\forall t \in [T], \text{Si } X_t^j \in Z_r : \text{Rob}(X_t^j) = 0, G(X_t^j) = 1 \quad (10)$$

$$\forall t \in [T], \text{Si } X_t^j \in Z_o : \text{Rob}(X_t^j) = 0, G(X_t^j) = 0 \quad (11)$$

$$\forall t \in [T], \text{Si } X_t^j \in Z_v : \text{Rob}(X_t^j) = 1, G(X_t^j) = 0 \quad (12)$$

De même nous pouvons qualifier l'adaptabilité du plan en positionnant la décision cumulée totale X_T^j par rapport aux intervalles des quantités totales cumulées des autres acteurs, comme suit :

$$A(X_T^j) = \begin{cases} 1; & \text{Si } X_T^j \in Z_o \text{ OU } X_T^j \in Z_v \\ 0; & \text{Sinon} \end{cases} \quad (13)$$

5.2. Extension des indicateurs basés sur des distances aux bornes des intervalles

À partir des ensembles C_o et C_p correspondants aux combinaisons optimiste et pessimiste des plans de demande totales des clients et d'approvisionnement du fournisseur, nous pouvons affiner la définition des différents indicateurs.

En utilisant les bornes inférieures $(\underline{D}_t^{ij}, \underline{R}_t^j)$ et supérieures $(\overline{D}_t^{ij}, \overline{R}_t^j)$ des intervalles prédéfinis pour l'analyse des risques, nous pouvons mesurer l'impact des risques selon les deux combinaisons extrêmes correspondants à une configuration de type impact pire cas et meilleur cas au regard de la satisfaction des contraintes considérées. Cette analyse permet d'ajouter une échelle de plus de gradualité en termes d'insatisfaction des contraintes qui permettra au décideur d'avoir en plus une quantification des écarts à diminuer pour pouvoir diminuer le risque de replanification. Ainsi, pour une combinaison $C \in \{C_o; C_p\}$ de demande et de réceptions programmées, nous caractérisons l'impact du risque associé à une promesse de livraison X_t^j en termes d'écarts conséquents (impact) vis-à-vis de la satisfaction des contraintes.

Aux risques K1, K2, K3 et K4, respectivement les risques de rupture, d'insatisfaction de la demande totale, d'insatisfaction d'un client i et de replanification, on ajoute $E1(X_t^j, s)$, $E2(X_t^j, s)$, $E3(X_t^{ij}, s)$ et $E4(X_t^j, C)$, respectivement, les mesures de leur impact en considérant les bornes des intervalles donnés $\{s\}$.

$$\forall R_t \in \{\underline{R}_t^j; \overline{R}_t^j\}, E1(X_t^j, R_t) = \begin{cases} \text{Si } R_t < X_t^j - S_0; & |X_t^j - (R_t + S_0)| \\ \text{Sinon}; & 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\forall D_t \in \{\underline{D}_t^j; \overline{D}_t^j\}, E2(X_t^j, D_t) = \begin{cases} \text{Si } D_t > X_t^j; & |X_t^j - D_t| \\ \text{Sinon}; & 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\forall D_t^i \in \{\underline{D}_t^{ij}; \overline{D}_t^{ij}\}, E3(X_t^{ij}, D_t^i) = \begin{cases} \text{Si } D_t^i > X_t^{ij}; & |X_t^{ij} - D_t^i| \\ \text{Sinon}; & 0 \end{cases} \quad (15)$$

Soit $C = (s1, s2)$ une combinaison de deux scénarios telle que :

$$\forall s1 \in \{\underline{D}_t^j; \overline{D}_t^j\}, \forall s2 \in \{\underline{R}_t^j; \overline{R}_t^j\}, E4(X_t^j, C) = \max(E1(X_t^j, s1); E2(X_t^j, s2)) \quad (16)$$

E1 quantifie la rupture associée à une promesse de livraison qui pourra être programmée à une date donnée par rapport aux limites de réceptions programmées $\{\underline{R}_t^j; \overline{R}_t^j\}$. E2 et E3 quantifient respectivement l'indisponibilité (*backorders*) par rapport aux limites de demande totale $\{\underline{D}_t^j; \overline{D}_t^j\}$ et de demande par client $\{\underline{D}_t^{ij}; \overline{D}_t^{ij}\}$ étant donnée une promesse de livraison des clients.

Ainsi, E1 représente la quantité à diminuer afin de respecter la contrainte de disponibilité des stocks par rapport au scénario de réception. E2 est la quantité à ajouter à la promesse afin de combler l'écart par rapport au scénario de demande totale des clients. Ces deux écarts font référence à deux actions opposées qui peuvent être appliquées afin de rendre le risque acceptable. Nous agrégeons l'impact du risque de replanification comme l'écart maximal de la décision par rapport aux scénarios de demande et d'approvisionnement.

Ainsi, améliorer la robustesse d'une décision X_t^j revient à diminuer l'impact $E4(X_t^j, C_p)$ associé au risque de replanification pour la combinaison pessimiste C_p . La robustesse d'un plan est d'autant plus élevée qu'est faible l'impact maximal du risque de replanification $E4(X_t^j, C_p)$ mesuré sur les différentes périodes $t \in [T]$ et pour cette combinaison C_p .

De même, nous associons la mesure de gravité à l'incapacité de supporter toutes les combinaisons possibles et donc non plus la plus optimiste. Ainsi, annuler la gravité des risques revient à annuler l'impact maximal du risque de replanification $E4(X_t^j, C_o)$ mesuré sur les différentes périodes $t \in [T]$ par rapport à la combinaison optimiste des scénarios d'incertitudes (C_o).

Concernant l'adaptabilité du plan, elle n'est possible que si le plan satisfait au moins la combinaison optimiste des quantités totale cumulées sur la dernière période de l'horizon T ($E4(X_T^j, C_o) = 0$).

5.3. Illustration I.4

ILLUSTRATION (I.4) :

AIDE A LA DECISION BASEE SUR UNE REPRESENTATION PAR INTERVALLES DES INCERTITUDES

Nous reprenons les données de l'illustration déroulée dans ce chapitre. En appliquant un α -coupe= 0 sur les données modélisées avec les ensembles flous. L'intervalle obtenu correspondra à nos plans min et max représentés dans la figure 42. Sur cette figure, nous représentons le positionnement du plan cumulé de livraison totale (X) par rapport les différents scénarios min-max de demande (D) et de réceptions programmées (R) sur les cinq périodes de l'horizon. Sur le graphe nous visualisons également la caractérisation (z_r , z_o , z_v) de chaque décision par période.

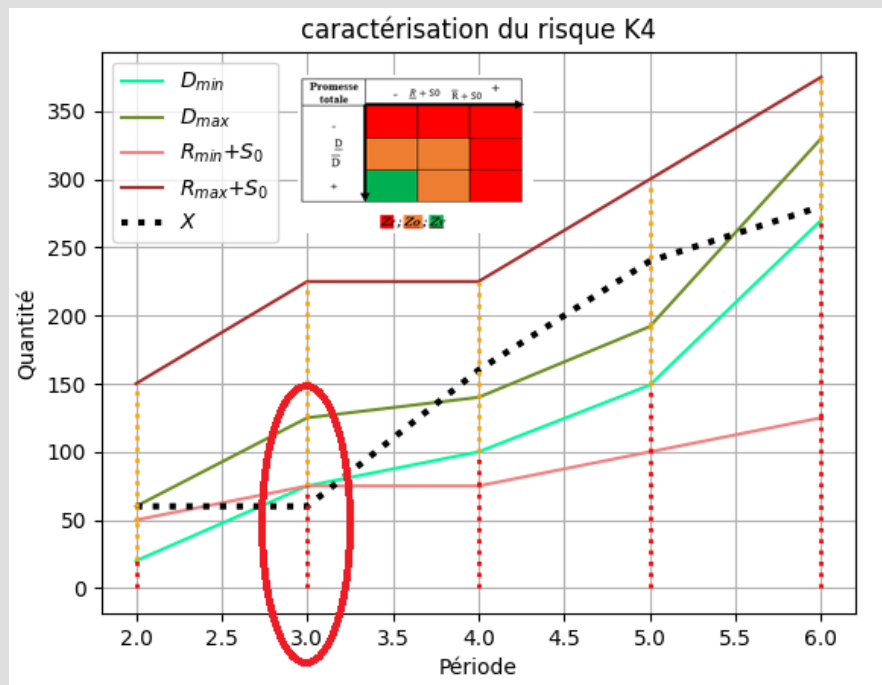


Figure 42. Caractérisation du risque K4 à l'intersection des intervalles des plans incertains

La décision X appartient à des zones rouges oranges pour toutes les périodes, sauf pour la période 3, elle appartient plutôt à la zone rouge. Ainsi, nous obtenons la caractérisation du risque K4 du tableau ci-dessous et nous agrégeons les indicateurs de criticité du risque de replanification (**R**obustesse, **G**ravité, **F**réquence et **A**daptabilité) comme suit :

Période	2	3	4	5	6
K4 (Pi, N)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)
Indicateurs	F=5/5	G=1 Rob=0			A=1

Tableau 6. Résultats de mesures du risque K4

Les combinaisons optimiste et pessimiste de demande et réceptions ainsi que leur impact, par période ; E1 d'écart lié à l'indisponibilité des produits en stock, E2 d'écart lié à l'insatisfaction de la demande totale, E3(C1) et E3(C2) d'écarts liés à l'insatisfaction des clients C1 et C2 respectivement, et E4 quantifiant la somme des écarts impliqués par rapport à la satisfaction de l'ensemble des contraintes ; seront les suivantes :

Combinaison Optimiste (Co)	2	3	4	5	6
Dmin	20	75	100	149	270
Rmax	150	225	225	300	375
Co	2	3	4	5	6
E1	0	0	0	0	0
E2	0	15	0	0	0
E3(CDL1)	10	30	0	0	0
E3(CDL2)	0	0	0	1	55
E4	0	15	0	0	0

Combinaison Pessimiste (Cp)	2	3	4	5	6
Dmax	60	125	140	191	330
Rmin	50	75	75	100	125
Cp	2	3	4	5	6
E1	10	0	85	140	155
E2	0	65	0	0	50
E3(CDL1)	30	50	0	0	0
E3(CDL2)	0	15	10	19	85
E4	10	65	85	140	155

Tableau 7. Résultats de mesures des écarts par rapport la combinaison optimiste et la combinaison pessimiste

Les résultats indiquent une robustesse de 0 donc il y aura au moins une période où le risque est sûr. D'autre part, la gravité est à 1. Autrement dit, même pour la combinaison optimiste, le plan est incapable de satisfaire les contraintes pour au moins une période. Donc, il ne satisfera pas non plus les contraintes liées aux autres variations possibles des plans des autres acteurs pour cette période.

La fréquence du risque est de 5 périodes parmi 5 car le risque est possible pour l'ensemble des périodes. Le décideur sera donc amené à replanifier presque toutes les 5 périodes de l'horizon de planification dans les prochains cycles de replanification, en cas d'occurrence de la combinaison pessimiste.

Enfin, malgré la gravité du risque lié au plan du produit P , celui-ci sera sûrement adaptable pour la combinaison optimiste, donc une opération de lissage suffira pour annuler cet écart E4 mesuré pour cette combinaison et ainsi annuler la gravité du plan. En revanche, le plan est non adaptable en cas d'occurrence de la combinaison pessimiste. La décision totale cumulée à la période 6 sera irréalisable avec un écart de 155 d'indisponibilité du stock compte tenu des réceptions cumulées à cette période et un écart de 120 également par rapport à la demande totale cumulé.

À partir de la visualisation proposée dans la figure 42, le décideur identifiera la période 3 comme la période la plus critique appartenant à la zone rouge (Z_r), cette promesse est donc la source de la gravité constatée du risque. L'écart mesuré E4 pour cette période indique un écart de 15 produits de l'objectif en termes de respect des contraintes pour la combinaison optimiste (Co) sur les différentes périodes. Il s'écartera donc sûrement de plus de 15 produits en cas d'occurrence de n'importe quelle autre combinaison possible dans les intervalles modélisés.

Le décideur peut donc au moins opérer un lissage entre la quantité prévue en période 2 et celle de la période 3 pour éliminer cette gravité. Il peut diminuer cette promesse de façon à annuler la gravité du risque (Z_0), mais il augmentera l'écart par rapport au scénario maximum de la demande totale cumulée, donc moins d'adaptabilité. En général, le décideur sera amené à déplacer sa décision de manière à rester dans la zone orange de la matrice s'il cherche une solution de compromis sans préférence entre des contraintes en termes de satisfaction.

Le décideur peut aussi voir le détail par période d'analyse de l'impact des risques des deux combinaisons envisagées par client pour la réallocation des quantités entre clients. Il peut ainsi décider de privilégier un client plus qu'un autre en se rapprochant de sa demande maximale possible alors pour l'autre client la promesse sera plus proche du scénario de demande minimale. Les graphes ci-dessous (figure 43 et 44) représentent le positionnement de la promesse de livraison (X) de chaque période par rapport l'intervalle des incertitudes de la demande de chaque période de chacun des clients *CDL1* et *CDL2*. Cette visualisation permet au décideur de repérer que la quantité totale programmée pour la livraison du *CDL2* ne satisfait même pas sa demande totale cumulée minimale alors que la quantité prévue pour *CDL1* satisfait plus que le scénario maximal de la demande totale cumulée. Ainsi, le décideur peut procéder d'abord à une re-répartition de ces quantités pour au moins satisfaire la demande totale cumulée du *CDL2*.

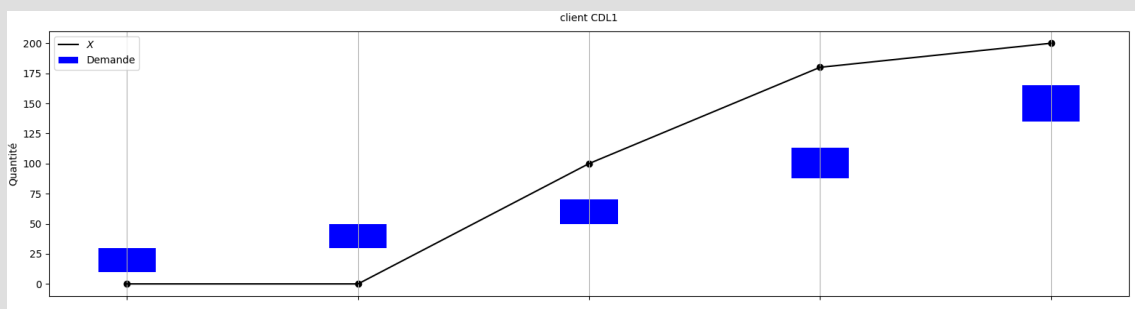


Figure 43. Plan de livraison (X) par rapport les intervalles de demande du client *CDL1*

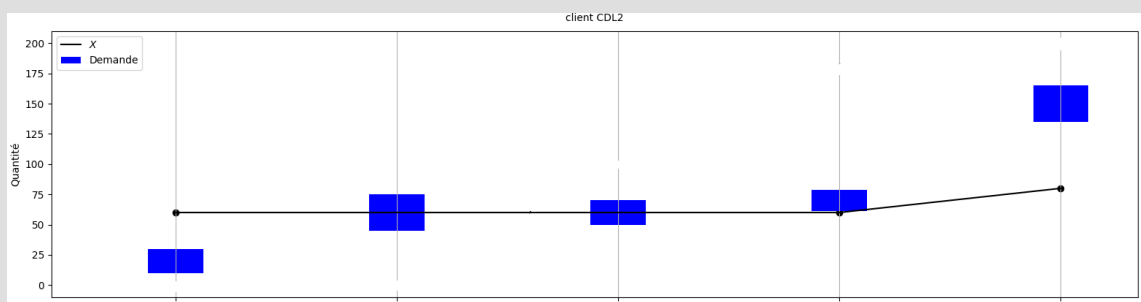


Figure 44. Plan de livraison (X) par rapport les intervalles de demande du client *CDL1*

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord formalisé la manière dont un acteur exprime les incertitudes sur ses plans aux autres acteurs. L'expert décrit les incertitudes dans un plan cumulé avec un vecteur de trois paramètres [*amplitude de variation* (%); *type de variation* (à la hausse, à la baisse ou dans les deux sens); *l'horizon* concerné par ces incertitudes]. Cependant, ces informations supportent plusieurs interprétations pour leur application. Ainsi, nous avons formulé cinq applications possibles pour la modélisation des incertitudes avec les ensembles flous pour orienter l'expert et assurer la cohérence dans l'application de son modèle. Nous avons ensuite proposé une approche possibiliste d'analyse des risques basée sur les mesures de la théorie de possibilité. Nous caractérisons un risque associé à un événement L à une période de planification avec une mesure du couple (possibilité (L), Nécessité (L)). Sous incertitude sur les demandes et les approvisionnements, nous avons considéré les risques de rupture et du risque d'insatisfaction de la demande par client et de la demande totale.

À partir de ces mesures par période, nous avons formulé les indicateurs permettant l'évaluation de la criticité de ces risques associés au plan par produit (Robustesse, Gravité, Fréquence, Adaptabilité). Ces indicateurs sont capitalisés dans la phase d'évaluation selon les critères et les tolérances d'un décideur. Ils permettent de classer les plans par produit dans la matrice de criticité afin de faciliter la détection du plan(s) critique(s) pour un produit parmi des milliers de références produits lors des opérations de replanification.

Ainsi, les différentes analyses proposées dans cette partie (par produit, par risque et par période) visent à aider le décideur à mener les différents niveaux de son processus de replanification (lissage de la promesse totale, allocation de la promesse totale aux décideurs, priorisation et anticipation).

Dans la dernière partie, nous avons présenté une approche basée sur une modélisation avec des intervalles. Nous avons présenté cette approche comme un cas particulier de l'approche possibiliste. Nous avons aussi défini deux combinaisons optimiste et pessimiste composées des scénarios extrêmes des réceptions et de la demande totale et nous avons proposé une extension des indicateurs basés sur des distances aux bornes de ces intervalles. Ces distances caractérisent l'impact du risque associé à une décision (promesse de livraison) donnée sur les performances de planification dans ces deux cas extrêmes. Ces distances permettent au décideur d'estimer (i) l'effort demandé au niveau de la replanification afin de rendre le risque acceptable ; et (ii) la décision plus robuste pour supporter le maximum faisable des scénarios de variation des plans dans les prochains cycles de replanification.

Dans le chapitre V, nous présentons l'implémentation de la plateforme d'aide à la décision et son utilisation dans un contexte dynamique à horizon glissant sur un cas d'étude pour preuve de concept.

CHAPITRE V. CAS D'APPLICATION

1.	Introduction : démarche expérimentale	123
2.	Cas industriel : Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC)	124
2.1.	Chaine logistique PFDC	124
2.2.	Processus de planification tactique étudié	125
2.3.	Données de planification PFDC	129
3.	Plateforme d'aide à la replanification sous incertitudes	130
3.1.	Cadre conceptuel du système d'aide à la décision.....	130
3.2.	Services de la plateforme d'aide à la décision.....	131
3.3.	Structure des données	133
3.4.	Interface d'aide à la décision : expérience utilisateur.....	134
3.5.	Plateforme de négociation	139
4.	Un Serious Game comme preuve de concept (PoC)	139
4.1.	Utilisations des 'Serious Game'	139
4.2.	Dimensionnement	140
4.3.	Conception du 'Serious Game'	141
4.3.1.	Déroulement du 'Serious Game' en horizon glissant.....	141
4.3.2.	Émulateur ERP : Modèle de planification.....	143
4.4.	Expérimentation d'un point de vue de planificateur au niveau du Centre de Distribution Central.....	145
4.4.1.	Scénario	145
4.4.2.	Simulateur de stratégie de réduction de gravité du risque de replanification sous incertitudes	148
4.4.3.	Analyse des résultats	151
5.	Conclusion	156

1. Introduction : démarche expérimentale

Dans ce chapitre, nous présentons nos contributions pratiques pour répondre à nos troisième et quatrième questions de recherche :

- une plateforme d'aide à la décision pour la replanification à horizon glissant prenant en compte les incertitudes sur les plans transmis par les autres acteurs.
- l'étude de son interaction avec des données dynamiques de planification.

L'approche expérimentale suivie porte sur deux phases (voir figure 45). La première phase consiste en l'analyse des processus de planification du partenaire industriel Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC). Cette étape vise à modéliser les processus métier de planification dynamique en se basant principalement sur des entretiens avec le partenaire industriel et la collecte de données représentatives de l'environnement étudié. Les résultats de cette étude visent à aboutir à un processus générique des processus exécutés dans des cascades ERP/DRP.

Les résultats de cette phase sont utilisés comme entrée pour une deuxième phase qui consiste en l'élaboration d'une étude de cas sous la forme d'un Serious Game (SG). Ce SG permet de simuler l'environnement étudié selon un dimensionnement à petite échelle de la SC considérée. La dynamique des données est reproduite à partir de la simulation du processus de planification modélisé. Selon un scénario prédéfini, deux simulations sont effectuées sans et avec outil d'aide à la décision. Une comparaison entre les deux est effectuée sur la base de l'analyse de l'historique généré dans les deux cas. Cette analyse vise principalement à quantifier la nervosité de la planification et les effets des incertitudes sur les performances des livraisons.

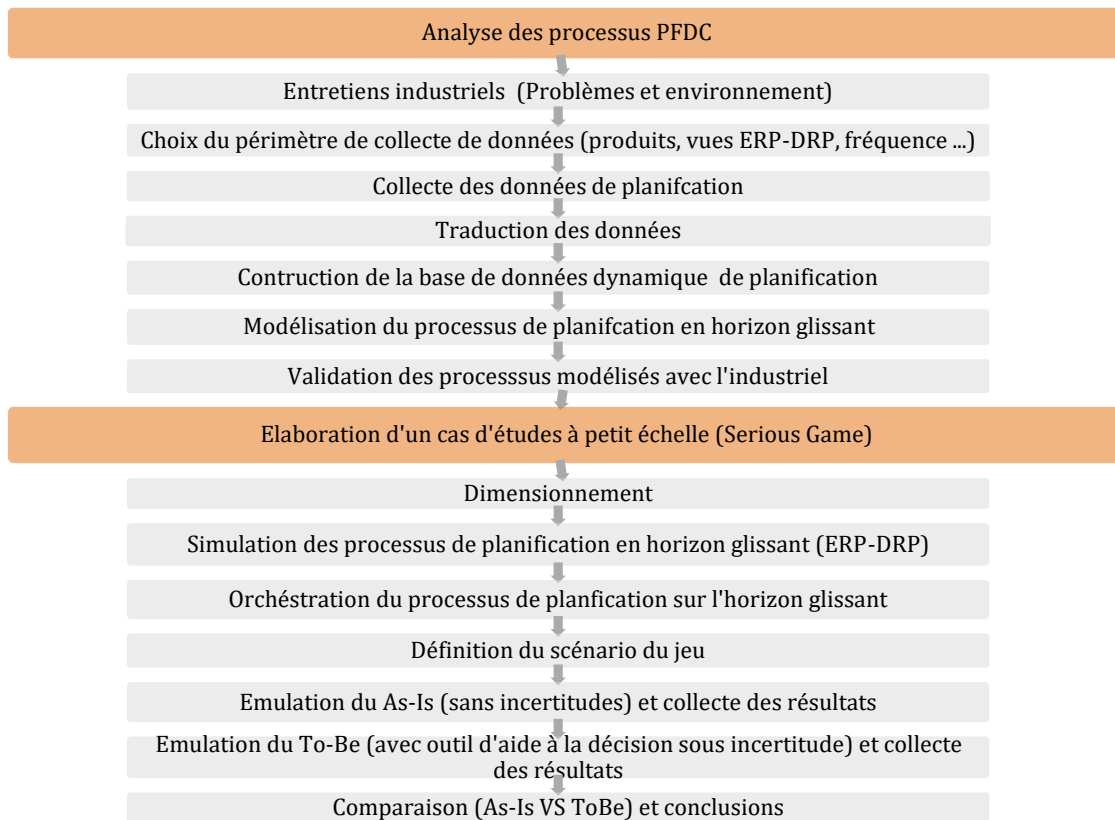


Figure 45. Démarche expérimentale

2. Cas industriel : Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC)

2.1. Chaîne logistique PFDC

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR CAASC (Cloud Adaptation for Agile Supply Chain) et plus précisément de son deuxième axe scientifique qui porte sur l'évaluation des risques et de la robustesse des plans sous incertitudes. Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (noté PFDC dans la suite) est le partenaire industriel qui est à l'origine de la problématique industrielle et a collecté des données de planification réelles hebdomadairement sur une période 48 mois.

Le groupe Pierre Fabre est un groupe français dans le secteur de la santé avec deux activités complémentaires couvrant les soins médicaux et les soins dermo-cosmétiques et personnels. PFDC est la branche dermo-cosmétique du groupe et le cas industriel de cette thèse.

PFDC (2ème laboratoire dermo-cosmétique au monde) est une entreprise française créée en 1967, qui approvisionne, fabrique, stocke et livre des produits notamment pour un marché international de la beauté dermo-cosmétique de la peau, des cheveux et du cuir chevelu. PFDC distribue ses produits dans près de 130 pays à travers le monde dans le cadre d'une stratégie "Make To Stock".

La chaîne logistique PFDC est une GSC (Global Supply Chain) qui se caractérise par une grande complexité, que ce soit au niveau de sa structure, de ses flux et de la dynamique du marché (forte volatilité des marchés mais aussi besoin de renouveler 33% des références annuellement). Les produits PFDC se caractérisent par une grande diversité liée à la multitude de leurs formules (700 formules) et de leurs conditionnement primaire (différents volumes de contenants : tube, flacons...) et secondaire (diversité du packaging : étuis cartons, films plastiques, langues imprimées...). Ainsi, à partir d'un même produit semi-fini (vrac : crème, liquide, ...) plusieurs variantes sont dérivées (3500 références de produits finis en total), dont les marques les plus connues sont : Avène, Ducray, Furterer, Galénic, Elancyl, Klorane...

La chaîne logistique de PFDC (voir figure 46) est constituée :

- des fournisseurs de matière première (produits agricoles bruts et des composants d'emballage),
- de différentes usines situées en France, de transformation des plantes, d'extraction de principes actifs (usine chimique) et de fabrication des produits finis,
- d'un Centre de Distribution Central (CDC) en France qui gère tout le stock des produits finis issus de la production et approvisionne toute la distribution,
- des Centres de Distribution Locaux (CDL), en France et au niveau des filiales déportées à l'étranger (plus de 29 filiales) pour une distribution aux pharmacies et des marchés locaux de chaque filiale,
- des entreprises clientes externes de commercialisation (partenaires d'exportation).

