



**Université Hassan 1<sup>er</sup>**  
**Centre d'Études Doctorales en Sciences**  
**et Techniques & Sciences Médicales**



Faculté des Sciences et Techniques  
Settat

# THÈSE DE DOCTORAT

*Pour l'obtention de grade de Docteur en Génie Industriel et Logistique.*

Formation Doctorale : physique et sciences de l'ingénieur

Spécialité : **Génie Industriel et Logistique**

*Sous le thème*

## Modélisation et optimisation multi-objectif de la chaîne logistique sous incertitude

*Présentée par :*

**DOUAILOUI Kaoutar**

Soutenue le : 18/05/2022

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. A. MOUSRIJ	PES	UH1, FST de Settat	Président
Pr. F. BELMAJDOUB	PES	USMBA, FST de Fès	Rapporteur
Pr. M. SADDOUNE	PH	UH2, FST de Mohammedia	Rapporteur
Pr. A. CHARKAOUI	PH	UH1, FST de Settat	Rapporteur
Pr. B. LOTFI	PH	UH1, ENSA de Berrechid	Examinatrice
Pr. C. MABROUKI	PH	UH1, FST de Settat	Co-Directeur de thèse
Pr. E.A. SEMMA	PH	UH1, FST de Settat	Directeur de thèse

*Année Universitaire: 2021/2022*

## DÉDICACES

*À mes très chers parents, dont l'esprit éducatif d'enseignement  
probablement serait transmis à leurs enfants ;*

*À mon cher mari ;*

*À mon fils ;*

*À mes chers frères*

*À ma chère sœur ;*

*À mes beaux-parents ;*

*À mes amis ;*

*À tous ceux qui ont prié pour moi.*

## REMERCIEMENTS

*« Le jeu n'en vaut la chandelle que si, en dehors de toute considération de carrière, vous souhaitez tenter pour elle-même l'aventure de la thèse. Sinon le prix à payer risque d'être lourd pour un résultat incertain. » [1]*

La thèse est un long voyage (souvent très long), risqué, déroutant, individuel et collectif, mais et surtout une opportunité unique pour faire s'ouvrir la recherche scientifique sur d'autres horizons susceptibles de porter des réponses à des questions non résolues. Elle m'a offert la possibilité d'approfondir le thématique dont il est question, vivre diverses expériences, faire des rencontres professionnelles et personnelles très enrichissantes. La thèse est un travail individuel où l'on se retrouve souvent seul à réfléchir, à faire des choix, à échouer et apprendre à se relever et se remettre sur ses pieds pour toujours continuer sans jamais s'en lasser. Cependant, elle est aussi le fruit d'un échange collectif, enrichi des travaux et des expériences d'autres chercheurs.

Comme tout un chacun qui doit beaucoup à certains d'autres qui l'ont accompagné, soutenu, et surtout assisté à toujours aller à pas sûr pour réaliser ses rêves et ses ambitions. Je tiens à remercier et exprimer ma reconnaissance à l'égard des professeurs SEMMA EL ALAMI, CHARIF MABROUKI mes directeurs de recherche, à l'égard aussi du professeur ABDELWAHED ECHCHATBI le directeur de notre laboratoire de recherche, pour avoir été tous et à tout moment disponibilité à me bien guider, à me démêler les nuances, à me clarifier avec beaucoup de responsabilités scientifiques le chemin qu'il faut emprunter pour mener à bien ma recherche, et surtout à m'écouter et m'enthousiasmer avec une maturité et une compétence pédagogique évidentes.

La F.S.T de Settat, c'est la terre où j'ai germé, poussé et crû pour m'épanouir à plus d'ambition. C'est grâce à ce rayonnant établissement qu'il m'a été possible de faire de belles rencontres et connaître des personnes fantastiques dont certaines sont devenues collègues et ami(e)s doctorants. Ceux-ci m'ont été un ingrédient d'équilibre qu'il fallait rajouter à ma vie personnelle pour plus de goût et de saveur. Je les remercie toutes et tous d'avoir été si utiles à nous partager ensemble les angoisses relatives aux recherches entamées ainsi que les moments de joie et de tristesses relatifs à la vie de tous les jours. Finalement, je saisis l'occasion pour remercier toute ma famille, notamment ma maman, mon papa, ma belle-mère, mon beau père et mon fils qui m'ont inlassablement écoutée, et soutenue à leur façon adéquate chaque fois que j'en avais besoin. Leur question récurrente « quant est ce que tu soutiendras ta thèse ? » me pesait trop parce

qu'il me fallait une réponse. Je savais que c'est la réponse qui répondra à mes attentes moi-même aussi bien qu'aux siennes. Je remercie aussi mon mari qui m'a beaucoup influencée en me passant tendrement cet amour de la recherche scientifique en sachant quand et comment me remonter le moral pour me bien accompagner à toujours m'aventurer dans le même long et beau voyage, qui m'a beaucoup marquée en découvrant de vraies merveilles dans le monde du « génie industriel et logistique » que la présente thèse essaie d'enrichir à sa façon.

Merci à tous.

## RESUMÉ

La gestion flexible de la chaîne logistique est cruciale. Elle permet de créer un avantage concurrentiel durable et de faire face à la complexité et à l'incertitude au sein de la chaîne logistique. La flexibilité dans la gestion, concerne principalement la planification et la prise des décisions sur plusieurs niveaux dans des environnements incertains et complexes. Dans ce sens, plusieurs chercheurs recourent à la modélisation mathématique de la chaîne logistique pour rendre la prise des décisions, sous plusieurs contraintes, plus flexible et plus optimale. En réalité, vu la diversité des structures logistiques ainsi que la diversité des hypothèses relatives à chaque chaîne logistique, les modèles proposés dans la littérature restent limités. Dans cette perspective, ce projet de thèse contribue à étendre la littérature existante sur les pratiques de développement des modèles de la chaîne logistique, en intégrant les fonctions de la chaîne logistique au niveau tactique. Néanmoins, dans le cas réel, la chaîne logistique subit des événements incertains, donc pour rapprocher le modèle, proposé dans le cadre de ce travail, à la réalité industrielle incertaine, la notion de l'incertitude a été intégrée pour rendre le modèle proposé un modèle incertain. En effet ce modèle vise à faire face à l'incertitude