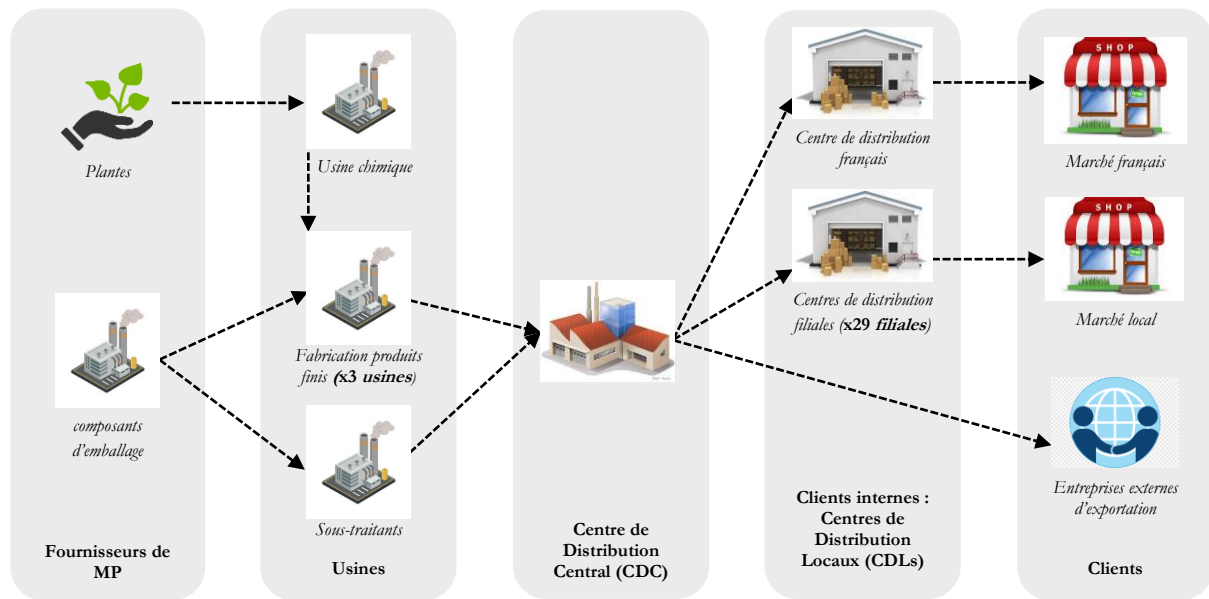


Figure 46. Chaîne logistique Pierre Fabre Dermo-Cosmétique

Le processus de fabrication est constitué de deux phases principales : la fabrication du vrac suivi du conditionnement de ce produit semi-finis. Au niveau des sites de production, il n'y a pas de stock de produits finis. Les produits sont envoyés directement au CDC à la sortie du conditionnement. Les produits ne sont considérés disponibles à la livraison dans le stock du CDC qu'après la validation du contrôle qualité au niveau de ce dernier.

2.2. Processus de planification tactique étudié

L'application du projet CAASC s'intéresse à la chaîne de distribution de PFDC, divergente à partir d'une seule usine vers ses clients qui sont les CDLs (voir le périmètre considéré dans le projet sur la figure 47). Cette SC est composée d'un ensemble d'entités qui collaborent pour la planification des flux de produits, de services et de finances. Chaque entité organise son activité de fabrication ou de distribution en s'appuyant sur les systèmes de planification tactiques locaux (DRP pour la distribution et MRP pour la production) coordonnés périodiquement. Cette coordination est basée sur un partage de plans entre les différents systèmes de planification et vise à aligner les activités de la SC et assurer sa bonne performance.

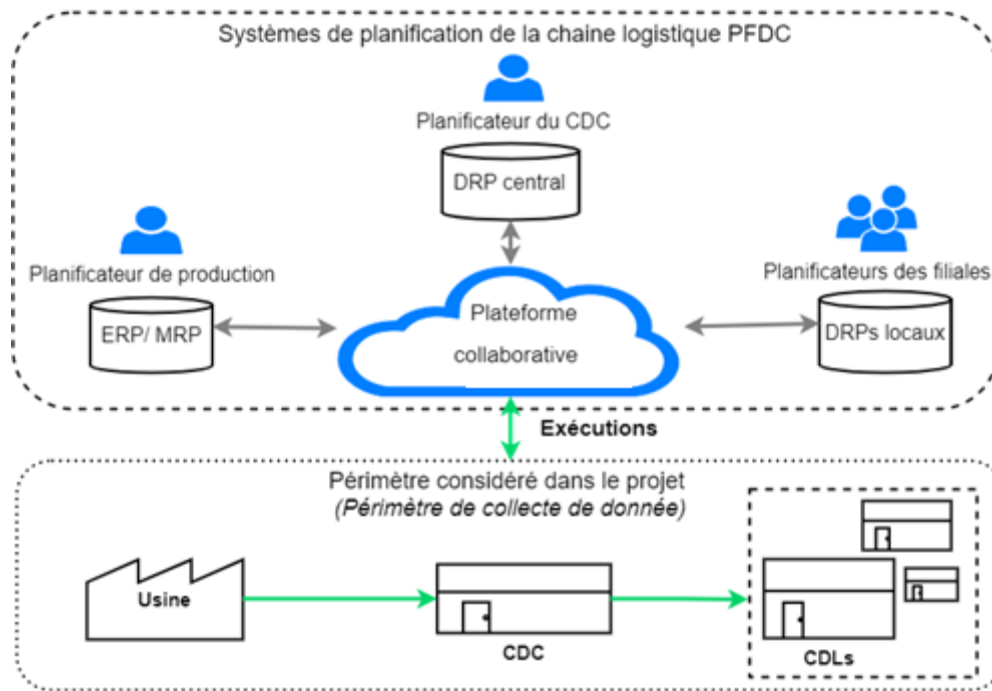


Figure 47. Aperçu du périmètre d'étude de PFDC

Nous nous basons principalement sur l'analyse du processus de planification tactique à horizon glissant de PFDC et nous appuyons sur le formalisme APICS afin de représenter de façon générique ce processus. Une série d'entretiens avec les professionnels de l'entreprise accompagnée d'une analyse des données collectées dans d'autres projets avant CAASC (exemple des données et interviews collectées dans le projet C2Net (Hauser et al. 2018)) ont été menés pour modéliser ce processus.

Ainsi, dans le processus de planification tactique en horizon glissant :

- Les ressources de chaque activité sont le décideur et le système de planification interne de cette activité.
- Les activités correspondent à l'ensemble des activités de planification effectuées par les ressources de chaque entités (lissage, calcul de besoins, allocation des stocks, ...).
- Les données d'entrées d'une activité représentent :
 - les plans partagés par les autres acteurs (demande et approvisionnements),
 - l'état du système (les encours et les stocks initiaux par produit),
 - les plans résultants du cycle de replanification précédent,
 - les données techniques de planification (les tailles des horizons de planification (figé, flexible, libre), les délais, la fréquence d'exécution, ...).
- Les données de sortie de chaque activité sont un ensemble de plans (décisions) qui portent sur un horizon de planification et qui sont transmis à une ou plusieurs autres activités dans le processus qui les utilise(nt) comme données d'entrées.

Nous représentons ainsi le processus de planification tactique en horizon glissant, comme suit (figure 48) :

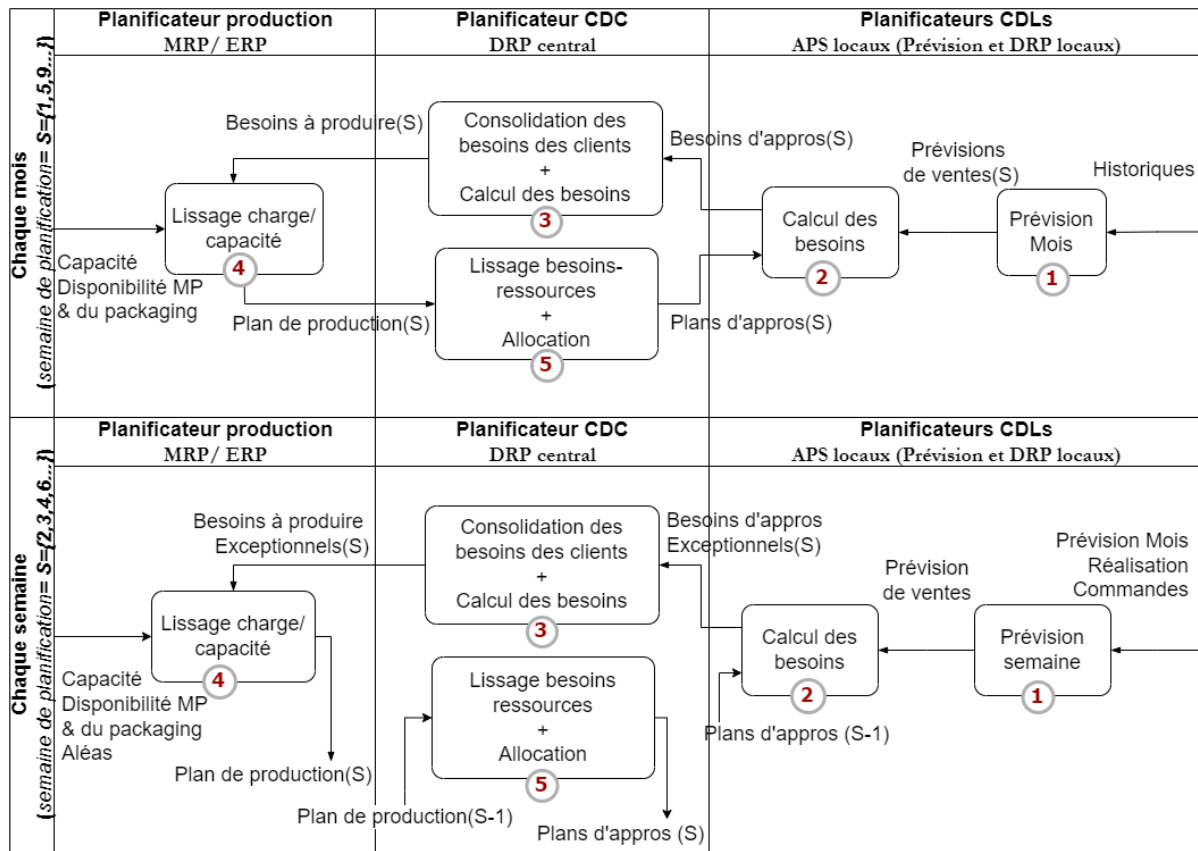


Figure 48. Processus de planification collaborative (échange de plans) avec une coordination mensuelle

Trois types de décideurs collaborent dans le cadre de ce processus :

- Les planificateurs au niveau de l'usine (planificateur production),
- Les planificateurs au niveau du CDC,
- Les planificateurs au niveau des différentes filiales.

Cinq activités sont identifiées dans le processus de planification :

- L'actualisation des prévisions de ventes des filiales (boîte 1) ;
- Le calcul des Besoin Net (CBN) des filiales (boîte 2) ;
- La consolidation des besoins filiales et CBN du CDC (boîte 3) ;
- Le lissage charge/ capacité de l'usine pour calcul du plan de production (boîte 4) ;
- Le lissage charge/capacité (stock disponible) du CDC et l'allocation des stocks aux filiales (Boîte 5).

La granularité ou l'unité de temps dans laquelle les plans partagés dans le processus sont exprimés est la semaine. L'horizon de ces plans tactiques est de 52 semaines (une année). L'horizon figé est de deux semaines en plus du délai de livraison/approvisionnement. L'horizon flexible est d'environ

4 mois (16 semaines). Les périodes restantes de l'horizon global représentent l'horizon libre. Le cycle de replanification est d'une semaine.

Nous faisons la différence entre deux types de processus de planification. Le processus de planification mensuel et le processus hebdomadaire.

Chaque mois, au cours de la première semaine du mois, les besoins des différentes filiales sont consolidés pour devenir la base de dimensionnement des ressources de la SC pour le mois en cours. Ainsi, ce processus permet à l'entreprise de coordonner les différentes activités de la SC et de dimensionner les capacités requises. Les plans résultants de ce processus sont la référence pour le reste du mois.

Cette coordination mensuelle est assurée principalement par les différents systèmes ERP (MRP pour la production, DRP pour le CDC, APS (module de prévision de vente et DRP local) pour la filiale). Les planificateurs se coordonnent suite à cela en échangeant les plans validés via la plateforme de l'entreprise dans le cadre d'un processus séquentiel. Chaque filiale (CDL) élabore ses prévisions de vente et transmet au CDC ses besoins d'approvisionnement résultants. Ces besoins correspondent aux plans d'approvisionnement souhaités. Selon ses stratégies de réapprovisionnement à l'usine, le planificateur d'approvisionnement CDC transmet des besoins à produire ou des réceptions souhaitées à l'usine. En fonction de son adéquation charge/capacité, le planificateur de la production transmet en retour son plan de production validé (Programme Directeur de Production (PDP)). Sur la base de cette réponse et des ressources du CDC, le planificateur du CDC s'engage sur des plans d'approvisionnement pour chaque client (CDL) et transmet sa réponse.

Contrairement au processus mensuel séquentiel, le processus hebdomadaire est plutôt un processus asynchrone non coordonné entre les différents partenaires. Chaque entité révisé ses plans internes de la semaine encours pour s'adapter aux perturbations. Pour ce faire, chacune se base sur les derniers plans reçus en fin de la semaine précédente et transmet ses besoins d'approvisionnement exceptionnels à ses fournisseurs. La réponse de ses fournisseurs ne sera intégrée dans l'ERP local et actualisée qu'à la fin de la semaine suite à la réception du plan validé du fournisseur. Dans le cadre de gestion des ruptures, les décideurs échangent des alertes, principalement des alertes de rupture centrale ou de ruptures locales au niveau des CDLs. Au cours de la semaine, les décideurs ne connaissent pas les révisions des plans des autres acteurs qui ne seront transmis qu'à la fin de la semaine.

Ainsi, (Hauser et al. 2018) résume deux limites principales dans le processus de planification PFDC :

- Tous les planificateurs peuvent apporter des modifications à la planification d'un produit à tout moment sans en connaître les conséquences sur les plans globaux. Par exemple, une amélioration sur un produit en rupture ou en risque de rupture, peut créer des problèmes sur plusieurs autres produits. De plus, l'analyse étant hebdomadaire, les problèmes ne seront identifiés qu'à la semaine suivante.

- Une autre limite réside dans le fait que PFDC a beaucoup de planificateurs en raison du nombre de marques et de clients. Même si certaines procédures sont définies, ils ne gèrent pas les plans et les problèmes avec les mêmes méthodes en raison de leurs formations et de leurs sensibilités. Ceci souligne l'importance d'intégrer les connaissances de ces planificateurs dans le processus de décision.

2.3. Données de planification PFDC

Les données collectées dans le cadre du projet CAASC sont issues de différents ERP de l'entreprise et concernent des produits finis d'une marque conditionnés dans une usine. Elles concernent dix variantes de deux types de produits dermo-cosmétique en crème et en Baume. Ces produits sont distribués sur 43 couples article x CDL (voir figure 49). Le stock du produits 'XXX' par exemple est partagé entre 16 CDLs à l'international, d'où la complexité de gestion des opérations de planification au niveau du CDC. À la complexité liée aux différences des processus de ces filiales et la qualité de leurs prévisions s'ajoute la complexité des délais de livraison à maîtriser et les stratégies d'approvisionnement de chaque entité.

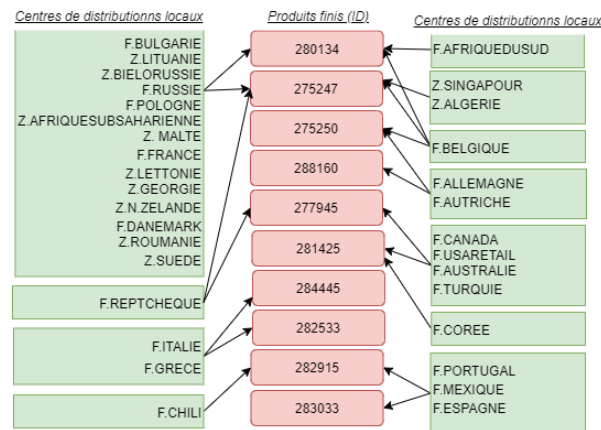


Figure 49. Les couples (produit* CDL) des données industrielles

Les principales caractéristiques des données de ces produits sont :

- Ils sont réalisés sur une ligne de conditionnement dédiée ;
- Ils utilisent un composant commun spécifique.

Ils sont déclinés en 11 variantes :

- 6 articles Crèmes ;
- 5 articles Baumes.

Dans ce périmètre, nous distinguons trois types de fichiers collectés de façon hebdomadaire :

- Un fichier issu de la vue de planificateur de production. Ce fichier est issu de l'ERP de l'usine. Pour chaque article (y.c. composant commun), il contient les données suivantes :
 - Le stock disponible et en cours de production et de contrôle qualité ;

- Les ressources prévisionnelles ;
- Les besoins prévisionnels ;
- Un fichier issu de la vue du planificateur au niveau du CDC. Ce fichier contient, pour chaque couple (article x CDL), les données suivantes :
 - Les besoins d'approvisionnement des CDLs ;
 - Le plan d'approvisionnement validé ;
 - Les réalisations des cycles de replanification précédentes et le stock initial.
- Un fichier issu de la vue d'une consolidation des données à partir des vues des filiales. Ce fichier contient pour chaque (article x CDL), les données suivantes :
 - Les prévisions de ventes ;
 - Le stock initial ;
 - Les encours ;
 - Le plan prévisionnel d'approvisionnement/ livraison ;
 - Le stock projeté.

Les données issues de l'ERP de l'usine et les données du DRP central sont exprimées à date de disponibilité au CDC. Les données des filiales sont exprimées à la date de disponibilité aux filiales, selon le délai de livraison de chaque filiale.

Nous nous basons principalement sur l'analyse de ces données pour l'élaboration de l'émulateur des ERPs afin de les régénérer dynamiquement selon des stratégies de planification définies (§4). Elles nous servent de référence pour définir la structure de données dynamiques de la base de données de la plateforme d'aide à la décision.

3. Plateforme d'aide à la replanification sous incertitudes

3.1. Cadre conceptuel du système d'aide à la décision

Afin d'implémenter le modèle possibiliste d'évaluation des risques présenté dans le chapitre précédent, nous proposons la structure de l'outil d'aide à la replanification représenté dans la figure 50. Cette structure porte sur trois modules principaux :

- Un calculateur de plans cumulés qui calcule les plans cumulés issus de la base de données ERP.
- Le générateur du modèle d'incertitude sur la demande et les réceptions programmées compte tenu d'un modèle d'incertitude donné.
- L'évaluateur de décision en fonction de la demande et des approvisionnements flous. Il calcule toutes les mesures liées aux différents risques par période et les indicateurs agrégés qui permettent de classer le plan en cours d'évaluation en fonction de la criticité des risques.

Ces modules alimentent une interface utilisateur pour aider le décideur à réviser ses décisions face aux incertitudes. Les utilisateurs interagissent directement avec l'application frontale.

Trois niveaux d'agrégation des indicateurs sont disponibles. Un bilan global (IU1) permet de visualiser la classification des plans par produit dans une matrice de criticité évaluant la gravité, la fréquence et l'adaptabilité des risques. À ce niveau le décideur peut identifier facilement les plans

les plus critiques (moins robustes) qui doivent être révisés et les plans qui sont plutôt robustes. À partir de cette classification, il choisit l'échelle de focalisation (le plan d'un produit) de l'évaluation pour voir les détails d'évaluation pour chaque période et pour chaque client (IU2) afin de décider de ses modifications. Via une interface d'édition des plans (IU3), le décideur peut créer des scénarios de modifications et les évaluer. Les tests et modifications peuvent être sauvegardés pour faciliter la comparaison entre les décisions. Il est également possible d'accéder à nouveau aux détails des évaluations pour une validation finale de la décision choisie.

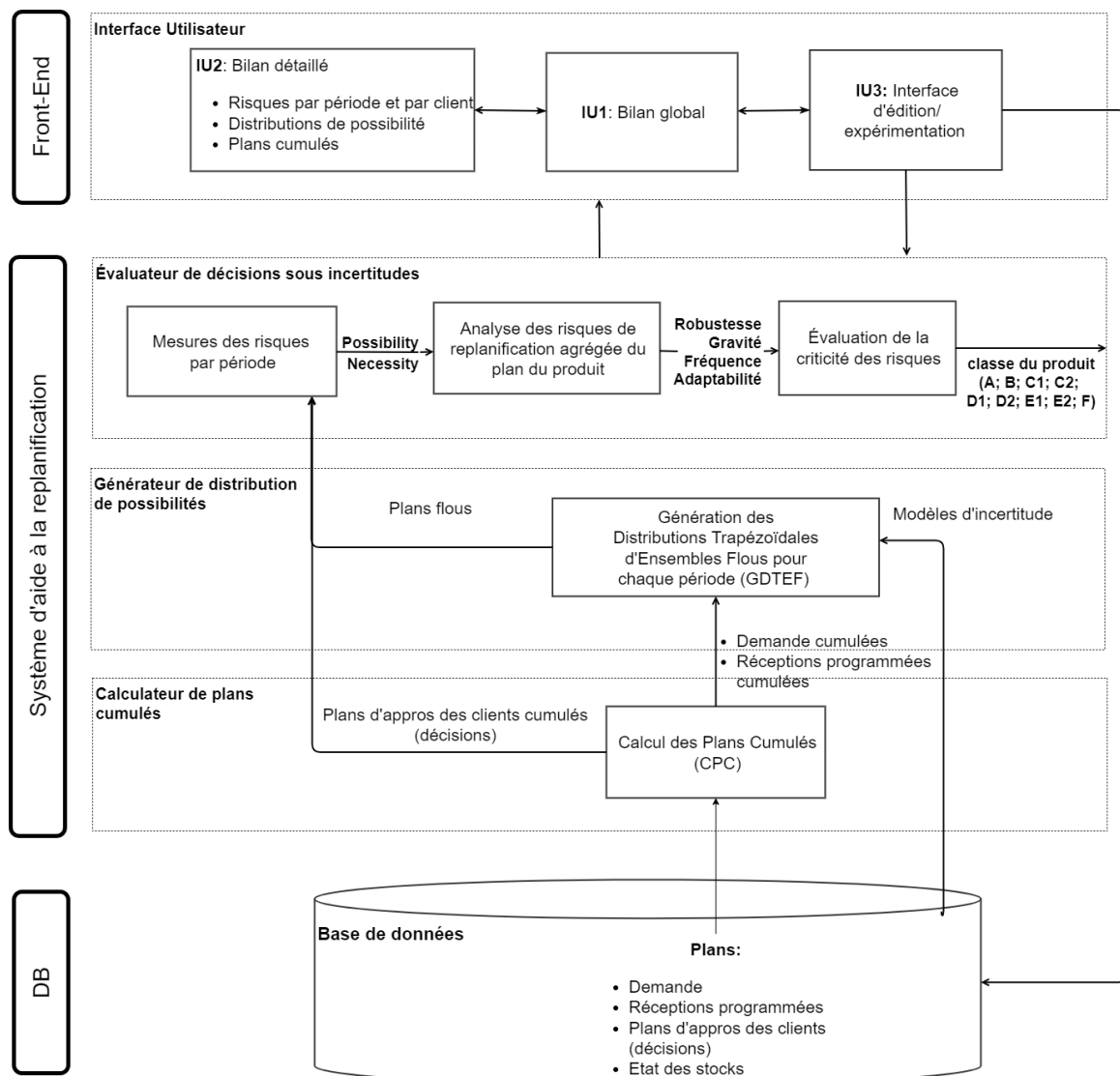


Figure 50. Structure du système d'aide à la replanification

3.2. Services de la plateforme d'aide à la décision

La plateforme d'aide à la décision est une plateforme multi-utilisateurs, accessible en ligne. Pour pouvoir être déployée dans un cloud, elle est conçue selon une approche orientée services. Les utilisateurs peuvent accéder à ces services via des services d'import et d'export de leurs données de planification issus des ERPs/ DRP (figure 51). Les données d'entrée nécessaires concernent

principalement la demande, les approvisionnements, l'état initial de la chaîne logistique et les modèles d'incertitude.

Le décideur se connecte en ligne à la plateforme d'aide à la décision via ses propres identifiants. À partir de son rôle, il peut accéder à ses plans importés depuis l'ERP. Une fois qu'il a terminé ses modifications, il peut exporter les nouveaux plans pour mettre à jour ses décisions dans l'ERP.

Les services déployés dans cette plateforme sont principalement :

- Une base de données pour accueillir les modèles d'incertitude puis les données de planification dynamique de chaque semaine et assurer la traçabilité des plans évalués par les décideurs lors de leur prise de décision.
- Un service d'évaluation des risques et d'aide à la décision sous incertitudes sur la demande et des approvisionnements, via une interface interactive.
- Un service de négociation entre acteurs basé sur un partage de plans via une interface dédiée. Les processus de prise de décision et de négociation ont été détaillés précédemment dans le chapitre 3. Nous détaillons chaque service dans les sections suivantes.

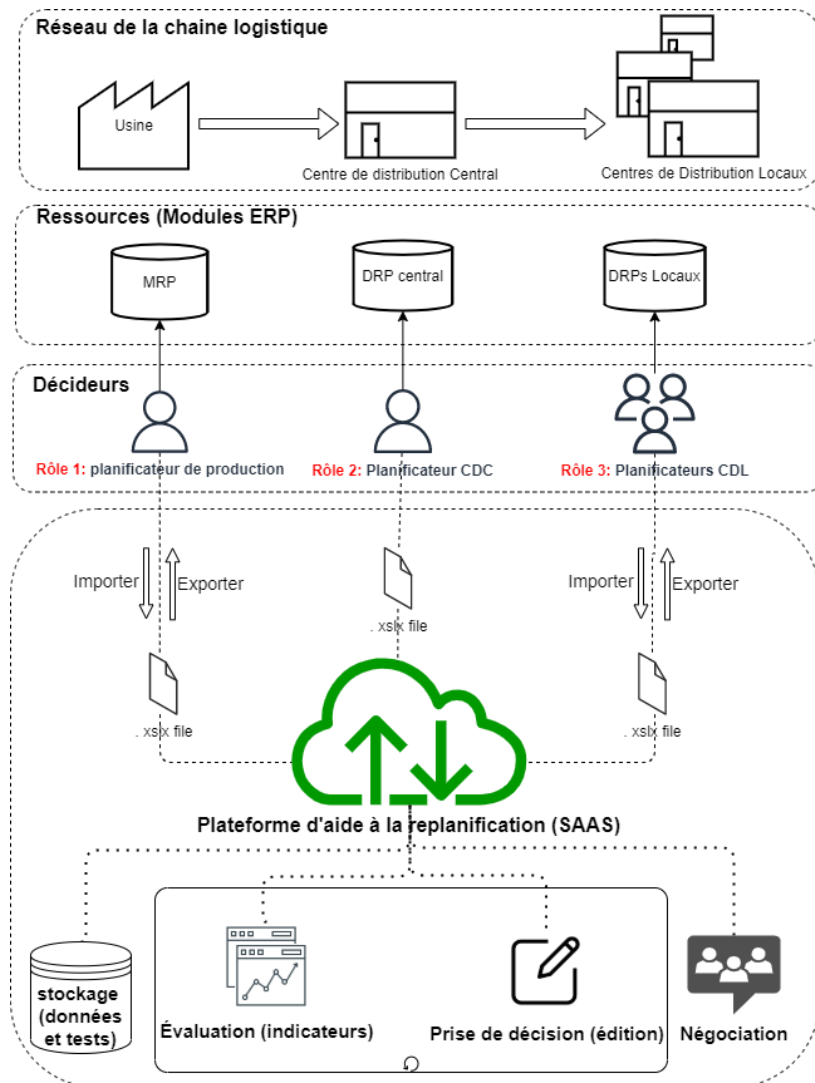


Figure 51. Intégrabilité de la plateforme d'aide à la replanification

3.3. Structure des données

L'analyse des données industrielles collectées dans le cadre du projet nous permet de définir une structure de données de planification dynamique dans la plateforme. Le modèle de données défini dans la figure 52 permet de structurer les données de planification en horizon glissant ainsi que l'historique des modifications d'un planificateur et le modèle d'incertitude.

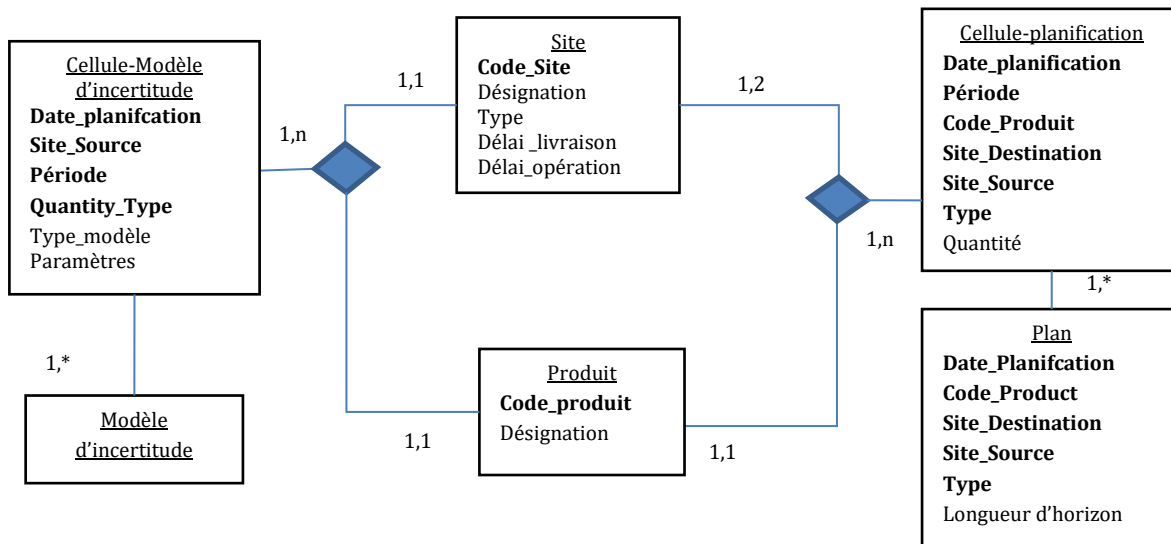
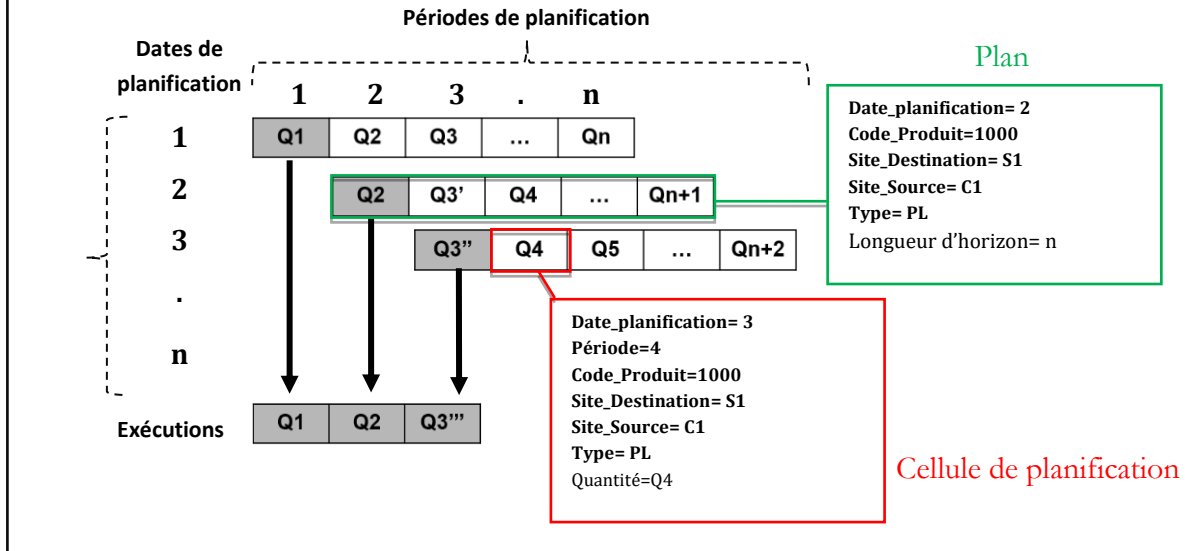


Figure 52. Modèle de données de planification sous incertitudes (cf. chapitre IV, §2)

Une donnée de planification intitulée (D) relative à la période de planification (t) élaborée à la semaine (k) pour la référence produit (P) établie par un site (E) destinée à un site (M), est représentée dans le modèle de données comme une "Cellule de planification" définie par : $Date_Planification = k$; $Période = t$; $Code_Produit = P$; $Site_Destination = M$; $Site_Source = E$; $Type = D$.

Illustration

La figure ci-dessous montre l'historique des plans de livraison PL du produit 1000, destinés à un site S1, établis par un centre de distribution C1 sur l'horizon glissant.



3.4. Interface d'aide à la décision : expérience utilisateur

Nous revenons à l'exemple illustratif déroulé au chapitre 4 afin d'illustrer ici l'interface utilisateur de la plateforme d'aide à la décision. La plateforme d'aide à la décision concerne une structure SC à définir une seule fois (figure 53). Cette structure est reconfigurable à tout moment.

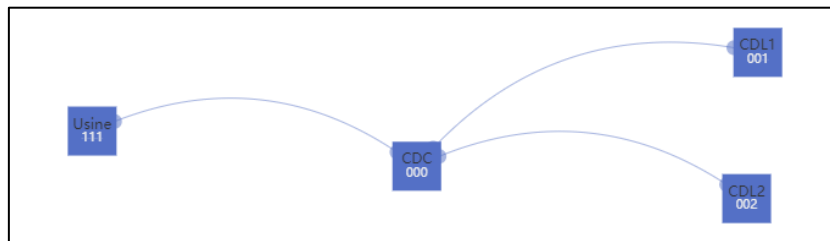


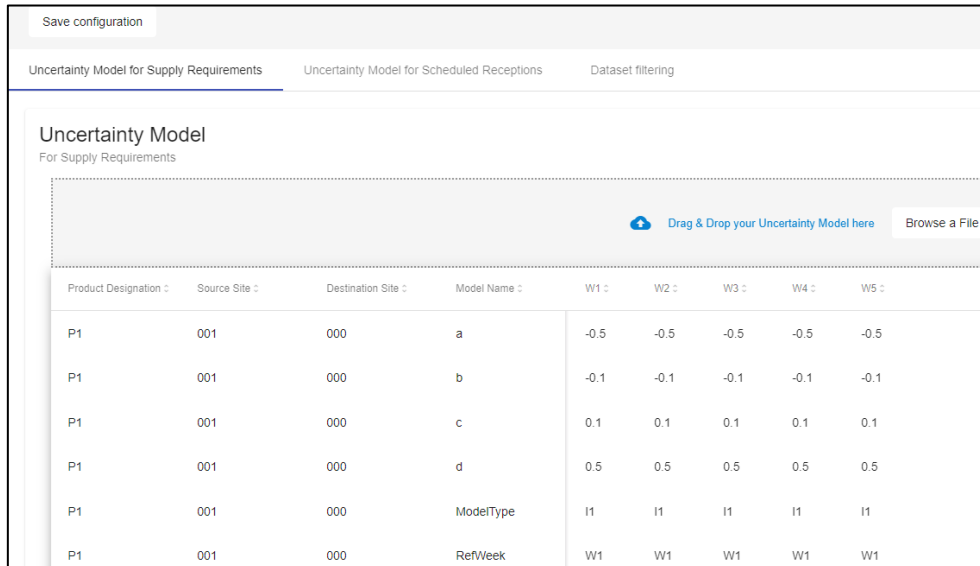
Figure 53. Définition de la structure de la SC

Le décideur se positionne du point de vue décisionnel d'une entité de cette SC pour alimenter la plateforme avec les plans de la semaine (ses plans et les plans des autres acteurs connus à cette date) exportés depuis son système de planification local (figure 54).

Id	Name	Assignee	Accepted?
.fc	Usine		☐
.fd	Cdc	Adam	☒
.fe	Cdl1		☐
.ff	Cdl2		☐

Figure 54. Affectation des rôles des décideurs

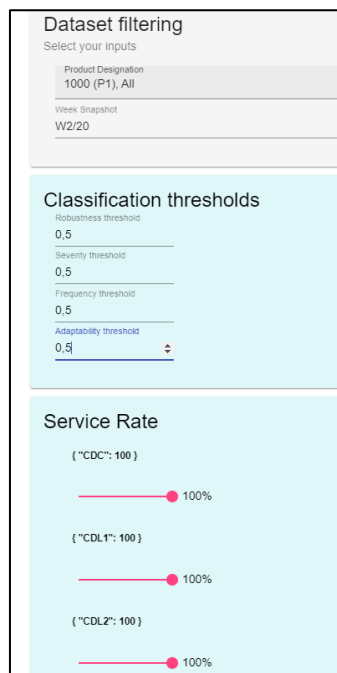
Ensuite, il passe à l'interface d'aide à la décision sous incertitudes. Il configure ses modèles d'incertitude sur les demandes et les approvisionnements (figure 55). La reconfiguration de ce modèle est possible en cas de besoin de correction du modèle dans les prochains cycles de replanification. Conformément aux modèles introduits au chapitre IV.3.1, le décideur peut découper un type de plan pour un produit donné en horizons avec pour chaque horizon : la période de début de l'horizon (Week Référence), le type de modèle d'incertitude (I1.H1; I1.H2; I2.H1; I2.H2; I3), les coefficients de paramétrage de l'incertitude (a, b, c, d).



Product Designation	Source Site	Destination Site	Model Name	W1	W2	W3	W4	W5
P1	001	000	a	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
P1	001	000	b	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
P1	001	000	c	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
P1	001	000	d	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
P1	001	000	ModelType	I1	I1	I1	I1	I1
P1	001	000	RefWeek	W1	W1	W1	W1	W1

Figure 55. Configuration du modèle d'incertitudes

Ensuite, le décideur peut paramétrer les différentes dimensions du périmètre de son évaluation et de ses critères d'évaluation de la criticité (les limites de l'arbre d'évaluation de la criticité, les taux de service objectifs par client...) (figure 56).



Dataset filtering

Select your inputs

Product Designation
1000 (P1), All

Week Snapshot
W2/20

Classification thresholds

Robustness threshold
0.5

Severity threshold
0.5

Frequency threshold
0.5

Adaptability threshold
0.5

Service Rate

{ "CDC": 100 }

100%

{ "CDL1": 100 }

100%

{ "CDL2": 100 }

100%

Figure 56. Configuration du périmètre (produits) et des tolérances d'évaluation

Puis, le décideur lance l'évaluation de ses plans et obtient leur positionnement sur la matrice des risques en fonction des indicateurs agrégés de criticité du risque de replanification (figure 57).

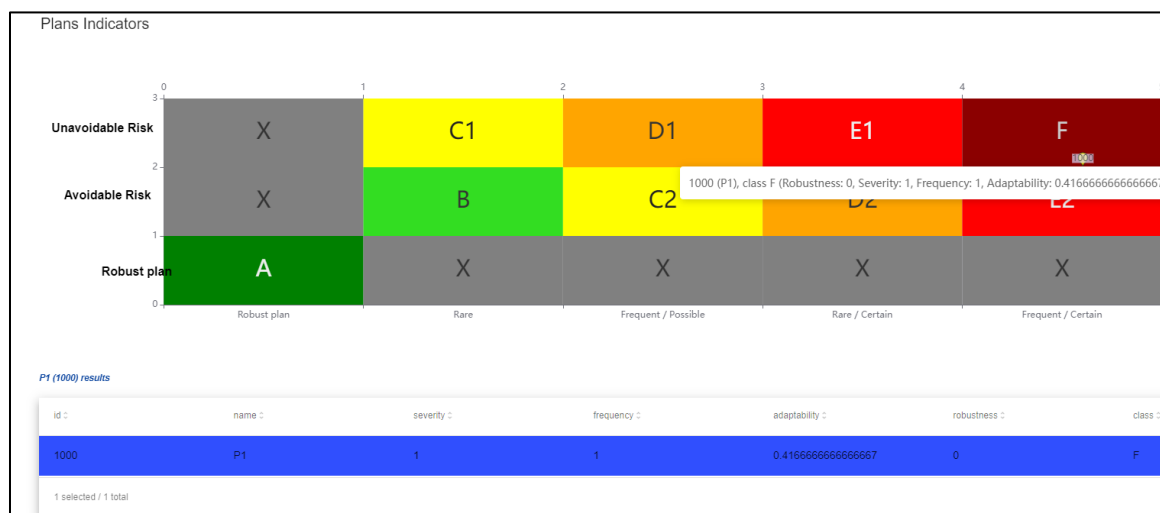


Figure 57. Matrice des risques

Ainsi, sur la matrice des risques, il devient possible d'identifier le(s) plan(s) critique(s) et de choisir le périmètre de l'évaluation. Dans l'illustration, il n'y a qu'un seul produit (en zone F). La sélection de ce produit permet d'afficher le détail des mesures de risque par période (figure 58).

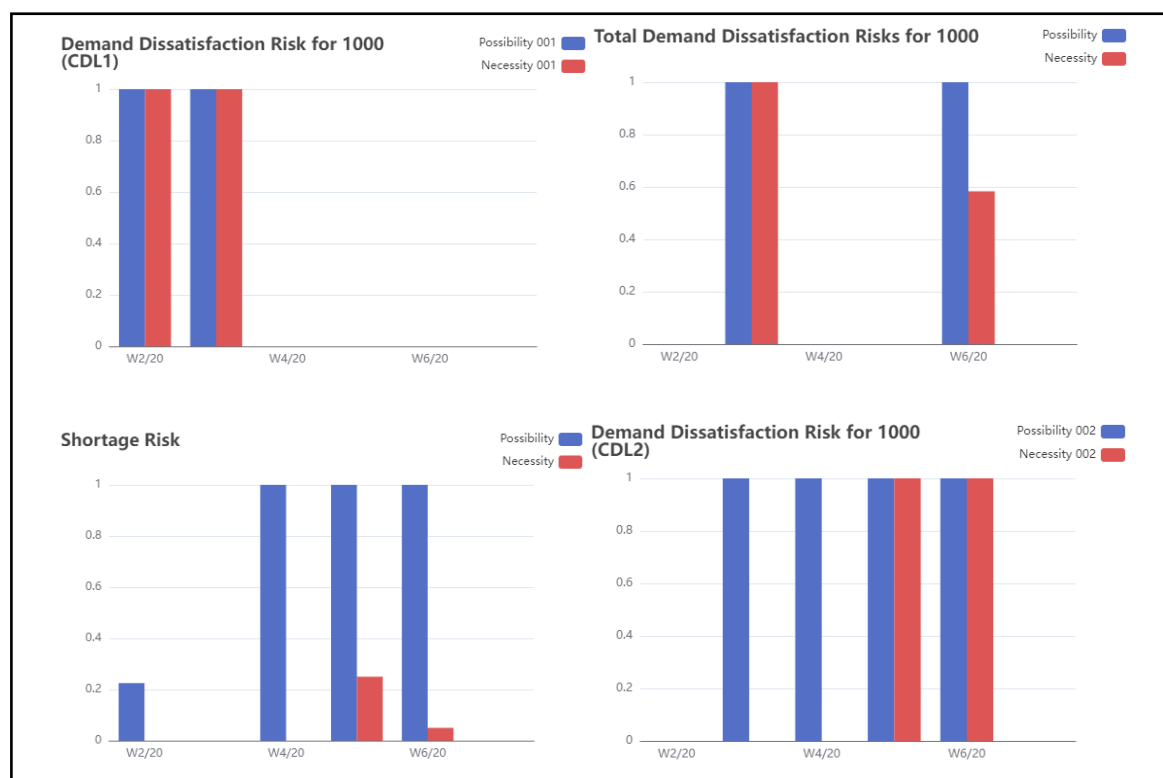


Figure 58. Mesures des risques par période

Le décideur peut ainsi repérer les périodes à revoir. Pour chaque période, ses décisions (barre au milieu) sont évaluées et positionnées par rapport à des jauges représentant les distributions de possibilités de la demande (à gauche) et des ressources prévues (à droite) (figure 59). Ainsi, il peut

modifier ses décisions en repositionnant les aiguilles des jauges par rapport aux distributions de possibilités (Zone verte correspond à des possibilités à 1, Zone rouge à des possibilités à 0, Zone jaune à des possibilités dans]0 ;1[). La couleur des aiguilles lui permet de visualiser rapidement les périodes sur lesquelles il a des difficultés : W3/20 [promesse de livraison trop basse par rapport à la demande et aux réceptions programmées], W4/20 et W5/20 [promesses trop haute par rapport à la demande].

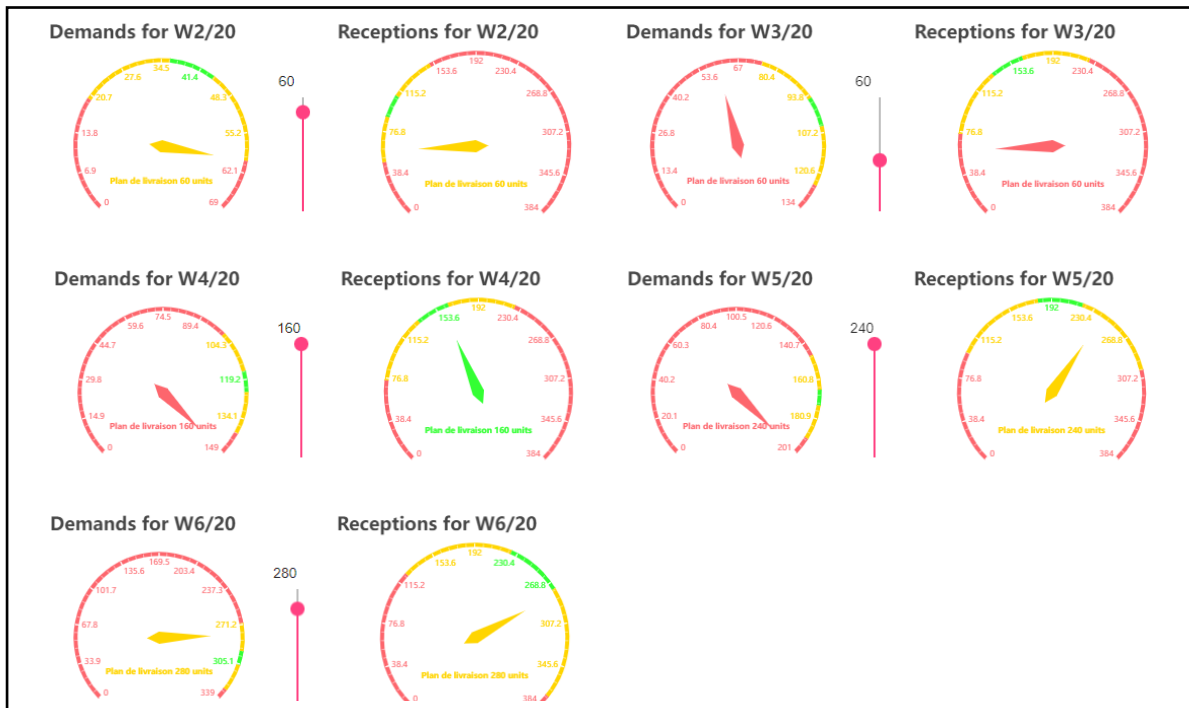


Figure 59. Plan de livraison VS plans flous des autres acteurs (interface d'édition)

Jusque-là, le décideur décidait de sa promesse de livraison totale de chaque produit. Cette décision doit ensuite être redistribuée entre les clients (figure 60). Les jauges mesurent maintenant la possibilité que le plan déterministe (20 à chaque client dans l'exemple en semaine W6) satisfasse la demande possibiliste des clients (001 et 002).

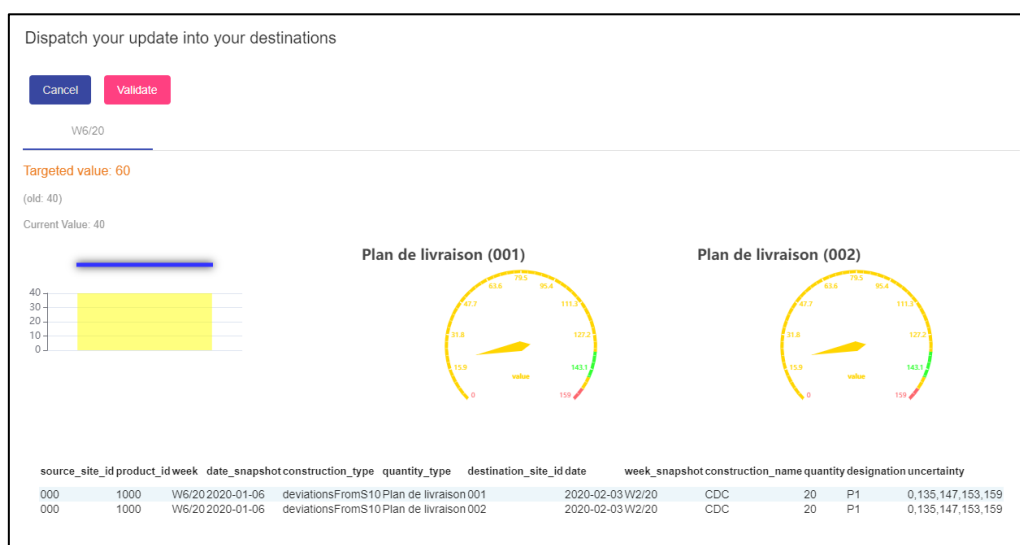


Figure 60. Allocation des modifications aux clients

Le décideur peut aussi passer par une allocation de quantités sur la base des plans déterministes connus à la date de planification (figure 61). Il voit visuellement qu'en semaine W2, le plan de livraison dépasse la demande déterministe du client 002 mais ne traite pas celle du client 001.

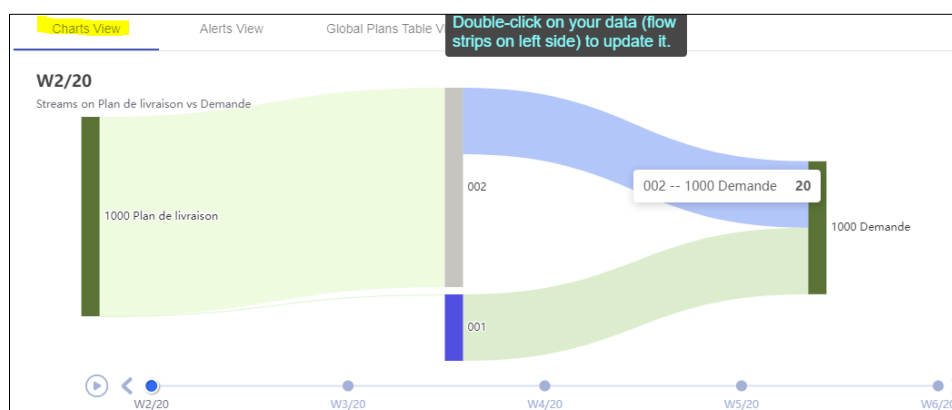


Figure 61. Alignement des plans déterministe

Des stratégies automatiques d'alignement du plan sont proposées au regard des alertes de déviation des décisions par rapport aux demandes des clients (figure 62). L'alerte rouge renvoie à un écart négatif par rapport à la demande et l'alerte verte à un écart négatif par rapport à la demande du client.

Code	Designation	Plan de livraison	Demande	Date	Source	Destination
1000	P1	20	20	2020-01-06	000	001
1000	P1	20	20	2020-01-06	000	002
1000	P1	20	20	2020-01-13	000	001
1000	P1	40	20	2020-01-13	000	002
1000	P1	20	20	2020-01-20	000	001

Figure 62. Alertes des déviations par rapport les demandes et stratégies d'alignements

Le décideur peut ainsi créer des scénarios de plan de livraison pour tester plusieurs décisions et sélectionner celui qu'il préfère pour diminuer la criticité du plan sur la matrice des risques et l'exporter (figure 63).

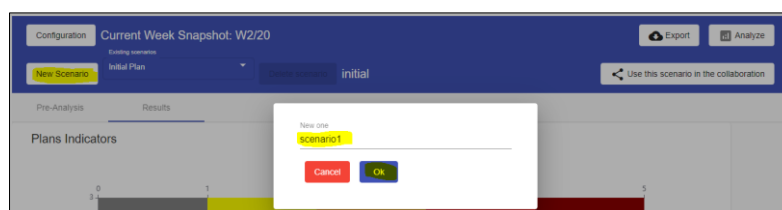


Figure 63. Création des scénarios de décision

3.5. Plateforme de négociation

Au cours du processus de prise de décision basé sur les résultats de l'évaluation, le décideur peut choisir de recourir ou non à la négociation. Cette négociation est principalement basée sur le processus de partage de plan décrit dans le chapitre 3.

Ce processus implique que les différents décideurs soient connectés à la plateforme. Ainsi, en fonction du rôle avec lequel le décideur est connecté à la plateforme, il aura le choix de partager une nouvelle proposition de plan avec son client ou son fournisseur (Figure 64). En s'appuyant sur la plateforme d'aide à la décision, le décideur peut remonter dans l'historique des modifications pour voir le plan qui fera l'objet de la négociation avant de le valider et de l'exporter.

CDC
(ActivityV2GHIKxbqNpftf86dQLTw)
Role: CDC

Previous organizations | Following organizations

Collaboration with FW | Collaboration with GW

My DP

0 days of offset with FW | Validate modifications | Accept modifications and merge | Align deviations

Upload your plan proposal | Browse a File

My deviations	FW deviations	Initial Plan				
Construction Name	Construction Type	Date	Date Snapshot	Designation	Destination Site Id	Product Id
CDC	deviationsFromCDC	2020-01-20	2020-01-06	P1	001	1000
CDC	deviationsFromCDC	2020-02-03	2020-01-06	P1	001	1000

@ Adam_and_jerry

Users

Jerry

Could you please check the deviations of scheduled deliveries?

adam

Figure 64. Interface de négociation

4. Un Serious Game comme preuve de concept (PoC)

4.1. Utilisations des 'Serious Game'

Les 'Serious Game' (noté SG pour la suite) sont largement utilisés dans l'enseignement supérieur et en formation au sein des entreprises (Muratet et al. 2009; Hauge et al. 2016; Mullen, Milechin, et Milechin 2021; Lameris et al. 2021).

De nombreux SG célèbres sont utilisés pour des formations sur les concepts du Supply Chain Management particulièrement. "The Fresh Connection" qui permet de simuler les processus d'une entreprise sous crise financière (De Leeuw, Schippers, et Hoogervorst 2015). Le "Beer Game" pour reproduire et visualiser les problèmes de décision sous incertitudes dans une SC multi-acteurs, principalement l'effet Bullwhip (Pillay et Laeequddin 2019; Di Mauro et al. 2020; Alabdulkarim 2020). Le jeu de la bière a également été utilisé dans (Di Mauro et al. 2020) pour une étude

observationnelle de l'impact de l'aversion individuelle au risque sur les décisions de réapprovisionnement, menée par des participants professionnels des achats et de la logistique.

Par ailleurs, dans d'autres travaux comme (Baalsrud Hauge et al. 2022; Nonaka et al. 2016), l'approche SG a été utilisée pour analyser le processus dynamique de prise de décision dans l'approvisionnement.

Dans notre cas, nous avons choisi l'approche SG pour :

- Reproduire la dynamique des processus de planification collaborative à horizon glissant pour mieux comprendre les comportements liés à cette dynamique. Dans (Tiss et al. 2019), nous avons proposé un SG simulant ces processus de planification via des « spread Sheets » et les flux physiques de distribution via un jeu plateau.
- Exploiter les données dynamiques du processus de planification tactique pour étudier les interactions de l'outil d'aide à la décision avec ces données.
- Fournir une expérience utilisateur de l'outil.

4.2. Dimensionnement

Le SG a été dimensionné pour simuler au mieux le processus de planification de la chaîne logistique modélisée (figure 65).

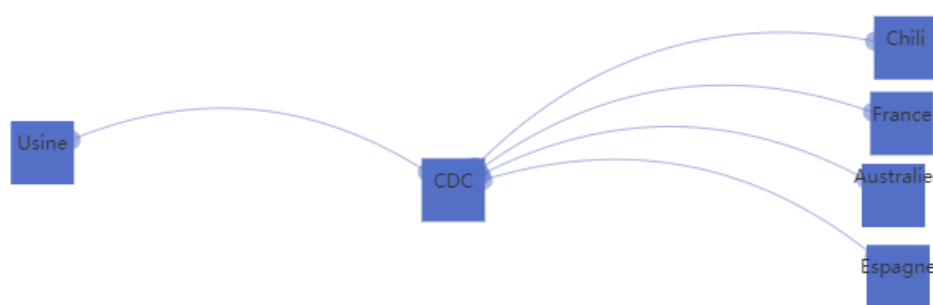


Figure 65. Dimensionnement du SC du Serious Game

La SC considérée est composée de :

- un CDC (code site : 000) : temps de préparation de quelques jours (0 semaine).
- une usine (code site : 111) : Délai total de conditionnement et de contrôle qualité de deux semaines.
- 4 filiales :

Filiales	Code site	Délai de livraison
France	001	Quelques jours (0 semaine).
Espagne	002	1 semaine
Chili	003	2 semaines
Australie	004	3 semaines

Tableau 8. Scénario des caractéristiques des filiales

- 4 produits :

Désignation produit	Code produit	Consommé par
P1	1000	France
		Espagne
		Chili
P2	2000	France
		Espagne
P3	3000	France
		Chili
P4	4000	Australie

Tableau 9. Scénario des caractéristiques des produits

4.3. Conception du 'Serious Game'

4.3.1. Déroulement du 'Serious Game' en horizon glissant

Le déroulement du SG multi-acteurs est détaillé dans la figure 66. L'objectif de l'émulateur ERP/DRP est de simuler les processus mensuels et hebdomadaires au niveau ERP/DRP de l'entreprise. Un maître de jeu gère l'interface entre ce système et les participants planificateurs au niveau des différents maillons du SC.

À la fin de chaque tour de jeu (chaque semaine), le maître du jeu initialise (1) l'émulateur avec les nouveaux plans des participants au jeu. Ensuite, il relance le calcul des plans sur l'émulateur et les télécharge (2). Il met ensuite à disposition des participants les nouveaux plans calculés, via une interface de partage des plans (3). Chaque acteur récupère le fichier de sa vue ERP/DRP locale (4) et démarre un nouveau cycle de replanification via une opération d'importation des fichiers ERP (5). Ceci lui permet de réviser ses plans dans la plateforme d'aide à la décision (6) et de terminer le cycle en partageant ses décisions sur l'interface de partage de plans (7-8).

Actuellement, le service d'aide à la décision sous incertitude n'est personnalisé que pour la vue du décideur au CDC. Les autres acteurs disposent d'une interface d'évaluation déterministe et peuvent seulement être impliqués dans les processus de négociation.

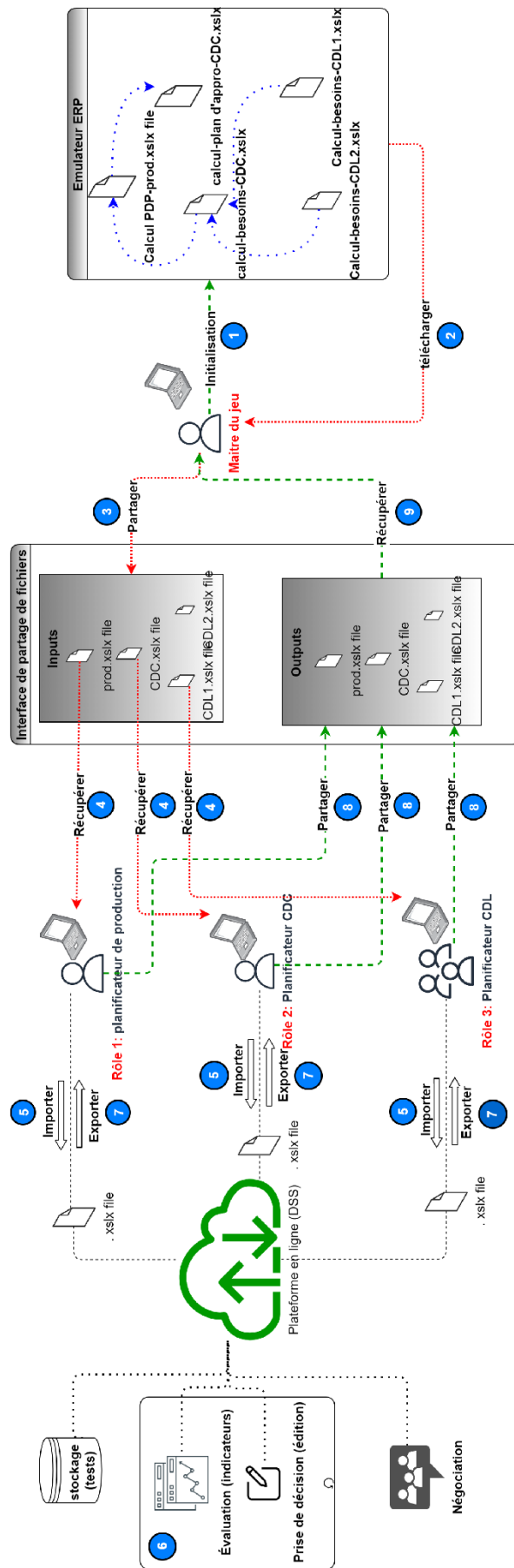


Figure 66. Aperçu général du déroulement multi-utilisateurs du jeu sérieux

4.3.2. Émulateur ERP : Modèle de planification

Nous présentons ici le modèle émulé de planification mensuelle et hebdomadaire à partir des processus modélisés dans la section précédente.

- **Notations :**

<i>Indices</i>	
c :	Date de planification
t	Période de planification
T	Taille d'horizon de planification
j	Produit $j = (P1, P2, P3, P4)$
i	Filiale $i = (France, Espagne, Chili, Australie)$
IJ	L'ensemble des filiales i consommant le produit j
<i>Paramètres</i>	
C_{ij}	Couverture des stocks/ stock objectif de la filiale i du produit j .
C_j	Couverture des stocks/ stock objectif du CDC du produit j .
l_i	Délai de livraison de la filiale i .
M_{jt}	Capacité de l'usine de la période t pour un produit j en nombre de produits.
k	Délai de production ou délai de livraison du CDC.
g	Horizon gelé.
<i>Variables d'état</i>	
$w_{ij,t}^c$	Les attendues de livraison de la filiale i de période t du produit j à la date c .
$w_{j,t}^c$	Attendus de production/livraison du CDC de période t du produit j à la date c .
$SO_{j,c}$	Stock initial du CDC pour produit j à la fin de $c-1$.
$SO_{ij,c}$	Stock initial de la filiale i pour produit j à la fin de $c-1$.
<i>Entrée du processus</i>	
$F_{ij,t}^c$	Les prévisions de ventes de la filiale i pour le produit j et la période t à la date c .
<i>Variables de décision des acteurs de la SC</i>	
$BA_{ij,t}^c$	Besoins d'approvisionnement de la filiale i pour le produit j et la période t à la date c .
$BP_{j,t,p}$	Besoins d'approvisionnement/ à produire pour le produit j et la période t à la date c .
$P_{j,t}^c$	Plan de production prévu (PDP) du produit j et la période t à la date c .
$PA_{ij,t}^c$	Besoins d'approvisionnement de la filiale i pour le produit j et la période t à la date c .
<i>Variables dépendantes</i>	
$S_{j,t,d}$	Stock projeté du CDC de la période t à c par rapport à une décision d .
$S_{ij,t,d}$	Stock projeté de la filiale i de la période t à c par rapport à une décision d .
$BB_{j,t}^c$	Besoins bruts de l'usine du produit j et la période t à la date c .
$BB_{ij,t}^c$	Besoins bruts de du CDC pour une filiale i du produit j et la période t à la date c .
$I_{j,t}^c$	Indisponibilité à l'usine du produit j à la période t à la date c .
$I_{ij,t}^c$	Indisponibilité au CDC pour filiale i du produit j à la période t à la date c .
$TP_{j,t}^c$	Possible à promettre au CDC pour produit j de la période t à la date c .

- Chaque première semaine du mois : $\forall t \in [T], \forall i \in IJ, \forall j$:

Vue	Calcul des plans et des plans projetés
Filiale	$BA_{ij,t}^c = F_{ij,t}^c + C_{ij} - S_{ij,t-1,BA} - w_{ij,t}^c / S_{ij,t-1,BA} = S0_{ij,c} \text{ pour } t = c \quad (1)$ $S_{ij,t,BA} = S_{ij,t-1,BA} + BA_{ij,t}^c + w_{ij,t}^c - F_{ij,t}^c \quad (2)$
CDC	$BP_{j,t}^c = (\sum_{i \in IJ} BA_{ij,t+l_i}^c + C_j - S_{j,t-1,BP} - w_{j,t}^c) / S_{j,t-1,BP} = S0_{j,c} \text{ pour } t = c \quad (3)$ $S_{j,t,BP} = S_{j,t-1,BP} + BP_{j,t}^c + w_{j,t}^c - \sum_{i \in IJ} BA_{ij,t+l_i}^c \quad (4)$
Usine	$BB_{j,t}^c = BP_{j,t+k}^c + I_{j,t-1}^c \quad (5)$ $I_{j,t}^c = BB_{j,t}^c - P_{ij,t}^c \quad (6)$ $\begin{cases} \text{si } t > g: P_{j,t}^c = \min\left(\frac{BB_{j,t}^c}{\sum_j BB_{j,t}^c} * M_{jt} ; BB_{j,t}^c\right) \\ \text{sinon: } P_{ij,t}^c = P_{j,t}^{c-1} \end{cases} \quad (7)$
CDC	$BB_{ij,t}^c = BA_{ij,t+l_i}^c + I_{ij,t-1}^c \quad (8)$ $I_{ij,t}^c = BB_{ij,t}^c - PA_{ij,t}^c \quad (9)$ $S_{j,t,TP} = S_{j,t-1,TP} + P_{j,t-k}^c + w_{j,t}^c - TP_{j,t}^c \quad (10)$ $\begin{cases} \text{Si } t > g: TP_{j,t}^c = \min(P_{j,t-k}^c + S_{j,t-1,TP}; \sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c) \\ \text{Sinon: } TP_{j,t}^c = \sum_{i \in IJ} PA_{ij,t}^{c-1} \end{cases} \quad (11)$ $PA_{ij,t}^c = \min\left(\frac{BB_{ij,t}^c}{\sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c} * TP_{j,t}^c ; BB_{ij,t}^c\right) / \sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c > 0 \quad (12)$

Les vues du tableau correspondent à différentes vues du système ERP/DRP de chaque entité. Dans la vue filiale, les plans sont exprimés à la date de réception prévue par les filiales. Dans la vue CDC, les plans sont exprimés à la date de disponibilité/lancement au CDC. Les plans de production de la vue usine sont exprimés à la date de lancement en production. Ainsi, les données externes à une entité sont décalées en fonction des délais de livraison et de production prédéfinis.

Le calcul des besoins nets des filiales (eq (1)-(2)) est un calcul MRP classique. De même pour le calcul des besoins du CDC (eq (3)-(4)) avec une contrainte supplémentaire : le CDC demande au minimum la quantité du plan de production transmis lors le cycle précédent.

Nous avons mis en place des calculs de plan de production et de plan d'approvisionnement des filiales selon des stratégies prédéfinies d'experts :

- Pour le calcul du plan de production (eq (5)-(7)), nous avons appliqué une stratégie de lissage de la charge qui tient compte des indisponibilités des semaines précédentes et d'une contrainte de capacité totale de conditionnement.
- Pour le calcul des plans d'approvisionnement du CDC (eq (6)-(12)), nous avons appliqué une stratégie de lissage en fonction d'un maximum possible à promettre et une stratégie d'allocation équitable entre les filiales en cas de dépassement des ressources disponibles. La stratégie de lissage du PA prend en compte les indisponibilités (retards) des semaines précédentes. Nous faisons l'hypothèse que les plans planifiés à la première semaine de l'horizon représentent l'exécution dans la limite du stock disponible à la CDC (stock initial et réceptions) à cette date.
- **Chaque semaine** : $\forall t \in [T], \forall i \in I, \forall j$:

Le calcul des besoins (eq (1)-(7)) se fait chaque semaine sur le même principe. La différence se situe au niveau du calcul des plans d'approvisionnement des filiales au niveau du CDC (eq (8)-(12)). Le calcul de ces plans prend en compte le dernier plan transmis par l'usine en début de semaine ($P_{j,t-k}^{c-1}$). Ceci est dû à la désynchronisation du processus hebdomadaire.

$$\text{CDC} \quad BB_{ij,t}^c = BA_{ij,t+l_i}^c + I_{ij,t-1}^c \quad (8')$$

$$I_{ij,t}^c = BB_{ij,t}^c - PA_{ij,t}^c \quad (9')$$

$$S_{j,t,TP} = S_{j,t-1,TP} + P_{j,t-k}^{c-1} + w_{j,t}^c - TP_{j,t}^c \quad (10')$$

$$\begin{cases} \text{Si } t > g : TP_{j,t}^c = \min (P_{j,t-k}^{c-1} + S_{j,t-1,TP}; \sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c) \\ \text{Sinon: } TP_{j,t}^c = PA_{ij,t}^{c-1} \end{cases} \quad (11')$$

$$PA_{ij,t}^c = \min \frac{BB_{ij,t}^c}{\sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c} * TP_{j,t}^c / \sum_{i \in IJ} BB_{ij,t}^c > 0 \quad (12')$$

4.4. Expérimentation d'un point de vue de planificateur au niveau du Centre de Distribution Central

4.4.1. Scénario

Le jeu a pour objectif ici d'évaluer l'impact de la prise en compte des incertitudes dans le processus de décision du planificateur au niveau du CDC. Ainsi, nous déroulons un scénario du jeu constitué des éléments suivants :

- Un modèle d'incertitudes sur les demandes des filiales ;
- Un modèle d'incertitudes sur les approvisionnements de l'usine ;
- Une initialisation du système de planification (plans au début de la première semaine, état des stocks et des encours, ...).

- Une méthode de génération des prévisions de ventes en horizon glissant (perturbations et nouvelles prévisions des fins d'horizon).

1/ Modèles d'incertitude :

Dans l'expérimentation, nous considérons que l'expert exprime les variations d'une quantité planifiée pour une période donnée par rapport à la quantité planifiée la première fois sur l'horizon glissant pour cette même période. Nous proposons l'échelle suivante (tableau 10) pour la caractérisation de l'amplitude et du type de variations de demande et des approvisionnements cumulées sur l'horizon glissant :

Amplitude	Tout à fait possible autour de X en %	Impossible au-delà de Y autour de X (en % de X)	Type de variations	Type de variations
Faible	0%	5%	Centrée	+/-X et +/-Y
Moyenne	5%	10%	Baisse	-X et -Y
Forte	10%	50%	Hausse	+X et +Y
Nulle	0%	0%		

Tableau 10. Échelle de caractérisation du modèle d'incertitudes d'expert

Notre approche concerne la gestion des incertitudes sur l'horizon flexible. Nous exprimons donc ces incertitudes sur cet horizon.

Nous exécutons l'émulateur ERP/DRP sur un horizon de planification de 24 semaines mais nous considérons que 20 semaines dans notre horizon réel pour l'aide à la décision afin d'éviter les bouts d'horizon incomplets en raison des délais de livraison (4 semaines= max (délais de livraison des filiales)).

Dans la simulation, nous fusionnons une stratégie déterministe d'horizon figé (H1) de deux semaines (S1, S2) et une stratégie de gestion de risques sur l'horizon flexible. Nous divisons ce dernier en deux horizons qui regroupent les périodes ayant le même modèle d'incertitude :

- H2 : 2 mois du début l'horizon flexible (S3-S12) ;
- H3 : 3 mois du reste de l'horizon flexible (S13-S20).

Nous considérons des modèles d'incertitudes de types I2.H2 (cf. chapitre IV. §3) sur les plans cumulés de demandes et d'approvisionnements transmis au CDC.

Le tableau ci-dessous détaille le profil de chaque entité et son modèle d'incertitude basé sur la description d'expert.

Profil	Type de donnée	Modèle d'incertitude	Entité (s) concernée(s)										
1	Description d'expert	Généralement les variations des réceptions sont centrées autour des quantités cumulées. Ces variations ont une importante amplitude surtout sur le début de l'horizon flexible, moins forte sur sa fin.	Usine										
	Formalisation	<table><tr><th colspan="2">H2</th><th colspan="2">H3</th></tr><tr><th>Amplitude</th><th>Variation</th><th>Amplitude</th><th>Variation</th></tr><tr><td>Forte</td><td>Centrée</td><td>Moyenne</td><td>Centrée</td></tr></table>		H2		H3		Amplitude	Variation	Amplitude	Variation	Forte	Centrée
H2		H3											
Amplitude	Variation	Amplitude	Variation										
Forte	Centrée	Moyenne	Centrée										

2	Description d'expert	La filiale surestime ses prévisions de vente. Au long de l'horizon glissant ses demandes cumulées ont tendance à diminuer par rapport la première fois planifiées : Fortement au début de l'horizon flexible et faiblement vers sa fin.				France (Fr)										
	Formalisation	<table><tr><td colspan="2">H2</td><td colspan="2">H3</td></tr><tr><td>Amplitude</td><td>Variation</td><td>Amplitude</td><td>Variation</td></tr><tr><td>Forte</td><td>Baisse</td><td>Faible</td><td>Baisse</td></tr></table>					H2		H3		Amplitude	Variation	Amplitude	Variation	Forte	Baisse
H2		H3														
Amplitude	Variation	Amplitude	Variation													
Forte	Baisse	Faible	Baisse													
3	Description d'expert	La filiale ne maîtrise pas assez ces prévisions de ventes sur l'horizon flexible lointain et peut avoir des variations en hausse comme en baisse. Cette maîtrise augmente sur l'horizon flexible proche avec une variation faible en hausse.				Espagne (Es)										
	Formalisation	<table><tr><td colspan="2">H2</td><td colspan="2">H3</td></tr><tr><td>Amplitude</td><td>Variation</td><td>Amplitude</td><td>Variation</td></tr><tr><td>Faible</td><td>Hausse</td><td>Moyenne</td><td>Centrée</td></tr></table>					H2		H3		Amplitude	Variation	Amplitude	Variation	Faible	Hausse
H2		H3														
Amplitude	Variation	Amplitude	Variation													
Faible	Hausse	Moyenne	Centrée													
4	Description d'expert	La filiale a une faible proactivité. Sur l'horizon flexible lointain il a une tendance à faire une demande peu variable. En se rapprochant de la date d'exécution, la demande cumulée varie fortement en hausse par rapport les quantités initialement prévues.														
	Formalisation	<table><tr><td colspan="2">H2</td><td colspan="2">H3</td></tr><tr><td>Amplitude</td><td>Variation</td><td>Amplitude</td><td>Variation</td></tr><tr><td>Forte</td><td>Hausse</td><td>Faible</td><td>Centrée</td></tr></table>					H2		H3		Amplitude	Variation	Amplitude	Variation	Forte	Hausse
H2		H3														
Amplitude	Variation	Amplitude	Variation													
Forte	Hausse	Faible	Centrée													
5	Description d'expert	La demande cumulée sur l'ensemble des horizons est stable en horizon glissant jusqu'à l'exécution.				Australie (Au)										
	Formalisation	<table><tr><td colspan="2">H2</td><td colspan="2">H3</td></tr><tr><td>Amplitude</td><td>Variation</td><td>Amplitude</td><td>Variation</td></tr><tr><td>Nulle</td><td></td><td>Nulle</td><td></td></tr></table>					H2		H3		Amplitude	Variation	Amplitude	Variation	Nulle	
H2		H3														
Amplitude	Variation	Amplitude	Variation													
Nulle		Nulle														

Tableau 11. Scénario du modèle d'incertitude

2/ Initialisation du modèle de planification

Afin d'initialiser le système de planification, pour la première semaine, nous avons généré un premier scénario de prévisions de ventes des filiales dans des intervalles prédéfinis de manière aléatoire. Nous avons ainsi dimensionné le système (stocks initiaux, encours et plans au début de la semaine) pour avoir tous les stocks au niveau objectif (CDC et filiales). La capacité de l'usine a été dimensionnée par rapport au maximum mesuré sur l'horizon, en tenant en compte des besoins d'approvisionnement du CDC.

3/ Génération des prévisions de ventes sur l'horizon glissant

Afin de tester l'outil sous incertitudes, nous actualisons les prévisions de ventes des filiales à chaque cycle de replanification de l'horizon glissant et générons les nouvelles prévisions à la fin de l'horizon de façon aléatoire. Nous mettons à jour les prévisions de ventes de la semaine en fonction des modèles d'incertitude définis pour les demandes des filiales. Pour ce faire, au début d'un cycle de

replanification, nous appliquons le modèle d'incertitude des demandes des filiales sur les prévisions de ventes cumulées de la semaine passée, nous générons une alpha-coupe aléatoire pour chaque distribution de possibilité entre 0 et 1 (voir figure 67). Dans l'intervalle obtenu à partir de cette alpha-coupe, nous prenons aléatoirement une valeur entre les deux valeurs extrêmes ($\underline{Q}_t$ et $\overline{Q}_t$). Cela nous permet d'éviter d'avoir toutes les variations des prévisions de ventes au centre de la distribution. Ainsi, cette méthode va nous permettre de générer des scénarios en vue de voir l'impact des variations sur l'occurrence des risques en termes de possibilité et de degré de nécessité ; plus précisément sur la mesure de la gravité du risque.

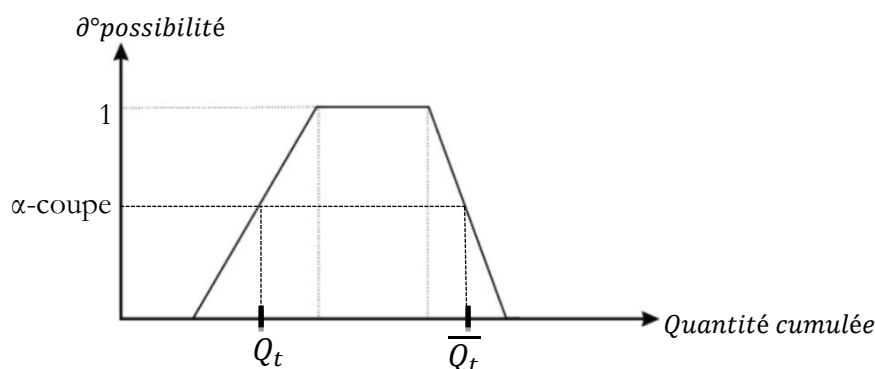
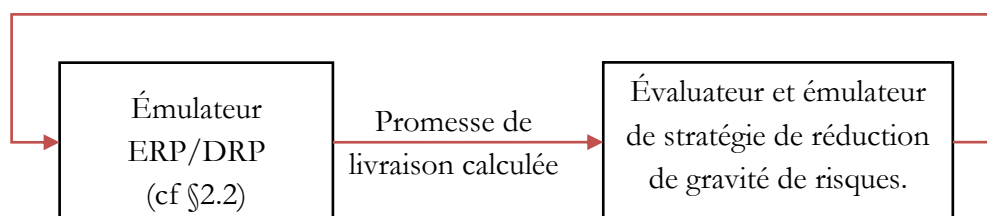


Figure 67. Scénario de génération des prévisions de ventes en horizon glissant

4.4.2. Simulateur de stratégie de réduction de gravité du risque de replanification sous incertitudes

Nous avons simulé une stratégie de traitement de risque de replanification K4 associée aux promesses de livraison issues de l'émulateur ERP/DRP (voir illustration de la figure 68).



Promesse de livraisons traitée/ validée

Figure 68. Interaction de l'émulateur ERP/DRP et le simulateur de la stratégie de réduction de gravité du risque

La stratégie mise en place correspond à une stratégie de réduction de la gravité du risque basée sur un lissage sans changement de la quantité totale prévue, dans l'ERP/DRP, pour la livraison sur un horizon. Ainsi, les quantités cumulées intermédiaires peuvent changer mais pas la quantité cumulée à la fin de l'horizon. Nous rappelons que la gravité du risque correspond au degré maximal de nécessité du risque mesuré sur l'horizon de planification.

Sur un horizon glissant, cette stratégie est applicable sur des plans adaptables dont le degré de gravité est supérieur à la limite tolérée par le décideur. La figure 69 illustre les améliorations possibles de la criticité d'un plan sur l'arbre des risques en appliquant cette stratégie (classes E2, D2 -> C2, B).

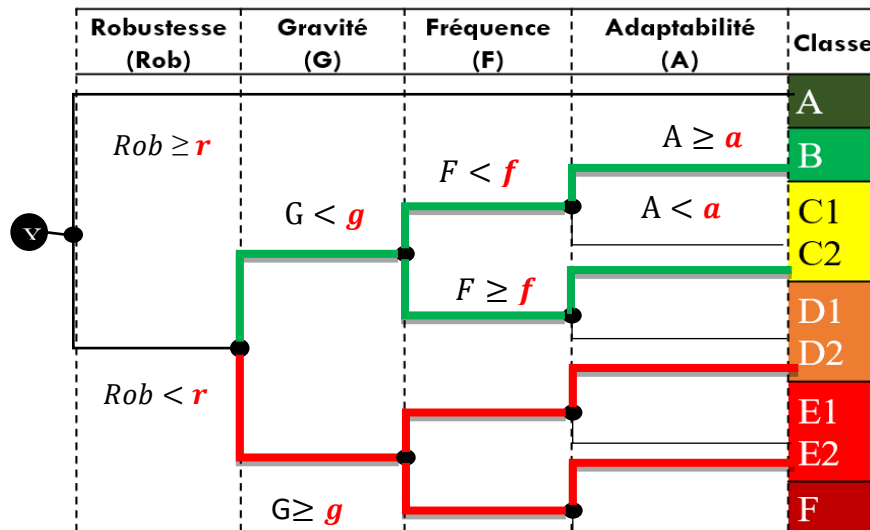


Figure 69. Illustration de l'impact de l'application de la stratégie de lissage pour réduction de gravité sur l'arbre des risques (avant (rouge) et après l'application de la stratégie (vert))

Pour un seuil de gravité maximal toléré par le décideur, la stratégie émulée permet de :

- Identifier les périodes dont le degré de nécessité est supérieur à la valeur de gravité du risque toléré.
- Lisser le plan afin de réduire toutes les nécessités par période en dessous de la valeur maximale tolérée sous réserve de l'adaptabilité du plan issu du DRP.

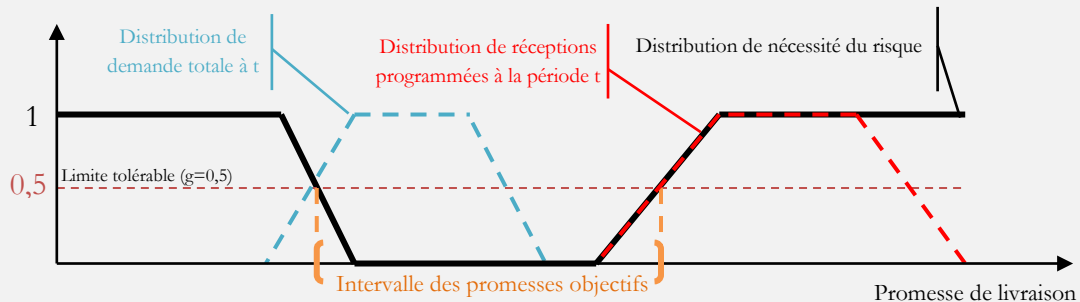
Ainsi, nous distinguons trois cas qui peuvent être envisagés pour la réduction de la nécessité du risque global mesuré pour une période de l'horizon par rapport à la limite tolérable par le décideur et aux distributions des recettes et de la demande totale (voir l'illustration ci-dessous) :

- Un cas (cas 1) où la réduction de la nécessité du risque pour une période donnée est possible jusqu'à 0.
- Un cas (cas 2) où la réduction de la nécessité du risque pour une période donnée n'est possible que jusqu'à une valeur minimale possible et pas en dessous de cette valeur.
- Un cas (cas 3) où la réduction de la nécessité est impossible quelle que soit la valeur de la promesse de livraison car la demande minimale est supérieure à la valeur maximale des recettes possibles.

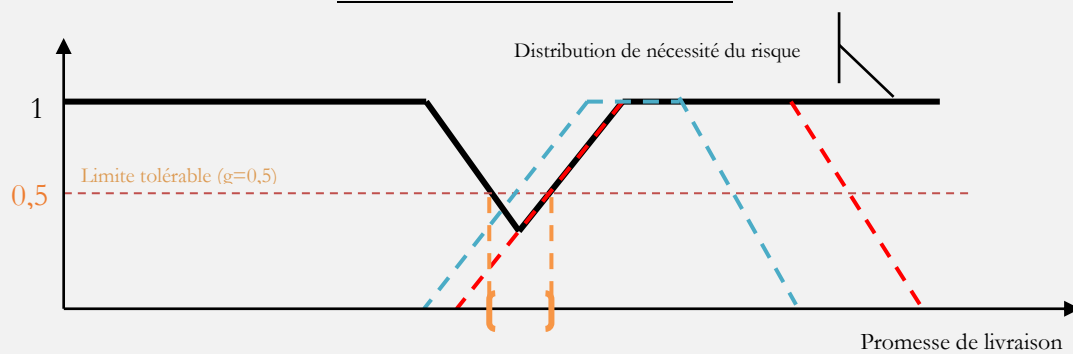
La limite (g) de gravité dans notre simulation est de 0,5.

Illustration

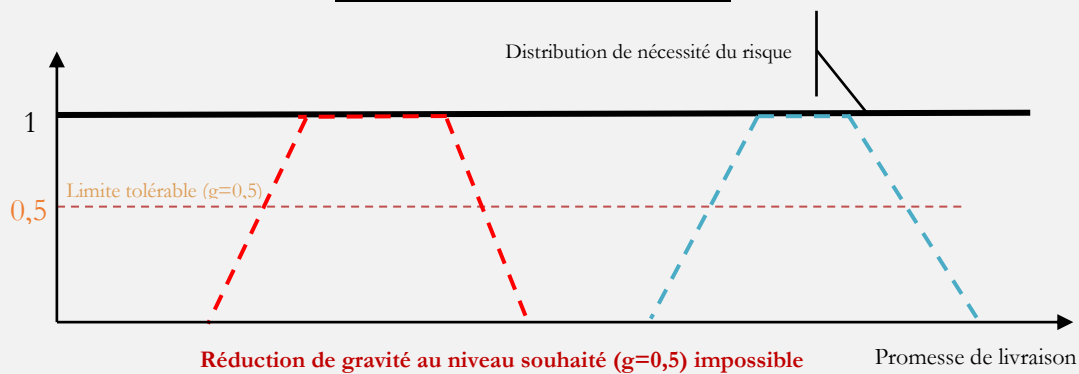
Cas 1



Cas 2



Cas 3



En fonction des 3 cas, plusieurs stratégies sont possibles pour choisir la quantité de la promesse de livraison en vue de réduire la gravité du risque de replanification. L'algorithme ci-dessous représente une stratégie que nous avons implémentée pour l'expérimentation.

Soient :

- ✓ R est la distribution de possibilité des réceptions cumulées
- ✓ D est la distribution de possibilité des demandes cumulées
- ✓ X est la promesse cumulée jusqu'à une période t
- ✓ $X \mapsto N(a, b, c, d, x)$ est la nécessité N du risque de replanification en fonction de X. a, b, c, d étant les paramètres de la distribution.

- ✓ $\bar{S} = \{t / \text{impossible de réduire } N < g\}$, est l'ensemble de périodes t qui ont une courbe de nécessité de risque au-dessus du seuil g .
- ✓ n est la taille de l'horizon

-----Algorithme de lissage pour réduction de la gravité du risque K4 sous incertitudes -----

```

 $\bar{S} \leftarrow \{\}$  (initialise ensemble des éléments insolvable par ensemble vide)
for t in 0 : n
  c, d  $\leftarrow$  R("c", t), R("d", t)
  a, b  $\leftarrow$  D("a", t), D("b", t)
  if d < a: (cas 3)
    N_min  $\leftarrow$  1
  elif b <= c : (cas 1)
    N_min  $\leftarrow$  0
  else : (cas 2)
    x_min  $\leftarrow$  ((b-a)*c + b*(d-c))/(b-a+d-c)
    N_min  $\leftarrow$  l4n(a, b, c, d, x_min)
  if l4n_min >= g:
     $\bar{S} \leftarrow \bar{S} \cup \{t\}$  (ajout de t dans l'ensemble insolvable)
    Continue

x_1, x_2  $\leftarrow$  (g-coupe(N) = { x_1, x_2  $\in$  B |, N(x) = g}

X  $\leftarrow$  u * x_1 + (1 - u) * x_2 (u est paramétrable)
for i in insolvable : (pour assurer la cohérence de la promesse cumulée sur l'horizon n)
  x[i] = x[j] ( j est le premier indice j  $\geq$  i, tel que j n'est pas dans insolvable, si il existe,
  Sinon c'est le premier indice j  $\leq$  i qui vérifie la même condition)

-----Fin algo-----

```

Cet algorithme représente une stratégie à paramétrer par le décideur en fonction de son approche optimiste ou pessimiste vis-à-vis des incertitudes modélisées, à titre d'exemples :

- $u=1$: le décideur visera à mettre sa promesse sur le minimum de la demande à satisfaire permettant de réduire la gravité en dessous du seuil g .
- $u=0$: le décideur visera plutôt à promettre le maximum possible de ces ressources en fonction du seuil g .
- $u=1/2$: le décideur visera plutôt le milieu de la fourchette des promesses associées à une gravité inférieure au seuil toléré.

Dans notre cas nous simulons une approche pessimiste vis-à-vis la disponibilité des ressources ($u=1$).

4.4.3. Analyse des résultats

Nous comparons ici les résultats de deux simulations de deux stratégies (respectivement sans et avec l'outil d'aide à la décision) :

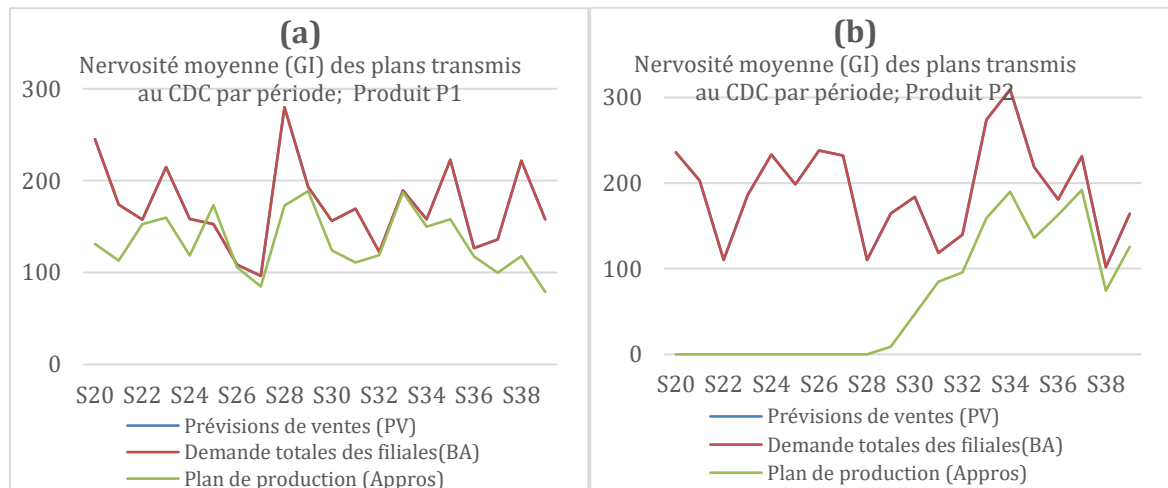
- S1 : la stratégie de planification déterministe de l'émulateur ERP/DRP (cf. §4.3.2).
- S2 : l'intégration des incertitudes et l'application de la stratégie de traitement du risque de réduction de la gravité du risque dans les promesses issues du ERP/DRP (cf. §4.3.2).

Nous avons exécuté ces simulations en horizon glissant sur 40 cycles de replanification afin de disposer d'un historique suffisant pour l'analyse de la nervosité des plans à horizon de 20 semaines.

À partir de l'historique de replanification généré lors des deux simulations à horizon glissant, nous analysons la performance des promesses de livraison suivantes :

- ✓ Satisfaction : exprimée par le taux de service du CDC (TS), soit le rapport entre le total expédié et la demande totale des filiales.
- ✓ Nervosité : évaluée par la mesure de nervosité globale (**GI**) (cf chapitre I. §5.2.2) des promesses, orientée quantité, représentant l'écart moyen de variation d'une quantité planifiée entre deux cycles successifs c pour une même période t . $GI = \frac{\sum_{t=n}^{2n-1} \sum_{c=2}^n |Q_{ct} - Q_{(c-1)t}|}{n*(n-1)}$, n est la taille d'horizon. Nous utilisons également une mesure complémentaire orientée sur le nombre moyen de reconfigurations (**C**) des promesses sur l'horizon glissant.
- ✓ Faisabilité : taux de rupture (**TR**) mesuré par le rapport l'indisponibilité (l'écart entre la demande et la livraison) et la demande,
- ✓ Fiabilité : évaluée par la mesure de nervosité locale (**LI**) mesurant l'écart moyen des promesses planifiées sur l'horizon glissant par rapport l'exécuté d'une période donnée $LI^c = \frac{\sum_{c=n}^{2n-1} \sum_{t=c}^{c+n-1} |Q_{cc} - Q_{(c-t)c}|}{n*(n-1)}$; $\forall c \geq n$ (cf chapitre I. §5.2.2).

Nous présentons ci-dessous (figure 70) une analyse de la nervosité par période (nervosité entre les cycles de replanification) des plans des filiales (prévisions de ventes, demandes transmises au CDC) et de l'usine (plan de production transmis au CDC) sur l'horizon glissant. Les deux simulations (S1, S2) sont basées sur les mêmes prévisions de ventes historiques et le même dimensionnement des ressources (stocks initiaux, capacité de l'usine, stocks objectifs).



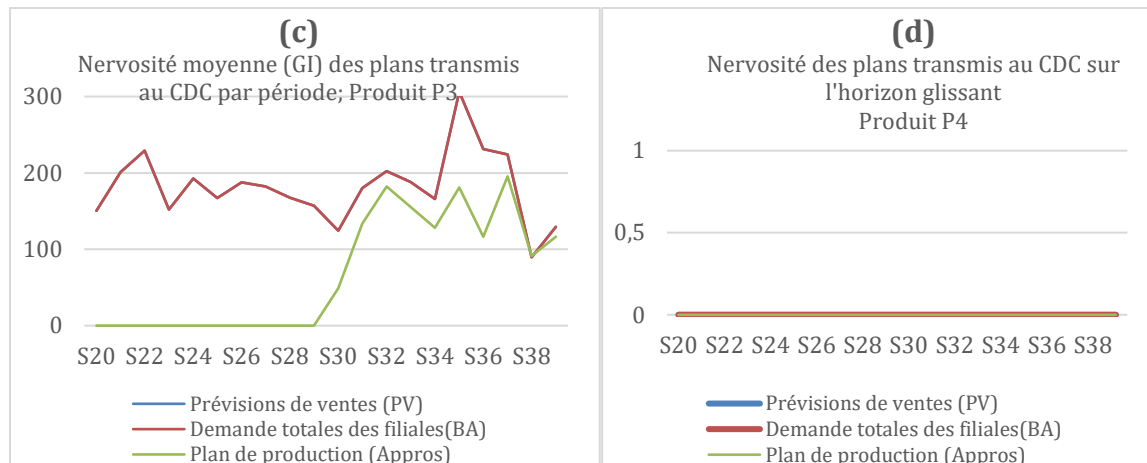


Figure 70. Étude de la nervosité des plans pour la stratégie S1, par produit: (a) P1, (b) P2, (c) P3

Nous constatons que la nervosité s'est propagée à travers la chaîne logistique mais en se réduisant. Ainsi, dans notre simulation, nous n'avons pas produit l'effet bullwhip en raison de l'absorption de cet effet par les stocks des centres de distribution le long de la SC. Aussi, les systèmes de planification permettent de réduire cet effet grâce à la coordination mensuelle et hebdomadaire entre les différents acteurs de la chaîne que nous avons pu reproduire dans l'émulateur ERP/DRP.

Les graphiques ci-dessous (figure 71) retracent l'historique de l'évaluation de la criticité des plans de livraison à l'issue du DRP (graphique de gauche) et les résultats de l'application de la stratégie de lissage pour réduction de la gravité (graphique de droite) sur ces mêmes plans au cours d'un horizon glissant de 40 semaines.

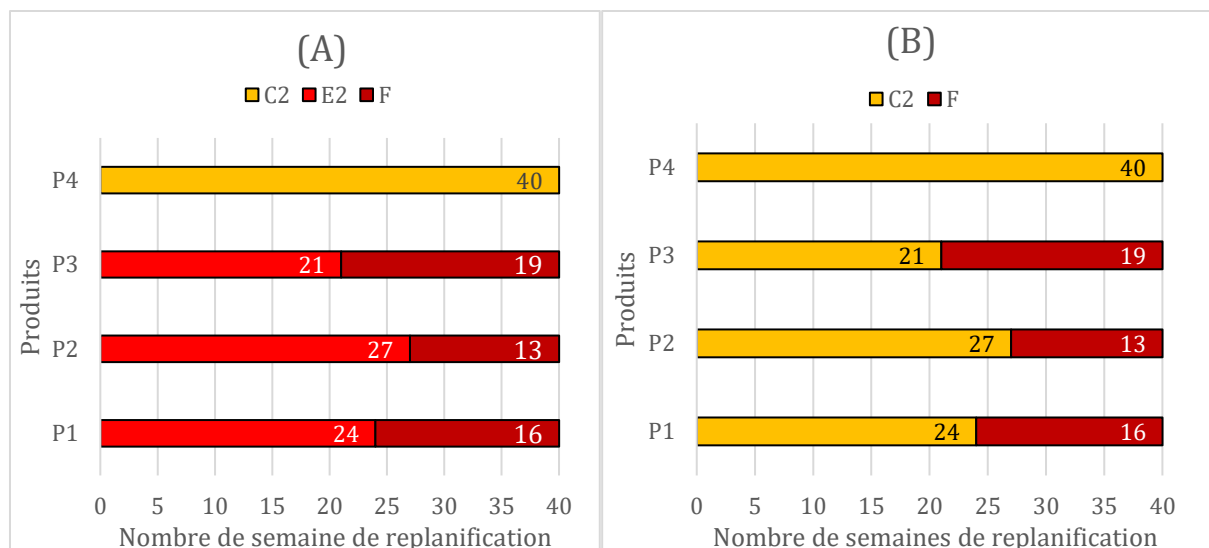
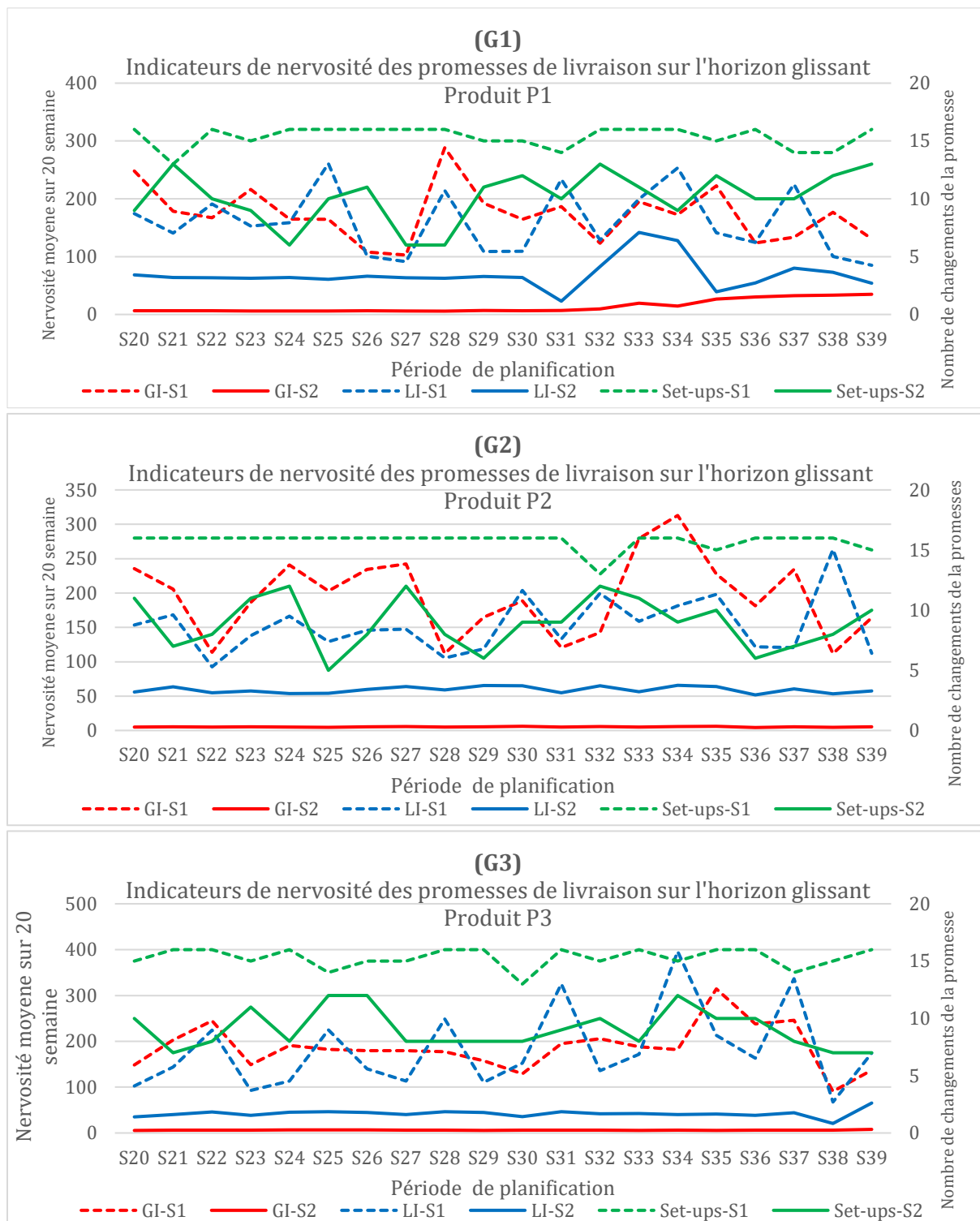


Figure 71. (A) Résultats d'évaluation de criticité des plans de livraison issus du DRP avant traitement de risque au début des semaines de replanification. (B) Résultats d'évaluation de criticité des plans de livraisons après le traitement du risque.

Pour chacun des produits, la stratégie de lissage sous incertitudes appliquée a permis de réduire la criticité des plans identifiés comme adaptables à partir du DRP (appartenant à la classe E2). Les plans non adaptables (appartenant à la classe F) n'ont pas été améliorés car ils nécessitent une

modification de la quantité totale programmée à l'horizon. Les plans dont le niveau de gravité est inférieur à la limite tolérée n'ont pas été modifiés (produit P4).

Dans ce qui suit, nous représentons les résultats de l'analyse des performances (stabilité, satisfaction, faisabilité et fiabilité) pour chacun des produits.



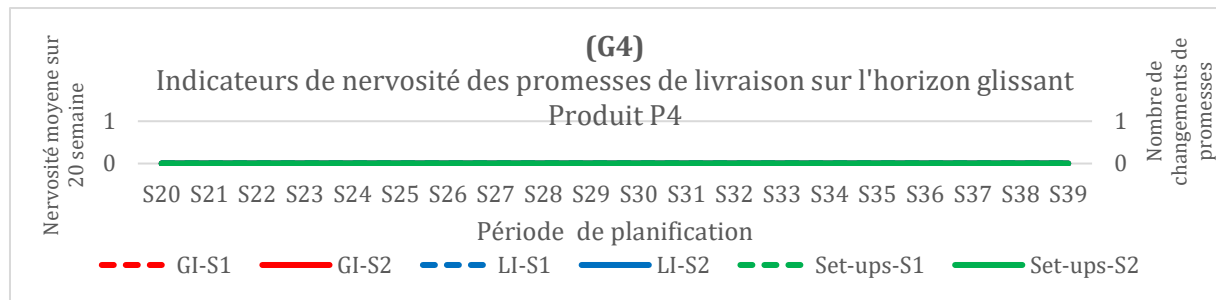


Figure 72. Résultats comparaison des 2 stratégies en termes de stabilité et de fiabilité pour les 4 produits : (G1) P1, (G2) P2, (G3) P3, (G4) P4

	P1					P2				
	TS	GI	C	LI	TR	TS	GI	C	LI	TR
S1	90,8%	173	15	160	8,8%	88,56%	195	16	153	11,02%
S2	96,15%	14	10	69	2,92%	99,03%	5	9	59	1%
	P3					P4				
	TS	GI	C	LI	TR	TS	GI	C	LI	TR
S1	81,48%	187	15	183	11,02%	100%	0	0	0	0%
S2	98,96%	6	9	42	1,04%	100%	0	0	0	0%

Tableau 12. Récapitulatif des indicateurs agrégés (moyennes) de performance des promesses de livraison, par produit, sur l'horizon glissant pour les stratégies S1 (sans modélisation incertitude) et S2 (avec réduction de gravité)

Dans les graphiques (G1, G2, G3, G4) de la figure 72, l'application de la stratégie de traitement du risque en horizon glissant a permis de diminuer significativement tous les indicateurs de mesure de la nervosité (globale, locale et le nombre de changements) pour tous les produits sans impacter la stabilité optimale ($=0$) du produit P4.

Dans le tableau 12, la stratégie S2 a permis d'améliorer les performances globales des promesses de livraison sur l'ensemble de l'horizon glissant par rapport aux performances des promesses découlant de l'application du processus de planification déterministe (S1), pour tous les produits. L'amélioration est très significative sur les mesures de nervosité et significative sur le taux de service.

Ainsi, dans cet exemple, nous avons pu démontrer le potentiel de l'approche de gestion des risques en utilisant une stratégie de réduction de la gravité du risque en combinaison avec une stratégie d'horizon figé. En revanche, nous avons adopté une stratégie pessimiste qui se rapproche de la demande minimale (cf. algorithme §4.4.2) pour la réduction d'une mesure de gravité importante. Ce niveau de performance obtenu dans cet exemple peut ne pas être assuré sous notre stratégie

lorsque les demandes des filiales reçues sont plus proches du maximum possible que du minimum. En effet, dans cet exemple, nous avons simulé une stratégie identique sur tous les plans sur l'horizon glissant. Cependant, le décideur peut faire mieux, il peut agir en fonction de la tendance observée de la demande reçue par rapport aux incertitudes modélisées. De même, pour les plans non adaptables, le décideur peut évaluer la possibilité d'augmenter la quantité totale planifiée en fonction de l'incertitude sur les plans reçus de l'usine. Sinon, il peut recourir à la négociation avec son fournisseur (ici l'usine) ou ses clients en fonction de la source de contrainte imposée. Une amélioration supplémentaire des plans évalués peut être assurée par l'application d'autres stratégies visant à agir sur le reste des dimensions de la criticité des plans (robustesse, fréquence, adaptabilité), ou un mélange de différentes stratégies en fonction de la spécificité du résultat de l'évaluation de chaque plan par produit.

D'autre part, ces stratégies visent à éviter la survenue de rupture. L'application de la stratégie n'est pas recommandée en cas de pénurie au sein du CDC. Dans ce cas, l'effort du décideur sera plus orienté vers la gestion des priorités de livraison et la coordination entre les acteurs de la SC que vers la prévention.

De plus, ici nous nous sommes concentrés sur la gestion des risques dans les plans de livraison par produit du CDC, l'allocation de ces plans aux différents clients en tenant compte des incertitudes de la demande de chacun n'était pas automatisée dans cette expérience. Le plan de livraison total généré sous incertitudes était réparti de manière équitable entre les clients au prorata de la demande reçue à la date de planification. Le développement d'un algorithme d'allocation de la promesse totale en tenant en compte les incertitudes de la demande de chacun des clients est une perspective de ce travail. Surtout, dans le cadre de notre approche basée sur l'intégration des incertitudes dans les plans cumulés, une allocation automatique paramétrable par le décideur sera plus appropriée.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la chaîne logistique de l'entreprise Pierre Fabre dermo-cosmétique et nous avons analysé son processus de planification à horizon glissant. En effet, nous avons abordé la complexité de cette SC internationale multi-acteurs et la complexité de ses flux de produits dermo-cosmétiques et de la gestion de ses clients internes délocalisés à l'international (les Centres de Distribution Locaux). Nous avons distingué deux types de processus de planification à horizon glissant. Un processus mensuel représente un processus de coordination qui vise à adapter le dimensionnement de la SC et à synchroniser les flux au début de chaque mois. Un processus hebdomadaire est plutôt un processus asynchrone qui permet à chaque décideur, indépendamment du reste de la chaîne, de réviser ses plans tactiques en tenant compte des derniers plans transmis par les autres acteurs de la SC au cours du cycle précédent.

Ensuite, nous avons présenté la structure de l'outil de replanification, les services intégrés de coordination entre acteurs et d'aide à la décision sous l'incertitude du planificateur central de distribution. Nous avons également présenté les interfaces de l'outil en montrant les résultats de l'illustration réalisée au chapitre IV et nous avons détaillé ces caractéristiques du point de vue de l'utilisateur à la fin de cette démonstration.

Puis nous avons présenté un Serious Game élaboré afin de reproduire le contexte industriel présenté à petite échelle et aussi de reproduire la dynamique des processus modélisés mensuellement et hebdomadairement. Le système ERP/DRP de cette SC est émulé dans le Serious Game selon un algorithme de planification avancé d'un expert pour le lissage des plans et l'allocation équitable des ressources entre les différents acteurs de la SC.

Un scénario a été construit autour de ce contexte émulé afin de mener une expérience d'utilisation des indicateurs d'évaluation du risque à horizon glissant. Pour ce faire, une stratégie de traitement du risque visant à réduire la gravité du risque de replanification a été adoptée chaque semaine sur les données issues des calculs ERP/DRP.

Une comparaison a été effectuée entre la performance des promesses de livraison de la CDC dans les deux cas :

- Sans incertitudes avec l'émulateur ERP/DRP.
- Dans le cas où ces mêmes décisions sont évaluées et traitées selon une stratégie de réduction de la gravité à chaque cycle de replanification en tenant compte des incertitudes dans les demandes et les approvisionnements.

Les résultats de cette comparaison sur le scénario déroulé nous ont permis de montrer le potentiel de l'approche en termes d'amélioration des performances des promesses de livraison (stabilité, satisfaction, faisabilité et fiabilité). Les limites de l'application concernant l'efficacité mesurée de cette stratégie ont été détaillées. Elles concernent principalement le contexte d'application et la dynamique des plans transmis sur l'horizon glissant. Par ailleurs, des perspectives à court terme à intégrer dans l'expérimentation ont été développées afin de tester d'autres stratégies de traitement du risque et de développer des stratégies paramétrables d'allocation de la promesse totale aux clients en tenant compte des incertitudes de la demande de chacun.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

‘ Research is an organized method for keeping you reasonably dissatisfied with what you have’
Charles Kattering

... Le focus ...

Dans cette thèse, nous avons abordé le problème industriel lié à la complexité des activités de replanification sous incertitude. Plus précisément, nous avons focalisé sur les incertitudes dues à la nervosité/instabilité des plans partagés par les acteurs de la SC sur l'horizon glissant dans le cadre du processus de planification tactique collaborative basé sur un échange de plans. Ainsi, la problématique de recherche de cette thèse est d'intégrer les incertitudes dans les plans transmis à un décideur afin de l'aider à les gérer dans un contexte dynamique multi-acteurs, multi-produits, multi-périodes, à horizon glissant.

... Résultats d'analyse des pratiques industrielles ...

Afin de répondre à cette problématique, nous avons d'abord analysé les pratiques de planification collaborative à horizon glissant et les limites de ces approches et des systèmes de planification actuels face aux incertitudes. En effet, dans un contexte collaboratif au sein d'une chaîne logistique multi-acteurs, le partage de l'information reste un véritable levier pour augmenter l'agilité de la SC face aux incertitudes et pour améliorer la performance globale de la chaîne. Cependant, dans un contexte de décision décentralisée, les acteurs restent réservés quant à ce partage. Dans ce contexte, les acteurs procèdent selon un partage minimal d'information basé principalement sur un échange périodique de plans. De plus, ces acteurs s'appuient sur des systèmes de planification (ERP/ DRP) pour mener le processus de planification. Ces systèmes sont basés sur des informations souvent imparfaites à une date donnée et visent à établir un plan à cette date. Ainsi, ces systèmes d'information présentent aujourd'hui de nombreuses limites en termes de gestion de l'incertitude pour la planification de la SC.

... Résultats d'analyse de l'État de l'art ...

Au sein de la communauté scientifique en Supply Chain Management, la planification sous incertitude était et est toujours un domaine de recherche en constante évolution. Cependant, l'analyse de la littérature a révélé le manque d'applications de la gestion des risques dans les problèmes de planification sous incertitude. De plus, les incertitudes considérées restent plus axées sur la demande mais rarement sur les approvisionnements et moins sur plusieurs sources d'incertitude simultanément. Par ailleurs, l'écart entre la recherche et les applications industrielles reste important en absence de prise en compte de la complexité des contextes industriels et le manque d'analyse de l'applicabilité des modèles théoriques. Cette analyse de la littérature nous a permis de poser les 4 questions de recherche de cette thèse qui concernent deux aspects. Le premier aspect concerne l'application de la gestion des risques pour aider à gérer la complexité des activités de replanification sous incertitude tout en capitalisant sur les connaissances de l'expert sur ces incertitudes. Le deuxième concerne l'applicabilité de l'approche d'aide à la

décision et son intégration avec les systèmes d'information existants dans un contexte dynamique.

... Réponse méthodologique à nos questions de recherche...

Afin de répondre à ces questions de recherche, nous avons appliqué un processus de gestion des risques dans un contexte multi-acteurs et multi-sources d'incertitude, au sein d'une chaîne logistique de distribution globale. Nous avons adopté une perspective de planificateur de distribution centrale pour la gestion des risques liés à ses promesses de livraison destinées aux autres entités de distribution en aval, et sous incertitude des demandes avales et des approvisionnements amonts de l'usine.

- Dans la phase de définition des risques, nous nous sommes concentrés sur les risques en termes de non-respect des contraintes impliquées par les plans transmis par les autres acteurs de la SC, tant du côté du client (satisfaction de la demande) que du côté du fournisseur (disponibilité des produits en stock).
- Ensuite, la phase d'analyse des risques porte sur la définition des mesures de risques et des critères d'analyse de leur criticité. Nous avons adopté ici une représentation des incertitudes basée sur les ensembles flous à partir des connaissances d'expert. Nous avons formalisé trois types de modèles qu'un expert peut fournir sur les plans cumulés des autres acteurs et nous avons proposé des mesures de risque (risque d'insatisfaction de la demande, risque de rupture, risque global de replanification) basées principalement sur des mesures de la théorie des possibilités (possibilité et nécessité). Nous avons proposé une agrégation de ces mesures sur différents niveaux (par période, par produit, par couple (produit*client)). Par produit, nous avons proposé une analyse quantitative des risques associés aux plans de livraison en termes de robustesse, de gravité du risque global induit, de fréquence et de leur potentiel d'adaptation face au risque. Nous avons considéré les cas où l'incertitude est exprimée uniquement par des intervalles comme un cas exceptionnel d'ensembles flous, des mesures spécifiques ont également été introduites pour évaluer la distance aux bornes des intervalles selon deux combinaisons pessimistes et optimistes de scénarios de demande et de réception.
- Pour l'évaluation de la criticité des risques, nous avons adapté l'arbre des risques en fonction des indicateurs agrégés pour la classification des plans de livraison par produit dans une matrice de risques.
- Au niveau du traitement du risque, nous avons proposé un ensemble de stratégies de révision des plans qui peuvent être adaptées en fonction du résultat de l'évaluation.

... Concrétisation et étude de l'applicabilité et des apports de notre approche ...

L'intégrabilité et l'applicabilité de l'approche proposée ont été étudiées dans le cadre d'un cas industriel de l'entreprise Pierre Fabre Dermo-Cosmétique (PFDC) selon une approche "Serious Game" à petite échelle. La structure conceptuelle de l'outil d'aide à la décision proposé a été concrétisée par la mise en place d'une plateforme d'aide à la décision fournissant trois services principaux (base de données de planification, interfaces d'évaluation et de décision, plateforme de négociation). À partir de l'analyse des processus de planification tactique à horizon glissant de la chaîne de distribution internationale de PFDC, nous avons produit un émulateur ERP/DRP en dynamique. Pour l'expérimenter, nous avons simulé une stratégie de lissage pour

le traitement du risque visant à réduire la gravité du risque global dans les promesses de livraison émises par l'émulateur DRP sur l'horizon flexible en combinaison avec une stratégie d'horizon figé. Autour d'un scénario de connaissance expert dans une SC multi-acteurs à petite échelle, nous avons pu démontrer le potentiel de la stratégie simulée, par rapport à une approche déterministe de DRP, en vue d'améliorer la performance des promesses de livraison en termes de : stabilité, satisfaction client, faisabilité, fiabilité. Nous avons également pu vérifier que l'approche DRP/ERP permet de contrôler l'effet bullwhip dans la SC mais génère une nervosité importante des promesses de livraison pour la distribution centrale sous incertitude. Cependant, la stratégie émulée nous a permis de contenir cette nervosité de la promesse sur l'horizon glissant sans impacter la performance globale de cette promesse, voire en l'améliorant. Hormis les cas où la stratégie n'est pas recommandée, comme le cas de pénurie ou les cas où elle risque ne pas être efficace selon l'appétence au risque du décideur (optimiste-pessimiste). Par ailleurs, dans d'autres situations, le traitement du risque doit être basé sur des stratégies de traitement du risque autres que le traitement de sa gravité. Ainsi, d'avantages de tests de l'approches en se basant sur d'autres stratégies de traitement de risque est en perspective de ce travail.

... Bilan heuristique et perspectives...

Intégrer les incertitudes dans la planification est une opération complexe qui repose sur la qualité du modèle d'incertitudes intégré dans l'évaluation. Dans cette thèse, en absence de données suffisantes permettant des approches stochastiques, nous avons choisi d'utiliser les intervalles et les ensembles flous. Dans l'application de cette approche, nous avons mis en lumière la complexité de la prise en compte de la dynamique de la planification qui est la plupart du temps ignorée en planification sous incertitude. Toute la complexité d'aide à la décision réside dans la considération de la combinaison : système de planification, système d'aide à la décision sous incertitude, aptitude au risque du décideur, dynamique des modèles d'incertitude.

• Identification des risques

Une des perspectives de notre travail à court terme est d'adapter l'approche proposée d'évaluation des risques sous incertitudes pour aider les décideurs de chaque maillon de la SC (production, distribution locale). Au niveau de la production, les incertitudes à intégrer portent sur les quantités d'approvisionnement de matières premières et les besoins d'approvisionnement du CDC. Au niveau du Centre de Distribution Local, les incertitudes portent sur les prévisions de ventes et les plans de livraison du CDC.

De plus, grâce à la flexibilité offerte par l'utilisation des ensembles flous et de la théorie des possibilités, nous pouvons considérer d'autres risques et sources d'incertitude dans l'évaluation. Dans un contexte de partage d'information plus avancés, le décideur peut disposer d'une évaluation plus riche des risques. Outre les risques qui affectent sa performance interne (risque de rupture, risque de surstockage, risque de consommation de stock de sécurité, risque d'insatisfaction des clients...), il peut également évaluer les risques qui affectent la performance de ses clients suite à ses décisions de livraison (risque de rupture client, risque de surstockage client, risque de consommation de stock de sécurité...).

Par ailleurs, dans notre contexte, nous considérons un cas de production mono-site, il conviendrait d'étendre le test à un cas multi-fournisseurs.

- **Modélisation des incertitudes**

Si les systèmes avancés de prévision et de planification des ventes aident un décideur à prévoir une tendance de la demande et l'incertitude statistique qui l'entoure, ils ne considèrent pas l'impact du fonctionnement en horizon glissant sur la qualification des incertitudes. En observant une succession de prévisions sur un horizon glissant, les approches d'IA devraient permettre d'identifier et de modéliser cette dynamique, qui reflète à la fois la dynamique des incertitudes et le comportement des décideurs. La thèse de Walid Khellaf impliqué aussi dans le projet CAASC porte pour partie sur ce point. Un développement d'algorithmes de Machine Learning efficaces peut être assuré en intégrant les connaissances des planificateurs expérimentés pour mieux interpréter les causes spéciales dans l'historique des données afin de décider de les intégrer ou de les ignorer dans les algorithmes.

Dans le cadre du projet CAASC, la collecte de données industrielles de planification tactique à horizon glissant se poursuit afin de disposer d'un historique suffisant permettant son déploiement pour modéliser les incertitudes. L'enjeu est d'étudier la stabilité dans le temps des modèles d'incertitude voire converger sur des distributions de probabilité si l'historique est assez stable.

En ce qui concerne notre modélisation des incertitudes basée sur du dire d'expert, nous n'avons pas intégré dans les modèles d'incertitude d'information sur la saisonnalité ou le cycle de vie du produit (en lancement, en plénitude, en fin de vie). Ainsi, une adaptation du modèle peut être réalisée afin de détecter la date de planification en vue de personnaliser la dynamique du modèle dans les périodes concernées par l'effet de la saisonnalité ou les phases du cycle de vie.

Une perspective à court terme de cette étape, est de faire appel à un large panel de planificateurs du partenaire industriel (PFDC) pour modéliser leurs connaissances selon les modèles proposés pour la représentation des incertitudes des plans cumulés des autres acteurs dans la SC. L'enjeu étant de confronter leurs perspectives dans le cadre de l'application de l'approche proposée sur les données réelles collectées de PFDC.

- **Évaluation des risques**

Dans cette thèse, nous avons focalisé sur l'analyse et l'évaluation des risques associés aux promesses de livraison. En perspectives de cette étape, nous envisageons :

- de déployer la méthode sur d'autres situations de décision dans une chaîne logistique afin de limiter les effets de propagation des incertitudes dans la SC : la planification des besoins d'approvisionnements (qui remontent dans la chaîne), la gestion capacitaire au niveau d'une unité de production. .
- d'intégrer des coûts et des considérations financières dans l'évaluation des risques.
- de dérouler le Serious Game composé de l'émulateur ERP et de l'outil d'aide à la décision pour en faire un outil de formation.
- d'intégrer l'approche basée sur les ensembles flous et l'approche basé sur les intervalles. À partir des résultats de l'évaluation possibiliste, l'idée est que le décideur peut procéder à une alpha-coupe pour focaliser sur un intervalle donné afin d'étudier et appliquer sa stratégie de traitement de risques.

- **Traitement des risques**

La contribution principale de cette thèse est dans la phase d'évaluation des risques. Pour l'expérimentation, nous avons simulé un comportement d'un décideur qui vise à réduire la gravité du risque global de replanification en ne se basant que sur le lissage des plans d'approvisionnement. Il serait intéressant d'étudier d'autres stratégies ainsi que les conditions dans lesquelles elles sont plus pertinentes : orientées sur la robustesse, sur la fréquence des risques, sur l'adaptabilité. L'idée est de définir des algorithmes appropriés pour faciliter la prise de décisions du décideur en se basant toujours sur des données cumulées.

REFERENCES

-
- Aiken, Michael, et Jerald Hage. 1968. « Organizational Interdependence and Intra-Organizational Structure ». *American Sociological Review* 33 (6). [American Sociological Association, Sage Publications, Inc.]: 912-930. doi:10.2307/2092683.
- Akbadian-Saravi, N., M. Mobini, et M. Rabbani. 2020. « Development of a Comprehensive Decision Support Tool for Strategic and Tactical Planning of a Sustainable Bioethanol Supply Chain: Real Case Study, Discussions and Policy Implications ». *Journal of Cleaner Production* 244. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118871.
- Alabdulkarim, A.A. 2020. « Minimizing the Bullwhip Effect in a Supply Chain: A Simulation Approach Using the Beer Game ». *Simulation* 96 (9): 737-752. doi:10.1177/0037549720930284.
- Almeida, J.F.F., S.V. Conceição, L.R. Pinto, B.R.P. Oliveira, et L.F. Rodrigues. 2021. « Optimal sales and operations planning for integrated steel industries ». *Annals of Operations Research*. doi:10.1007/s10479-020-03928-7.
- Amrani, A. 2009. « Impact Des Contrats d'approvisionnement Sur La Performance de La Chaîne Logistique : Modélisation et Simulation ». *Undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-des-contrats-d%27approvisionnement-sur-la-de-%3A-Amrani/e8a70a0cb12112e318b7bde95fb1d13a2e24434c>.
- Anand, A., A. Mishra, S.K. Garg, et R. Wattal. 2021. « Vendor Managed Inventory: Issues and Challenges in a Single Vendor Multiple Retailer Supply Chain ». *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 955-968. doi:10.1007/978-981-15-9678-0_80.
- Andres, B., R. Poler, et R. Sanchis. 2021. « A Data Model for Collaborative Manufacturing Environments ». *Computers in Industry* 126. doi:10.1016/j.compind.2021.103398.
- « APICS Dictionary, 16th Edition ». 2021. Consulté le septembre 30. <https://www.ascm.org/apics-dictionary-16th-edition/>.
- Atadeniz, Sukran N., et Sri V. Sridharan. 2020. « Effectiveness of nervousness reduction policies when capacity is constrained ». *International Journal of Production Research* 58 (13). Taylor & Francis: 4121-4137. doi:10.1080/00207543.2019.1643513.
- Attia, A.M. 2021. « A multi-objective robust optimization model for upstream hydrocarbon supply chain ». *Alexandria Engineering Journal* 60 (6): 5115-5127. doi:10.1016/j.aej.2021.03.046.
- Auh, Seigyoung, et Bulent Menguc. 2007. « Performance Implications of the Direct and Moderating Effects of Centralization and Formalization on Customer Orientation ». *Industrial Marketing Management* 36 (8): 1022-1034. doi:10.1016/j.indmarman.2006.02.010.
- Baalsrud Hauge, Jannicke, Prabahan Basu, Fatima Sundus, Anindya Chowdhury, et Artem Schurig. 2022. « Design of a Mixed Reality Game for Exploring How IoT Technologies Can Support the Decision Making Process ». In *Online Engineering and Society 4.0*, édité par Michael E. Auer, Kalyan Ram Bhimavaram, et Xiao-Guang Yue, 281-288. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-82529-4_27.

- Baležentis, T., et D. Streimikiene. 2017. « Multi-Criteria Ranking of Energy Generation Scenarios with Monte Carlo Simulation ». *Applied Energy* 185: 862-871. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.085.
- Baryannis, George, Sahar Validi, Samir Dani, et Grigoris Antoniou. 2019. « Supply Chain Risk Management and Artificial Intelligence: State of the Art and Future Research Directions ». *International Journal of Production Research* 57 (7): 2179-2202. doi:10.1080/00207543.2018.1530476.
- Belgaum, M.R., Z. Alansari, S. Musa, M.M. Alam, et M.S. Mazliham. 2021. « Role of Artificial Intelligence in Cloud Computing, IoT and SDN: Reliability and Scalability Issues ». *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 11 (5): 4458-4470. doi:10.11591/ijece.v11i5.pp4458-4470.
- Bellman, R. E., et L. A. Zadeh. 1970. « Decision-Making in a Fuzzy Environment ». *Management Science* 17 (4). INFORMS: B-141. doi:10.1287/mnsc.17.4.B141.
- Ben Ammar, Oussama. 2014. « Planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour les systèmes d'assemblage à plusieurs niveaux ». Thesis, Saint-Etienne, EMSE. <http://www.theses.fr/2014EMSE0756>.
- Birge, John R., et François Louveaux. 2011. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer Science & Business Media.
- Bittante, A., F. Pettersson, et H. Saxén. 2018. « Optimization of a Small-Scale LNG Supply Chain ». *Energy* 148 (avril): 79-89. doi:10.1016/j.energy.2018.01.120.
- Blackburn, Joseph D., Dean H. Kropp, et Robert A. Millen. 1986. « A Comparison of Strategies to Dampen Nervousness in MRP Systems ». *Management Science* 32 (4): 413-429. doi:10.1287/mnsc.32.4.413.
- Bogataj, David, et Marija Bogataj. 2007. « Measuring the supply chain risk and vulnerability in frequency space. International Journal of Production Economics ». *International Journal of Production Economics* 108 (février): 291-301. doi:10.1016/j.ijpe.2006.12.017.
- Bouchon-Meunier, Bernadette. 2007. « Raisonnement en logique floue ». *Que sais-je ?* 4e éd. (2702): 75-96. https://www.cairn.info/feuilleter.php?ID_ARTICLE=PUF_BOUCH_2007_01_0075.
- Bouchon-Meunier, Bernadette, Ronald R. Yager, et Lotfi Asker Zadeh. 1995. *Fuzzy Logic and Soft Computing*. World Scientific.
- Bredström, D., P. Flisberg, et M. Rönnqvist. 2013. « A New Method for Robustness in Rolling Horizon Planning ». *International Journal of Production Economics* 143 (1): 41-52. doi:10.1016/j.ijpe.2011.02.008.
- Cachon, Gérard P., Taylor Randall, et Glen M. Schmidt. 2007. « In Search of the Bullwhip Effect ». *Manufacturing & Service Operations Management*, octobre. INFORMS. <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/msom.1060.0149>.
- Campuzano-Bolarín, Francisco, Josefa Mula, Manuel Díaz-Madroñero, et Álgar-Ginés Legaz-Aparicio. 2020. « A rolling horizon simulation approach for managing demand with lead time variability ». *International Journal of Production Research* 58 (12). Taylor & Francis: 3800-3820. doi:10.1080/00207543.2019.1634849.
- Cannella, S, A P Barbosa-Póvoa, J M Framinan, et S Relvas. 2013. « Metrics for Bullwhip Effect Analysis ». *Journal of the Operational Research Society* 64 (1): 1-16. doi:10.1057/jors.2011.139.
- Carvalho Fagundes, Marcus Vinicius, Eduardo Oliveira Teles, Silvio A. B. Vieira de Melo, et Francisco Gaudencio Mendonca Freires. 2020. « Supply Chain Risk Management

- Modelling: A Systematic Literature Network Analysis Review ». *Ima Journal of Management Mathematics* 31 (4). Oxford: Oxford Univ Press: 387-416. doi:10.1093/imaman/dpaa019.
- Chapdaniel, Alain. 2010. *Supply chain : management et dynamique d'évolution / Alain Chapdaniel*. Management et informatique. Hermès science publications-Lavoisier. Paris. <https://library.kedge.edu/Default/doc/SYRACUSE/68555/supply-chain-management-et-dynamique-d-evolution-alain-chapdaniel>.
- Chapman et Clive. 2007. *Introduction to Materials Management*. Pearson India.
- Chaudhuri, Atanu, Abhijeet Ghadge, Barbara Gaudenzi, et Samir Dani. 2020. « A Conceptual Framework for Improving Effectiveness of Risk Management in Supply Networks ». *International Journal of Logistics Management* 31 (1). Bingley: Emerald Group Publishing Ltd: 77-98. doi:10.1108/IJLM-11-2018-0289.
- Chen, Enbo, Wael M. Mohammed, Borja Ramis Ferrer, et Jose L. Martinez Lastra. 2017. « Development of a mobile application for the C2NET supply chain cloud-based platform ». In *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 720-724. doi:10.1109/INDIN.2017.8104861.
- Cheraghalikhani, Ali, Farid Khoshalhan, et Hadi Mokhtari. 2019. « Aggregate production planning: A literature review and future research directions ». *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 309-330. doi:10.5267/j.ijiec.2018.6.002.
- Chopra, Sunil. 2019. *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Seventh edition. New York, NY: Pearson Education.
- Christopher, Martin. 2005. *Logistics and Supply Chain Management: Creating Value-Adding Networks*. Pearson Education.
- Cohen, Morris A., et Panos Kouvelis. 2021. « Revisit of AAA Excellence of Global Value Chains: Robustness, Resilience, and Realignment ». *Production and Operations Management* 30 (3): 633-643. doi:10.1111/poms.13305.
- Colicchia, Claudia, et Fernanda Strozzi. 2012. « Supply chain risk management: A new methodology for a systematic literature review ». *Supply Chain Management: An International Journal* 17 (juin): 403-418. doi:10.1108/13598541211246558.
- Damand, David, Ridha Derrouiche, et Marc Barth. 2013. « Parameterisation of the MRP method: automatic identification and extraction of properties ». *International Journal of Production Research* 51 (18): 5658-5669. doi:10.1080/00207543.2013.810819.
- David, F., H. Pierreval, et C. Caux. 2006. « Advanced planning and scheduling systems in aluminium conversion industry ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 19 (7). Taylor & Francis: 705-715. doi:10.1080/09511920500504545.
- De Leeuw, S., M.C. Schippers, et S.J. Hoogervorst. 2015. « The Fresh Connection: Cross-Functional Integration in Supply Chain Management ». In *The Handbook of Behavioral Operations Management: Social and Psychological Dynamics in Production and Service Settings*. doi:10.1093/acprof:oso/9780199357215.003.0017.
- Demirel, Edil, Ertunga C. Özelkan, et Churlzu Lim. 2018. « Aggregate Planning with Flexibility Requirements Profile ». *International Journal of Production Economics* 202 (août): 45-58. doi:10.1016/j.ijpe.2018.05.001.
- Desport, Pierre. 2017. « Planification tactique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée : modélisation, résolution, évaluation ». These de doctorat, Angers. <https://www.theses.fr/2017ANGE0012>.

- Di Mauro, Carmela, Alessandro Ancarani, Florian Schupp, et Giulia Crocco. 2020. « Risk Aversion in the Supply Chain: Evidence from Replenishment Decisions ». *Journal of Purchasing and Supply Management* 26 (4): 100646. doi:10.1016/j.pursup.2020.100646.
- Díaz-Madroño, Manuel, Josefa Mula, Mariano Jiménez, et David Peidro. 2017. « A Rolling Horizon Approach for Material Requirement Planning under Fuzzy Lead Times ». *International Journal of Production Research* 55 (8): 2197-2211. doi:10.1080/00207543.2016.1223382.
- Dolgui, Alexandre, Oussama Ben-Ammar, Faicel Hnaien, et Mohamed Louly. 2013. « A State of the Art on Supply Planning and Inventory Control under Lead Time Uncertainty ». *Studies in Informatics and Control* 22 (septembre): 255-268. doi:10.24846/v22i3y201302.
- Dolgui, Alexandre, Dmitry Ivanov, et Boris Sokolov. 2017. « Ripple Effect in the Supply Chain: An Analysis and Recent Literature ». *International Journal of Production Research*, octobre. Taylor & Francis. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2017.1387680>.
- Dolgui, Alexandre, et Caroline Prodhon. 2007a. « Supply Planning under Uncertainties in MRP Environments: A State of the Art ». *Annual Reviews in Control* 31 (2): 269-279. doi:10.1016/j.arcontrol.2007.02.007.
- Dolgui, Alexandre, et Caroline Prodhon. 2007b. « Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art ». *Annual Reviews in Control* 31 (2): 269-279. doi:10.1016/j.arcontrol.2007.02.007.
- Drexel, A., et A. Kimms. 1997. « Lot sizing and scheduling — Survey and extensions ». *European Journal of Operational Research* 99 (2): 221-235. doi:10.1016/S0377-2217(97)00030-1.
- Dubois, Didier, Helene Fargier, et Philippe Fortemps. 2003. « Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge ». *European Journal of Operational Research*, Fuzzy Sets in Scheduling and Planning, 147 (2): 231-252. doi:10.1016/S0377-2217(02)00558-1.
- Dubois, Didier, Siegfried Gottwald, Petr Hajek, Janusz Kacprzyk, et Henri Prade. 2005. « Terminological Difficulties in Fuzzy Set Theory—The Case of “Intuitionistic Fuzzy Sets” ». *Fuzzy Sets and Systems*, 40th Anniversary of Fuzzy Sets, 156 (3): 485-491. doi:10.1016/j.fss.2005.06.001.
- Dubois, Didier, Henri Prade, et Fayçal Touazi. 2013. « A Possibilistic Logic Approach to Conditional Preference Queries ». In *Flexible Query Answering Systems*, édité par Henrik Legind Larsen, Maria J. Martin-Bautista, María Amparo Vila, Troels Andreasen, et Henning Christiansen, 8132:376-388. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-40769-7_33.
- Dudek, Gregor, et Hartmut Stadtler. 2006. « Negotiation-Based Collaborative Planning in Divergent Two-Tier Supply Chains ». *International Journal of Production Research*, décembre. Taylor & Francis Group. doi:10.1080/00207540600584821.
- Ekanayake, E.M.A.C., G.Q.P. Shen, M.M. Kumaraswamy Masce, E.K. Owusu Ph.d., et A.B. Saka. 2021. « Modeling Supply Chain Resilience in Industrialized Construction: A Hong Kong Case ». *Journal of Construction Engineering and Management* 147 (11). doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002188.
- Ellis, Scott C., Raymond M. Henry, et Jeff Shockley. 2010. « Buyer Perceptions of Supply Disruption Risk: A Behavioral View and Empirical Assessment ». *Journal of Operations Management* 28 (1): 34-46. doi:10.1016/j.jom.2009.07.002.

- Elluru, Sahitya, Hardik Gupta, Harpreet Kaur, et Surya Prakash Singh. 2019. « Proactive and Reactive Models for Disaster Resilient Supply Chain ». *Annals of Operations Research* 283 (1-2): 199-224. doi:10.1007/s10479-017-2681-2.
- El-Shayeb, Yasser, Thierry Verdel, et Christophe Didier. 1999. « Fuzzy Reasoning for the analysis of risks in geotechnical engineering. Application to a French Case », octobre.
- Ernawati, D., E. Pudji, N. Rahmawati, et M. Alfin. 2021. « Bullwhip Effect Reduction Using Vendor Managed Inventory (VMI) Method in Supply Chain of Manufacturing Company ». In . Vol. 1899. doi:10.1088/1742-6596/1899/1/012082.
- Ertek, Gürdal, et Paul M. Griffin. 2002. « Supplier- and Buyer-Driven Channels in a Two-Stage Supply Chain ». *IIE Transactions* 34 (8): 691-700. doi:10.1023/A:1014920510164.
- Esteso, Ana, Josefa Mula, Francisco Campuzano-Bolarín, MME Alemany Diaz, et Angel Ortiz. 2019. « Simulation to reallocate supply to committed orders under shortage ». *International Journal of Production Research* 57 (5). Taylor & Francis: 1552-1570. doi:10.1080/00207543.2018.1493239.
- Fargier, Hélène, et Caroline Thierry. 2000. « The use of possibilistic decision theory in manufacturing planning and control: recent results in Fuzzy Master Production Scheduling ». In *Advances in Scheduling and Sequencing under fuzziness*, édité par R. Slowinski et M. Hapke, 45-59. Spingler-Verlag (series "Studies in Fuzinziness and Soft Computing).
- Ferreirinha, L., A.S. Santos, A.M. Madureira, M.L.R. Varela, et J.A. Bastos. 2020. « Decision Support Tool for Dynamic Scheduling ». *Advances in Intelligent Systems and Computing* 923: 418-427. doi:10.1007/978-3-030-14347-3_41.
- Fransoo, Jan C., et Marc J.F. Wouters. 2000. « Measuring the bullwhip effect in the supply chain ». *Supply Chain Management: An International Journal* 5 (2). MCB UP Ltd: 78-89. doi:10.1108/13598540010319993.
- Fu, Dongfei, Clara M. Ionescu, El-Houssaine Aghezzaf, et Robin De Keyser. 2014. « Decentralized and Centralized Model Predictive Control to Reduce the Bullwhip Effect in Supply Chain Management ». *Computers & Industrial Engineering* 73 (juillet): 21-31. doi:10.1016/j.cie.2014.04.003.
- Galasso, F., C. Mercé, et B. Grabot. 2009. « Decision Support Framework for Supply Chain Planning with Flexible Demand ». *International Journal of Production Research* 47 (2): 455-478. doi:10.1080/00207540802426508.
- Galasso, F., et C. Thierry. 2009. « Design of Cooperative Processes in a Customer-Supplier Relationship: An Approach Based on Simulation and Decision Theory ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22 (6): 865-881. doi:10.1016/j.engappai.2008.10.008.
- Galasso, François. 2007. « Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible ». These de doctorat, Toulouse, INPT. <http://www.theses.fr/2007INPT003H>.
- Garcia-Neveu, Fabienne. 2020. « Le rôle des projets de systèmes d'information inter-organisationnels dans l'intégration et la collaboration de la supply chain : le cas des portails fournisseurs ». These de doctorat, Toulouse, INPT. <http://www.theses.fr/2020INPT0118>.
- Garg, H., et G. Kaur. 2020. « Quantifying Gesture Information in Brain Hemorrhage Patients Using Probabilistic Dual Hesitant Fuzzy Sets with Unknown Probability Information ». *Computers and Industrial Engineering* 140. doi:10.1016/j.cie.2019.106211.
- Gaudreault, J., C.-G. Quimper, P. Marier, M. Bouchard, F. Chéné, et J. Bouchard. 2017. « Designing a Generic Human-Machine Framework for Real-Time Supply Chain

- Planning». *Journal of Computational Design and Engineering* 4 (2): 69-85. doi:10.1016/j.jcde.2016.12.001.
- Genin, Patrick. 2003. « Planification tactique robuste avec usage d'un advanced planning system : Proposition d'un mode de gestion par plan de référence ». Thèse de doctorat, Paris, ENMP. <https://www.theses.fr/2003ENMP1216>.
- Genin, Patrick, Samir Lamouri, et Andre Thomas. 2007. « Improving the Robustness of a Supply Chain Tactical Plan ». *Supply Chain Forum: An International Journal* 8 (2): 24-35. doi:10.1080/16258312.2007.11517180.
- Ghasemy Yaghin, R., et Fateme Darvishi. 2021. « Integrated textile material and production management in a fuzzy environment: A logistics perspective ». *The Journal of The Textile Institute* 0 (0). Taylor & Francis: 1-21. doi:10.1080/00405000.2021.1929705.
- Gholamian, N., I. Mahdavi, et R. Tavakkoli-Moghaddam. 2016. « Multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty: fuzzy multi-objective optimisation ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (2): 149-165. doi:10.1080/0951192X.2014.1002811.
- Ghomi, V., D. Gligor, M. Parast, S. Shokoohyar, et M.G. Esfahani. 2021. « Antecedents and Consequences of Customer Flexibility: Establishing the Link to Firm Competitive Advantage ». *Journal of Retailing and Consumer Services* 62. doi:10.1016/j.jretconser.2021.102609.
- Giannoccaro, Ilaria. 2011. « Assessing the Influence of the Organization in the Supply Chain Management Using NK Simulation ». *International Journal of Production Economics*, Innsbruck 2008, 131 (1): 263-272. doi:10.1016/j.ijpe.2010.11.001.
- Giannoccaro, Ilaria. 2018. « Centralized vs. Decentralized Supply Chains: The Importance of Decision Maker's Cognitive Ability and Resistance to Change ». *Industrial Marketing Management* 73 (août): 59-69. doi:10.1016/j.indmarman.2018.01.034.
- Giannoccaro, Ilaria, et Pierpaolo Pontrandolfo. 2004. « Supply Chain Coordination by Revenue Sharing Contracts ». *International Journal of Production Economics*, Supply Chain Management, 89 (2): 131-139. doi:10.1016/S0925-5273(03)00047-1.
- Govindan, K. 2013. « Vendor-managed inventory: A review based on dimensions ». *International Journal of Production Research* 51 (13): 3808-3835. doi:10.1080/00207543.2012.751511.
- Grabot, Bernard, et Laurent Geneste. 1998. « Management of Imprecision and Uncertainty for Production Activity Control ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 9 (5): 431-446. doi:10.1023/A:1008892415960.
- Grabot, Bernard, Laurent Geneste, Gabriel Reynoso-Castillo, et Sophie Vérot. 2005. « Integration of Uncertain and Imprecise Orders in the MRP Method ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 16 (2): 215-234. doi:10.1007/s10845-004-5890-x.
- Guillaume, Romain. 2011. « Gestion des risques dans les chaînes logistiques : planification sous incertitude par la théorie des possibilités ». Thesis, Toulouse 2. <http://www.theses.fr/2011TOU20098>.
- Guillaume, Romain, Bernard Grabot, et Caroline Thierry. 2013. « Management of the Risk of Backorders in a MTO-ATO/MTS Context under Imperfect Requirements ». *Applied Mathematical Modelling* 37 (16-17): 8060-8078. doi:10.1016/j.apm.2013.03.019.
- Guillaume, Romain, Caroline Thierry, et Bernard Grabot. 2011. « Modelling of Ill-Known Requirements and Integration in Production Planning ». *Production Planning & Control* 22 (4): 336-352. doi:10.1080/09537281003800900.

- Guillaume, Romain, Caroline Thierry, et Paweł Zieliński. 2017. « Robust material requirement planning with cumulative demand under uncertainty ». *International Journal of Production Research* 55 (22). Taylor & Francis: 6824-6845. doi:10.1080/00207543.2017.1353157.
- Gurtu, Amulya, et Jestin Johny. 2021. « Supply Chain Risk Management: Literature Review ». *Risks* 9 (1). Basel: Mdpi: 16. doi:10.3390/risks9010016.
- Hashim, M., M. Nazam, M. Zia-Ur-Rehman, M. Abrar, S.A. Baig, M. Nazim, et Z. Hussain. 2021. « Modeling Supply Chain Sustainability-Related Risks and Vulnerability: Insights from the Textile Sector of Pakistan ». *Autex Research Journal*. doi:10.2478/aut-2021-0008.
- Hauge, Jannicke Baalsrud, Blanka Tundys, Andrzej Rzeczycki, et Theodore Lim. 2016. « DEPLOYING SERIOUS GAMES FOR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: LESSONS LEARNED AND GOOD PRACTICES », 18.
- Hauser, F., V. Pomponne, Z. Jiang, J. Lamothe, et F. Benaben. 2018. « Processes Orchestration for Preventing and Managing Shortages in a Supply Chain a Dermo-Cosmetics Use Case ». In , 2018-January:1227-1234. doi:10.1109/ICE.2017.8280020.
- Hawer, Sven, Alexander Schönmann, et Gunther Reinhart. 2018. « Guideline for the Classification and Modelling of Uncertainty and Fuzziness ». *Procedia CIRP*, 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 19-21 July 2017, Gulf of Naples, Italy, 67 (janvier): 52-57. doi:10.1016/j.procir.2017.12.175.
- Herrera, Carlos, Sana Belmokhtar-Berraf, André Thomas, et Víctor Parada. 2016a. « A reactive decision-making approach to reduce instability in a master production schedule ». *International Journal of Production Research* 54 (8). Taylor & Francis: 2394-2404. doi:10.1080/00207543.2015.1078516.
- Herrera, Carlos, Sana Belmokhtar-Berraf, André Thomas, et Víctor Parada. 2016b. « A Reactive Decision-Making Approach to Reduce Instability in a Master Production Schedule ». *International Journal of Production Research* 54 (8): 2394-2404. doi:10.1080/00207543.2015.1078516.
- Herrera, Carlos, et André Thomas. 2009. « Un modèle pour limiter la nervosité et l'instabilité du Programme Directeur de Production ». In *8ème Congrès International de Génie Industriel*. Bagnères de Bigorre, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00511865>.
- Hill, Craig A., G. Peter Zhang, et Keith E. Miller. 2018. « Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment & Firm Performance: An Empirical Evaluation ». *International Journal of Production Economics* 196 (février): 12-23. doi:10.1016/j.ijpe.2017.11.012.
- Ho, Chrwan-Jyh. 1989. « Evaluating the Impact of Operating Environments on MRP System Nervousness ». *International Journal of Production Research* 27 (7): 1115-1135. doi:10.1080/00207548908942611.
- Hollmann, R.L., L.F. Scavarda, et A.M.T. Thomé. 2015. « Collaborative planning, forecasting and replenishment: a literature review ». *International Journal of Productivity and Performance Management* 64 (7): 971-993. doi:10.1108/IJPPM-03-2014-0039.
- Huang, George Q., Jason S. K. Lau, et K. L. Mak. 2003. « The Impacts of Sharing Production Information on Supply Chain Dynamics: A Review of the Literature ». *International Journal of Production Research* 41 (7): 1483-1517. doi:10.1080/0020754031000069625.
- Huo, B., M. Gu, et Z. Wang. 2018. « Supply Chain Flexibility Concepts, Dimensions and Outcomes: An Organisational Capability Perspective ». *International Journal of Production Research* 56 (17): 5883-5903. doi:10.1080/00207543.2018.1456694.
- Igoulalene, Idris. 2014. « Développement d'une approche floue multicritère d'aide à la coordination des décideurs pour la résolution des problèmes de sélection dans les

- chaines logistiques ». These de doctorat, Aix-Marseille.
<http://www.theses.fr/2014AIXM4357>.
- Jabbarzadeh, Armin, Behnam Fahimnia, et Jiuh-Biing Sheu. 2017. « An Enhanced Robustness Approach for Managing Supply and Demand Uncertainties ». *International Journal of Production Economics*, SI:Flexible & Robust SCs, 183 (janvier): 620-631. doi:10.1016/j.ijpe.2015.06.009.
- Jamalnia, Aboozar, Jian-Bo Yang, Ardalan Feili, Dong-Ling Xu, et Gholamreza Jamali. 2019. « Aggregate Production Planning under Uncertainty: A Comprehensive Literature Survey and Future Research Directions ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102 (1-4): 159-181. doi:10.1007/s00170-018-3151-y.
- Jans, Raf, et Zeger Degraeve. 2008. « Modeling Industrial Lot Sizing Problems: A Review ». *International Journal of Production Research* 46 (6): 1619-1643. doi:10.1080/00207540600902262.
- Jiang, Meizhi, Jing Lu, Zhuohua Qu, et Zaili Yang. 2021. « Port Vulnerability Assessment from a Supply Chain Perspective ». *Ocean & Coastal Management* 213 (novembre): 105851. doi:10.1016/j.ocecoaman.2021.105851.
- Johnson, LA, et DC Montgomery. 1999. « operations research in production planning. » https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Johnson+Montgomery+1999%3A+operations+research+in+production+planning&btnG=.
- Jonsson, P., et J. Holmström. 2016. « Future of supply chain planning: closing the gaps between practice and promise ». *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 46 (1): 62-81. doi:10.1108/IJPDLM-05-2015-0137.
- Kaminsky, P., et Y. Wang. 2019. « Multi-Period Process Flexibility with Inventory ». *Flexible Services and Manufacturing Journal* 31 (4): 833-893. doi:10.1007/s10696-019-09342-x.
- Khalili-Damghani, K., et P. Ghasemi. 2016. « Uncertain centralized/decentralized production-distribution planning problem in multi-product supply chains: Fuzzy mathematical optimization approaches ». *Industrial Engineering and Management Systems* 15 (2): 156-172. doi:10.7232/iems.2016.15.2.156.
- Khellaf, Walid, Jacques Lamothe, et Romain Guillaume. 2020. « Exploration de données de planification pour la modélisation des incertitudes dues à l'horizon glissant ». In *MOSIM'20 - 13ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation*, 6 p. Agadir (on line), Morocco. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03027854>.
- Koh, S. C. L., S. M. Saad, et M. H. Jones. 2002. « Uncertainty under MRP-Planned Manufacture: Review and Categorization ». *International Journal of Production Research* 40 (10): 2399-2421. doi:10.1080/00207540210136487.
- Krajewski, L., J.C. Wei, et L.-L. Tang. 2005. « Responding to Schedule Changes in Build-to-Order Supply Chains ». *Journal of Operations Management* 23 (5): 452-469. doi:10.1016/j.jom.2004.10.006.
- Kristianto, Y. 2010. « Dynamic Price and Quantity Postponement Strategies ». *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management* 3 (4): 70-82. doi:10.4018/jisscm.2010100104.
- K.T, R., S.P. Sarmah, et P.K. Tarei. 2020. « An integrated framework for the assessment of inbound supply risk and prioritization of the risk drivers: A real-life case on electronics supply chain ». *Benchmarking* 27 (3): 1261-1286. doi:10.1108/BIJ-03-2019-0119.
- Kumar, Ramesh, L. Ganapathy, Ravindra Gokhale, et Manoj Kumar Tiwari. 2020. « Quantitative Approaches for the Integration of Production and Distribution Planning

- in the Supply Chain: A Systematic Literature Review ». *International Journal of Production Research* 58 (11): 3527-3553. doi:10.1080/00207543.2020.1762019.
- Laguna-Salvadó, L., M. Luras, U. Okongwu, et T. Comes. 2019. « A Multicriteria Master Planning DSS for a Sustainable Humanitarian Supply Chain ». *Annals of Operations Research* 283 (1-2): 1303-1343. doi:10.1007/s10479-018-2882-3.
- Lalmazloumian, Morteza, et Kuan Wong. 2012. « A review of modelling approaches for supply chain planning under uncertainty ». In , 197-203. doi:10.1109/ICSSSM.2012.6252220.
- Lameras, P., S. Arnab, S. de Freitas, P. Petridis, et I. Dunwell. 2021. « Science Teachers' Experiences of Inquiry-Based Learning through a Serious Game: A Phenomenographic Perspective ». *Smart Learning Environments* 8 (1). doi:10.1186/s40561-021-00152-z.
- Le Moigne, Rémy. 2017. *Supply chain management: Achat, production, logistique, transport, vente*.
- Lee, Hau L., et Corey Billington. 1993. « Material Management in Decentralized Supply Chains ». *Operations Research* 41 (5). INFORMS: 835-847. doi:10.1287/opre.41.5.835.
- Lee, Hau L, V Padmanabhan, et Seungjin Whang. 1997. « The Bullwhip Effect in Supply Chains ». *SLOAN MANAGEMENT REVIEW*, 12.
- Lelievre, Adrien. 2011. « Definition of a conceptual and methodological framework for designing a wished flexibility system », juillet.
- Li, Qinyun, et Stephen M. Disney. 2017. « Revisiting rescheduling: MRP nervousness and the bullwhip effect ». *International Journal of Production Research* 55 (7). Taylor & Francis: 1992-2012. doi:10.1080/00207543.2016.1261196.
- Liang, Tien-Fu. 2006. « Distribution Planning Decisions Using Interactive Fuzzy Multi-Objective Linear Programming ». *Fuzzy Sets and Systems* 157 (10): 1303-1316. doi:10.1016/j.fss.2006.01.014.
- Liang, Tien-Fu. 2011. « Application of Fuzzy Sets to Manufacturing/Distribution Planning Decisions in Supply Chains ». *Information Sciences* 181 (4): 842-854. doi:10.1016/j.ins.2010.10.019.
- Lima, C., S. Relvas, et A. Barbosa-Póvoa. 2021. « Designing and Planning the Downstream Oil Supply Chain under Uncertainty Using a Fuzzy Programming Approach ». *Computers and Chemical Engineering* 151. doi:10.1016/j.compchemeng.2021.107373.
- Lin, Zhiang, et Kathleen Carley. 1993. « Proactive or Reactive: An Analysis of the Effect of Agent Style on Organizational Decision-Making Performance ». *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management* 2 (4): 271-287. doi:10.1002/j.1099-1174.1993.tb00047.x.
- Lorentz, Harri, et Olli-Pekka Hilmola. 2012. « Confidence and supply chain disruptions: Insights into managerial decision-making from the perspective of policy ». Édité par Rajesh Singh et Ravi Shankar. *Journal of Modelling in Management* 7 (3). Emerald Group Publishing Limited: 328-356. doi:10.1108/17465661211283304.
- Lorenz, Edward. 2001. « Confiance interorganisationnelle, intermédiaires et communautés de pratique ». *Rezeaux* no 108 (4): 63-85. <https://www.cairn.info/revue-rezeaux1-2001-4-page-63.htm>.
- Mahmoudi, Jaouher, Jacques Lamothe, Caroline Thierry École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace (Toulouse / 1972-2007), École doctorale Systèmes (Toulouse), et Centre de recherche Génie industriel (Albi). 2006. « Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques: application au secteur de l'électronique et des télécommunications ». S.l.: [s.n.].

- Manavalan, E., et K. Jayakrishna. 2019. « A Review of Internet of Things (IoT) Embedded Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 Requirements ». *Computers & Industrial Engineering* 127 (janvier): 925-953. doi:10.1016/j.cie.2018.11.030.
- Marques, C.M., S. Moniz, J.P. de Sousa, A.P. Barbosa-Povoa, et G. Reklaitis. 2020. « Decision-Support Challenges in the Chemical-Pharmaceutical Industry: Findings and Future Research Directions ». *Computers and Chemical Engineering* 134. doi:10.1016/j.compchemeng.2019.106672.
- Marquès, Guillaume. 2010. « Management des risques pour l'aide à la gestion de la collaboration au sein d'une chaîne logistique : une approche par simulation ». These de doctorat, Toulouse, INPT. <https://www.theses.fr/2010INPT0139>.
- Martin, André J. 1992. *DRP: Distribution Resource Planning: The Gateway to True Quick Response and Continuous Replenishment*. John Wiley & Sons.
- Mei, Q., J. Li, E. Ursavas, S.X. Zhu, et X. Luo. 2021. « Freight Transportation Planning in Platform Service Supply Chain Considering Carbon Emissions ». *International Journal of Production Economics* 240. doi:10.1016/j.ijpe.2021.108241.
- Miceli, Antonio, Birgit Hagen, Maria Pia Riccardi, Francesco Sotti, et Davide Settembre-Blundo. 2021. « Thriving, Not Just Surviving in Changing Times: How Sustainability, Agility and Digitalization Intertwine with Organizational Resilience ». *Sustainability* 13 (4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 2052. doi:10.3390/su13042052.
- Mönch, Lars, Reha Uzsoy, et John W. Fowler. 2018. « A Survey of Semiconductor Supply Chain Models Part III: Master Planning, Production Planning, and Demand Fulfilment ». *International Journal of Production Research* 56 (13): 4565-4584. doi:10.1080/00207543.2017.1401234.
- Mula, J., M. Díaz-Madroñero, B. Andres, R. Poler, et R. Sanchis. 2021. « A Capacitated Lot-Sizing Model with Sequence-Dependent Setups, Parallel Machines and Bi-Part Injection Moulding ». *Applied Mathematical Modelling* 100: 805-820. doi:10.1016/j.apm.2021.07.028.
- Mula, J., R. Poler, et J. P. Garcia. 2006. « MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach ». *Fuzzy Sets and Systems* 157 (1): 74-97. doi:10.1016/j.fss.2005.05.045.
- Mula, J., R. Poler, J. P. Garcia-Sabater, et F. C. Lario. 2006. « Models for Production Planning under Uncertainty: A Review ». *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS*. RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS: ELSEVIER. doi:10.1016/j.ijpe.2005.09.001.
- Mula, J., R. Poler, J. P. García-Sabater, et F. C. Lario. 2006. « Models for production planning under uncertainty: A review ». *International Journal of Production Economics* 103 (1): 271-285. doi:10.1016/j.ijpe.2005.09.001.
- Mullen, J., L. Milechin, et D. Milechin. 2021. « Teaching and Learning HPC through Serious Games ». *Journal of Parallel and Distributed Computing* 158: 115-125. doi:10.1016/j.jpdc.2021.07.014.
- Mundi, Isabel, M. M. E. Alemany, Raúl Poler, et Vicente S. Fuertes-Miquel. 2019. « Review of mathematical models for production planning under uncertainty due to lack of homogeneity: proposal of a conceptual model ». *International Journal of Production Research* 57 (15-16). Taylor & Francis: 5239-5283. doi:10.1080/00207543.2019.1566665.
- Muratet, Mathieu, Patrice Torguet, Jean-Pierre Jessel, et Fabienne Viallet. 2009. « Towards a Serious Game to Help Students Learn Computer Programming ». *International Journal of Computer Games Technology* 2009 (janvier). doi:10.1155/2009/470590.

- Nguyen, Duy Tan, Yossiri Adulyasak, et Sylvain Landry. 2021. « Research Manuscript: The Bullwhip Effect in Rule-Based Supply Chain Planning Systems—A Case-Based Simulation at a Hard Goods Retailer ». *Omega* 98 (janvier): 102121. doi:10.1016/j.omega.2019.102121.
- Nonaka, Tomomi, Kentaro Miki, Ryo Odajima, et Hajime Mizuyama. 2016. « Analysis of Dynamic Decision Making Underpinning Supply Chain Resilience: A Serious Game Approach ». *IFAC-PapersOnLine*, 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016, 49 (19): 474-479. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.632.
- Oger, Raphaël. 2019. « A decision support system for long-term supply chain capacity planning : a model-driven engineering approach ». Theses, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03010406>.
- Ogier, Maxime, Felix T. S. Chan, Sai Ho Chung, Van-Dat Cung, et Julien Boissière. 2015. « Decentralised capacitated planning with minimal-information sharing in a 2-echelon supply chain ». *International Journal of Production Research* 53 (16). Taylor & Francis: 4927-4950. doi:10.1080/00207543.2015.1005763.
- Oliva, Rogelio, et Noel Watson. 2011. « Cross-Functional Alignment in Supply Chain Planning: A Case Study of Sales and Operations Planning ». *Journal of Operations Management*, Special Issue on Field Research in Operations and Supply Chain Management, 29 (5): 434-448. doi:10.1016/j.jom.2010.11.012.
- Paksoy, Turan, Cigdem Gonul Kochan, et Sadia Samar Ali. 2020. *Logistics 4.0: Digital Transformation of Supply Chain Management*. CRC Press.
- Papaleonidas, C., D.V. Lyridis, A. Papakostas, et D.A. Konstantinidis. 2020. « An Innovative Decision Support Tool for Liquefied Natural Gas Supply Chain Planning ». *Maritime Business Review* 5 (1): 121-136. doi:10.1108/MABR-09-2019-0036.
- Patrucco, Andrea S., et Anni-Kaisa Kähkönen. 2021. « Agility, Adaptability, and Alignment: New Capabilities for PSM in a Post-Pandemic World ». *Journal of Purchasing and Supply Management* 27 (4): 100719. doi:10.1016/j.pursup.2021.100719.
- Peidro, David, Josefa Mula, Raul Poler, et Francisco-Cruz Lario. 2009. « Quantitative Models for Supply Chain Planning under Uncertainty: A Review ». *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 236 GRAYS INN RD, 6TH FLOOR, LONDON WC1X 8HL, ENGLAND: SPRINGER LONDON LTD. doi:10.1007/s00170-008-1715-y.
- Pillay, R., et M. Laeequddin. 2019. « Peer Teaching: A Pedagogic Method for Higher Education ». *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 9 (1): 2907-2913. doi:10.35940/ijitee.A9106.119119.
- Pishvae, M.S., M. Rabbani, et S.A. Torabi. 2011. « A Robust Optimization Approach to Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty ». *Applied Mathematical Modelling* 35 (2): 637-649. doi:10.1016/j.apm.2010.07.013.
- Pudasaini, P. 2021. « Integrated Planning of Downstream Petroleum Supply Chain: A Multi-Objective Stochastic Approach ». *Operations Research Perspectives* 8. doi:10.1016/j.orp.2021.100189.
- Ramesh, K. T., et Sarada Prasad Sarmah. 2021. « Impact of Supply Risk Management on Firm Performance: A Case of the Indian Electronics Industry ». *International Journal of Productivity and Performance Management* 70 (6). Bingley: Emerald Group Publishing Ltd: 1419-1445. doi:10.1108/IJPPM-04-2019-0205.

- Rau, H., S. Daniel Budiman, et C.N. Monteiro. 2021. « Improving the Sustainability of a Reverse Supply Chain System under Demand Uncertainty by Using Postponement Strategies ». *Waste Management* 131: 72-87. doi:10.1016/j.wasman.2021.05.018.
- Rius-Sorolla, G., J. Maheut, S. Estelles-Miguel, et J.P. Garcia-Sabater. 2021. « Article Collaborative Distributed Planning with Asymmetric Information. A Technological Driver for Sustainable Development ». *Sustainability (Switzerland)* 13 (12). doi:10.3390/su13126628.
- Rius-Sorolla, Gregorio, Julien Maheut, Sofia Estelles-Miguel, et Jose P. Garcia-Sabater. 2021. « Collaborative Distributed Planning with Asymmetric Information. A Technological Driver for Sustainable Development ». *Sustainability* 13 (12): 6628. doi:10.3390/su13126628.
- Rohde, J., H. Meyr, et M. Wagner. 2000. *Die Supply Chain Planning Matrix*. 36716. *Publications of Darmstadt Technical University, Institute for Business Studies (BWL)*. Publications of Darmstadt Technical University, Institute for Business Studies (BWL). Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL). <https://ideas.repec.org/p/dar/wpaper/36716.html>.
- Rohde, Jens. 2005. « Coordination and Integration ». In *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies*, édité par Hartmut Stadtler et Christoph Kilger, 245-257. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/3-540-24814-5_14.
- Rota, Karine. 1998. « Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources : application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique ». Thesis, Toulouse, ENSAE. <http://www.theses.fr/1998ESAE0013>.
- Rudberg, Martin, et Jim Thulin. 2009. « Centralised Supply Chain Master Planning Employing Advanced Planning Systems ». *Production Planning & Control* 20 (2): 158-167. doi:10.1080/09537280802705047.
- Sahin, Funda, Arunachalam Narayanan, et E. Powell Robinson. 2013. « Rolling Horizon Planning in Supply Chains: Review, Implications and Directions for Future Research ». *International Journal of Production Research* 51 (18): 5413-5436. doi:10.1080/00207543.2013.775523.
- Sahin, Funda, et E. Powell Robinson. 2002. « Flow Coordination and Information Sharing in Supply Chains: Review, Implications, and Directions for Future Research ». *Decision Sciences* 33 (4): 505-536. doi:https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2002.tb01654.x.
- Saidy, C., C. Pinna, Z. Wilson, L. Panavas, R. Harik, et A.-M. Bayoumi. 2018. « Literature review of current practices of supplier's assessment and valuation of decisions regarding underperforming suppliers ». *International Journal of Product Lifecycle Management* 11 (3): 245-267. doi:10.1504/IJPLM.2018.094719.
- Sánchez-Vega, M.-D.-R., S.-O. Caballero-Morales, D. Sánchez-Partida, et J.-L. Martínez-Flores. 2018. « Risk-Based Strategic Inventory Supply Model for New Products ». In *Best Practices in Manufacturing Processes: Experiences from Latin America*, 75-95. doi:10.1007/978-3-319-99190-0_4.
- Scott, W. Richard. 1992. *Organizations: Rational, Natural, and Open Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Serrano, C., X. Delorme, et A. Dolgui. 2021. « Cross-Dock Distribution and Operation Planning for Overseas Delivery Consolidation: A Case Study in the Automotive Industry ». *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 33: 71-81. doi:10.1016/j.cirpj.2021.02.007.

- Shafer, Glenn. 1987. « BELIEF FUNCTIONS AND POSSIBILITY MEASURES. » *Anal of Fuzzy Inf. CRC Press Inc*, 51-84.
<https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/belief-functions-and-possibility-measures>.
- Shan, F., X. Dai, J. Men, et F. Yang. 2021. « Coordinating a decentralized supply chain with capacity cost compensation ». *RAIRO - Operations Research* 55: S1789-S1802. doi:10.1051/ro/2020056.
- Shi, Xiaoqiu, Dingshan Deng, Wei Long, Yanyan Li, et Xiaohong Yu. 2021. « Research on the Robustness of Interdependent Supply Networks with Tunable Parameters ». *Computers & Industrial Engineering* 158 (août): 107431. doi:10.1016/j.cie.2021.107431.
- Simangunsong, E., L. C. Hendry, et M. Stevenson. 2012. « Supply-Chain Uncertainty: A Review and Theoretical Foundation for Future Research ». *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*. 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OX14 4RN, OXON, ENGLAND: TAYLOR & FRANCIS LTD. doi:10.1080/00207543.2011.613864.
- Snyder, Lawrence V., et Mark S. Daskin. 2006. « Stochastic p-robust location problems ». *IIE Transactions* 38 (11). Taylor & Francis: 971-985. doi:10.1080/07408170500469113.
- Snyder, Lawrence V., et Zuo-Jun Max Shen. 2019. *Fundamentals of Supply Chain Theory*. 1^{re} éd. Wiley. doi:10.1002/9781119584445.
- Stadtler, Hartmut. 2005. « Supply Chain Management and Advanced Planning—Basics, Overview and Challenges ». *European Journal of Operational Research*, Supply Chain Management and Advanced Planning, 163 (3): 575-588. doi:10.1016/j.ejor.2004.03.001.
- Stadtler, Hartmut, et Christoph Kilger, éd. 2008. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-74512-9.
- Stock, Gregory N, Noel P Greis, et John D Kasarda. 2000. « Enterprise Logistics and Supply Chain Structure: The Role of Fit ». *Journal of Operations Management* 18 (5): 531-547. doi:10.1016/S0272-6963(00)00035-8.
- Ströhle, P., C.M. Flath, et J. Gärttner. 2019. « Leveraging Customer Flexibility for Car-Sharing Fleet Optimization ». *Transportation Science* 53 (1): 42-61. doi:10.1287/trsc.2017.0813.
- Sun, Gaoji, Yankui Liu, et Yanfei Lan. 2011. « Fuzzy Two-Stage Material Procurement Planning Problem ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 22 (2): 319-331. doi:10.1007/s10845-009-0306-6.
- Suryawanshi, P., et P. Dutta. 2021. « Distribution planning problem of a supply chain of perishable products under disruptions and demand stochasticity ». *International Journal of Productivity and Performance Management*. doi:10.1108/IJPPM-12-2020-0674.
- Taghipour, Atour, et Jean-Marc Frayret. 2013. « Dynamic Mutual Adjustment Search for Supply Chain Operations Planning Co-Ordination ». *International Journal of Production Research* 51 (9): 2715-2739. doi:10.1080/00207543.2012.737952.
- Taghizadeh, Elham, Saravanan Venkatachalam, et Ratna Babu Chinnam. 2021. « Impact of Deep-Tier Visibility on Effective Resilience Assessment of Supply Networks ». *International Journal of Production Economics* 241 (novembre): 108254. doi:10.1016/j.ijpe.2021.108254.
- Tang, Christopher, et Brian Tomlin. 2008. « The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks ». *International Journal of Production Economics* 116 (1): 12-27. doi:10.1016/j.ijpe.2008.07.008.

- Tarei, P.K., J.J. Thakkar, et B. Nag. 2021. « Development of a decision support system for assessing the supply chain risk mitigation strategies: an application in Indian petroleum supply chain ». *Journal of Manufacturing Technology Management* 32 (2): 506-535. doi:10.1108/JMTM-02-2020-0035.
- Teniwut, W.A., et C.L. Hasyim. 2020. « Decision support system in supply chain: A systematic literature review ». *Uncertain Supply Chain Management* 8 (1): 131-148. doi:10.5267/j.uscm.2019.7.009.
- Thun, Jörn-Henrik, et Daniel Hoenig. 2011. « An Empirical Analysis of Supply Chain Risk Management in the German Automotive Industry ». *International Journal of Production Economics*, Innsbruck 2008, 131 (1): 242-249. doi:10.1016/j.ijpe.2009.10.010.
- Tinani, Khimya S., et Deepa H. Kandpal. 2017. « Literature Review on Supply Uncertainty Problems: Yield Uncertainty and Supply Disruption ». *Journal of the Indian Society for Probability and Statistics* 18 (2): 89-109. doi:10.1007/s41096-017-0020-1.
- Tiss, Sanaa, Caroline Thierry, Jacques Lamothe, et Christophe Rousse. 2019. « Toward an Agile Adaptation of Supply Chain Planning: A Situational Use Case ». In *Collaborative Networks and Digital Transformation*, édité par Luis M. Camarinha-Matos, Hamideh Afsarmanesh, et Dario Antonelli, 344-354. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-28464-0_30.
- Touzout, Faycal A., Anne-Laure Ladier, et Khaled Hadj-Hamou. 2021. « Modelling and Comparison of Stability Metrics for a Re-Optimisation Approach of the Inventory Routing Problem under Demand Uncertainty ». *EURO Journal on Transportation and Logistics* 10 (janvier): 100050. doi:10.1016/j.ejtl.2021.100050.
- Tuncel, Gonca, et Gülgün Alpan. 2010. « Risk Assessment and Management for Supply Chain Networks: A Case Study ». *Computers in Industry* 61 (3): 250-259. doi:10.1016/j.compind.2009.09.008.
- Van Donselaar, K., J. Van Den Nieuwenhof, et J. Visschers. 2000. « Impact of Material Coordination Concepts on Planning Stability in Supply Chains ». *International Journal of Production Economics* 68 (2): 169-176. doi:10.1016/S0925-5273(00)00033-5.
- Vlachos, I., et G. Malindretos. 2021. « Supply Chain Redesign in the Aquaculture Supply Chain: A Longitudinal Case Study ». *Production Planning and Control*. doi:10.1080/09537287.2021.1959663.
- Walsh, Patrick, Peter Williams, et Cathal Heavey. 2008. « Investigation of rolling horizon flexibility contracts in a supply chain under highly variable stochastic demand ». *Ima Journal of Management Mathematics - IMA J MANAG MATH* 19 (janvier): 117-135. doi:10.1093/imaman/dpm035.
- Wang, T., Y. Zhao, et X. Zhu. 2021. « Advanced Production Plan System of Military Manufacturing Enterprises Based on Linear Programming Model ». In . Vol. 1732. doi:10.1088/1742-6596/1732/1/012017.
- Whybark, D. Clay, et J. Gregg Williams. 1976. « MATERIAL REQUIREMENTS PLANNING UNDER UNCERTAINTY ». *Decision Sciences* 7 (4): 595-606. doi:10.1111/j.1540-5915.1976.tb00704.x.
- Wiers, Vincent C. S. 2002. « A Case Study on the Integration of APS and ERP in a Steel Processing Plant ». *Production Planning & Control* 13 (6): 552-560. doi:10.1080/09537280210160321.

- Yager, Roland R., et Liping Liu, éd. 2008. *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Vol. 219. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-44792-4.
- Yan, B., X. Chen, Y. Liu, et C. Xia. 2019. « Replenishment decision and coordination contract in cluster supply chain ». *Industrial Management and Data Systems* 119 (6): 1374-1399. doi:10.1108/IMDS-02-2019-0087.
- You, Fengqi, John M. Wassick, et Ignacio E. Grossmann. 2009. « Risk Management for a Global Supply Chain Planning under Uncertainty: Models and Algorithms ». *AIChE Journal* 55 (4): 931-946. doi:10.1002/aic.11721.
- Zadeh, L. A. 1978. « Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility ». *Fuzzy Sets and Systems* 1 (1): 3-28. doi:10.1016/0165-0114(78)90029-5.
- Zadeh, Lotfi A. 1965. « Fuzzy sets ». *Information and control* 8 (3): 338-353.
- Zanjirani Farahani, Reza, Nasrin Asgari, et Hoda Davarzani, éd. 2009. *Supply Chain and Logistics in National, International and Governmental Environment*. Contributions to Management Science. Heidelberg: Physica-Verlag HD. doi:10.1007/978-3-7908-2156-7.
- Zarghami, Seyed Ashkan, et Jantanee Dumrak. 2021. « Unearthing Vulnerability of Supply Provision in Logistics Networks to the Black Swan Events: Applications of Entropy Theory and Network Analysis ». *Reliability Engineering & System Safety* 215 (novembre): 107798. doi:10.1016/j.ress.2021.107798.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Vue d'ensemble de la thèse.....	6
Figure 2. Représentation d'une chaîne logistique	11
Figure 3. Différents structures de la chaîne logistique (Mahmoudi et al. 2006).....	12
Figure 4. « Maison de SCM » (Stadtler 2005)	14
Figure 5. La matrice de la planification de la chaîne logistique (J. Rohde, Meyr, et Wagner 2000)et positionnement du périmètre de la thèse.....	17
Figure 6. Stratégie de production et délai de livraison (Chapman et Clive 2007)	19
Figure 7. Modèles du problème de dimensionnement des tailles de lots dans une stratégie Make-To-Stock (Rota 1998; Drexl et Kimms 1997; Johnson et Montgomery 1999; Jans et Degraeve 2008; Guillaume 2011; Mula et al. 2021).....	20
Figure 8. Processus de planification et contrôle de production (PCP) dans (« APICS Dictionary, 16th Edition » 2021)	22
Figure 9. Une chaîne de collaboration à deux niveaux	26
Figure 10. Collaboration multi-niveau.....	26
Figure 11. Processus de planification collaborative basée sur un échange de plan (Stadtler et Kilger 2008).....	29
Figure 12. Planification à horizon glissant.....	31
Figure 13. Notions connexes des incertitudes et risques dans une SC.....	33
Figure 14. Illustration de l'effet 'Bullwhip' dans une chaîne logistique.....	35
Figure 15. Illustration des types de nervosité dans l'historique de planification à horizon glissant de taille n=4	36
Figure 16. 'Co-occurrence map'	60
Figure 17. Évolution des mots clés des auteurs en planification tactique sous incertitude.....	61
Figure 18. Analyse de la tendance des sujets par année.....	61
Figure 19. Mesures des performances d'une promesse de livraison (satisfaction, stabilité, faisabilité, fiabilité).....	78
Figure 20. Processus de gestion des risques selon la norme (ISO 31000 :2018)	79
Figure 21. Arborescence d'évaluation de criticité des risques selon la norme (ISO 13849-1, 2008)	84
Figure 22. Arborescence d'évaluation de la robustesse et de la criticité des risques associés à un plan.....	85
Figure 23. Matrice des risques proposée.....	86

Figure 24. Représentation des stratégies de mitigation des risques possibles sur la matrice des risques.....	87
Figure 25. Stratégies de réduction des risques et actions de planification et d'adaptation connexes possibles.....	87
Figure 26. Processus d'aide à la décision sur la plateforme d'aide à la replanification sous incertitudes.....	89
Figure 27. Processus de négociation.....	90
Figure 28. Positionnement du chapitre 1 dans le cadre d'application de la démarche de gestion des risques.....	95
Figure 29. (a) Cas avec incertitude sur la demande d_t . (b) Cas avec incertitude sur la demande cumulée D_t (source : (Guillaume, Thierry, et Zieliński 2017)).....	97
Figure 30. Distribution de possibilité autour d'une quantité cumulée Q_t	98
Figure 31. Illustrations des modèles (I1.H1 ; I1.H2 ; I2.H1 ; I2.H2 ; I3) du tableau 1.....	101
Figure 32. Plans cumulés pour produit P (Réceptions, demande totale, plan de livraison totale).....	102
Figure 33. Plans cumulés de demande du CDL1 et CDL2 et les promesses de livraison du CDC.....	103
Figure 34. Distributions de possibilité générée à partir du modèle expert.....	103
Figure 35. Mesures des risques K1, K2 en fonction de la promesse cumulée de livraisons totales à la période.....	105
Figure 36. Mesures du risques K3 par client, en fonction de la promesse de livraison de chacun.....	106
Figure 37. Mesures du risques K4, en fonction de la promesse de livraison totale.....	106
Figure 38. Évaluation de la criticité du risque K4 associé au plan de livraison du produit P ..	110
Figure 39. Risque K4 dans les quantité totale programmée sur l'horizon de planification.....	110
Figure 40. Distribution rectangulaire de possibilité.....	111
Figure 41. Caractérisation des risques à l'intersection des intervalles d'incertitudes de demande et des réceptions.....	113
Figure 42. Caractérisation du risque K4 à l'intersection des intervalles des plans incertains ..	116
Figure 43. Plan de livraison (X) par rapport les intervalles de demande du client CDL1.....	118
Figure 44. Plan de livraison (X) par rapport les intervalles de demande du client CDL1.....	118
Figure 45. Démarche expérimentale.....	123
Figure 46. Chaîne logistique Pierre Fabre Dermo-Cosmétique.....	125
Figure 47. Aperçu du périmètre d'étude de PFDC.....	126
Figure 48. Processus de planification collaborative (échange de plans) avec une coordination mensuelle.....	127

Figure 49. Les couples (produit* CDL) des données industrielles.....	129
Figure 50. Structure du système d'aide à la replanification	131
Figure 51. Intégrabilité de la plateforme d'aide à la replanification	132
Figure 52. Modèle de données de planification sous incertitudes (cf. chapitre IV, §2)	133
Figure 53. Définition de la structure de la SC	134
Figure 54. Affectation des rôles des décideurs.....	134
Figure 55. Configuration du modèle d'incertitudes.....	135
Figure 56. Configuration du périmètre (produits) et des tolérances d'évaluation.....	135
Figure 57. Matrice des risques	136
Figure 58. Mesures des risques par période.....	136
Figure 59. Plan de livraison VS plans flous des autres acteurs (interface d'édition).....	137
Figure 60. Allocation des modifications aux clients	137
Figure 61. Alignement des plans déterministe	138
Figure 62. Alertes des déviations par rapport les demandes et stratégies d'alignements	138
Figure 63. Création des scénarios de décision.....	138
Figure 64. Interface de négociation	139
Figure 65. Dimensionnement du SC du Serious Game.....	140
Figure 66. Aperçu général du déroulement multi-utilisateurs du jeu sérieux	142
Figure 67. Scénario de génération des prévisions de ventes en horizon glissant.....	148
Figure 68. Interaction de l'émulateur ERP/ DRP et le simulateur de la stratégie de réduction de gravité du risque	148
Figure 69. Illustration de l'impact de l'application de la stratégie de lissage pour réduction de gravité sur l'arbre des risques (avant (rouge) et après l'application de la stratégie (vert)).....	149
Figure 70. Étude de la nervosité des plans pour la stratégie S1, par produit: (a) P1, (b) P2, (c) P3	153
Figure 71. (A) Résultats d'évaluation de criticité des plans de livraison issus du DRP avant traitement de risque au début des semaines de replanification. (B) Résultats d'évaluation de criticité des plans de livraisons après le traitement du risque.	153
Figure 72. Résultats comparaison des 2 stratégies en termes de stabilité et de fiabilité pour les 4 produits : (G1) P1, (G2) P2, (G3) P3,(G4) P4.....	155

LISTE DES TABLES

Tableau 1. Positionnement du contexte industriel	45
Tableau 2. Critères de classification des travaux sur la planification sous incertitude de la SC 50	
Tableau 3. Risques, incertitudes et événements connexes	82
Tableau 4. Les différentes applications possibles des informations d'un expert sur les quantités cumulées d'un plan.....	100
Tableau 5. Résultats de mesures des risques K1, K2, K4 et d'indicateurs agrégés d'évaluation	109
Tableau 6. Résultats de mesures du risque K4.....	116
Tableau 7. Résultats de mesures des écarts par rapport la combinaison optimiste et la combinaison pessimiste.....	117
Tableau 8. Scénario des caractéristiques des filiales	140
Tableau 9. Scénario des caractéristiques des produits.....	141
Tableau 10. Échelle de caractérisation du modèle d'incertitudes d'expert	146
Tableau 11. Scénario du modèle d'incertitude	147
Tableau 12. Récapitulatif des indicateurs agrégés (moyennes) de performance des promesses de livraison, par produit, sur l'horizon glissant pour les stratégies S1 (sans modélisation incertitude) et S2 (avec réduction de gravité)	155

RISKS AND ROBUSTNESS ASSESSMENT OF MASTER PLANS OF INDEPENDENT ACTORS IN A SUPPLY CHAIN BASED ON A CLOUD PLATFORM

Abstract :

The management of a multi-actor supply chain relies on a coordination pillar, which is essential to synchronize the activities of all actors and ensure a good level of end customer service rate and expected performance.

Tactical planning of the supply chain is a particularly important decision-making level that aims to ensure the synchronization of physical and information flows in the supply chain.

The different actors rely on planning information systems to improve their internal planning performance. They rely on rolling planning and information sharing tools to periodically revise and align their plans to adapt to uncertainties. However, over the rolling horizon, the instability due to periodic plan revisions and the effects of uncertainties are amplified along the supply chain (bullwhip effect) and increase the nervousness of the system. However, deterministic decision support systems remain limited in their ability to manage these uncertainties. Thus, the decision-maker is often exposed to a stability-reactivity dilemma in his decision making regarding the uncertainties.

In the literature, different approaches are proposed for the management of uncertainties in tactical planning. However, the gap between research and industrial practices in this field remains very important in the absence of analysis of the applicability of the proposed theoretical models, whether in terms of considering the complexity of the industrial environment or the number of sources of uncertainty considered or the involvement of the decision-maker in the decision-making process. In order to overcome these limitations while considering that decision makers always exchange deterministic plans generated with existing planning tools, this thesis describes a proposal for a replanning support system for a planner at the central distribution level of a supply chain.

Thus, this thesis deals with the following three aspects: 1/ Integrate the knowledge of an expert on the variability of the cumulative plans of other actors. 2/ Integrate this knowledge for uncertainty modeling and risk assessment and robustness of a decision maker's deterministic plans. 3/ Study the applicability of the proposed approach in a real dynamic industrial environment by considering the independence of the decision maker in the decision making.

A methodological contribution of this thesis lies in the adaptation of a risk management methodology from their identification and modeling of uncertainties to the evaluation of their criticality and the mitigation of their impact. A theoretical contribution is based on the proposal of a quantitative approach, based on fuzzy sets and possibility theory, for the evaluation of the robustness of a decision-maker's plans, regarding the risks linked to the respect of the constraints induced by the decisions of his upstream supplier (supplies) and his downstream customers (demand). A practical contribution concerns the implementation of an interactive cloud platform for decision support integrating the main functionalities of the decision support system based on the proposed approach: dynamic database, interactive interfaces, different levels of evaluation aggregation, collaboration and configuration.

Finally, a 'Serious Game' is elaborated from the analysis of the processes of an industrial case PFDC (Pierre Fabre Dermo-Cosmetics) and used as proof of concept in a dynamic context.

Keywords: *Supply chain, Uncertainty, Tactical planning, Risk management, Robustness, Fuzzy sets, Possibility theory, Decision support system.*

ÉVALUATION DES RISQUES ET DE LA ROBUSTESSE DE LA PLANIFICATION TACTIQUE DES ACTEURS D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE BASEE SUR UNE PLATEFORME CLOUD

Résumé :

La gestion d'une chaîne logistique multi-acteurs repose sur un pilier de coordination, essentiel pour synchroniser les activités de tous les acteurs et assurer un bon niveau de taux de service du client final et des performances attendues.

La planification tactique de la chaîne logistique est un niveau de décision particulièrement important qui vise à assurer la synchronisation des flux physiques et d'informations dans la chaîne. Les différents acteurs s'appuient sur des systèmes d'information de planification pour améliorer leurs performances de planification interne. Ils s'appuient sur la planification à horizon glissant et les outils de partage d'informations pour réviser et aligner périodiquement leurs plans afin de s'adapter face aux incertitudes. Cependant, sur l'horizon glissant, l'instabilité due aux révisions périodiques des plans et les effets des incertitudes sont amplifiés le long de la chaîne (effet bullwhip) et accroissent la nervosité du système. Les systèmes d'aide à la décision déterministes restent toutefois restreints pour la gestion de ces incertitudes. Ainsi, le décideur est souvent confronté à un dilemme stabilité-réactivité dans sa prise de décision face aux incertitudes.

Dans la littérature, différentes approches sont proposées pour la gestion des incertitudes dans la planification tactique. Cependant, l'écart entre la recherche et la pratique industrielle dans ce domaine reste très important en absence d'analyse de l'applicabilité des modèles théoriques proposés, que ce soit au niveau de la prise en compte de la complexité de l'environnement industriel ou du nombre de sources d'incertitude considérées ou encore de l'implication du décideur dans le processus de prise de décision. En vue de surmonter ces limitations et tout en considérant que les décideurs échangent toujours des plans déterministes générés avec les outils de planification existants, cette thèse décrit une proposition de système d'aide à la replanification pour un planificateur au niveau de la distribution centrale d'une chaîne logistique.

Ainsi, cette thèse traite des trois aspects suivants : 1/ Intégrer la connaissance d'un expert sur la variabilité des plans cumulés des autres acteurs. 2/ Intégrer cette connaissance pour la modélisation de l'incertitude et l'évaluation des risques et de la robustesse des plans déterministes d'un décideur. 3/ Étudier l'applicabilité de l'approche proposée dans un environnement industriel dynamique réel en considérant l'indépendance du décideur dans la prise de décision.

Un apport méthodologique de cette thèse réside dans l'adaptation d'une méthodologie de gestion des risques depuis leur identification et la modélisation des incertitudes jusqu'à l'évaluation de leur criticité et la mitigation de leur impact. Un apport théorique repose sur la proposition d'une approche quantitative, basée sur les ensembles flous et la théorie des possibilités, pour l'évaluation de la robustesse des plans d'un décideur, au regard des risques liés au respect des contraintes induites par les décisions de son fournisseur en amont (approvisionnements) et de ses clients en aval (demande). Un apport pratique concerne la mise en œuvre d'une plateforme cloud interactive d'aide à la décision intégrant les principales fonctionnalités du système d'aide à la décision basé sur l'approche proposée : base de données dynamique, interfaces interactives, différents niveaux d'agrégation des évaluations, collaboration et configuration.

Enfin, un 'Serious Game' est élaboré à partir de l'analyse des processus d'un cas industriel PFDC (Pierre Fabre Dermo-Cosmétique) et utilisé comme preuve de concept dans un contexte dynamique.

Mots clés : Chaîne logistique, Incertitude, Planification tactique, Gestion de risque, Robustesse, Ensembles flous, Théorie de possibilité, Système d'aide à la décision.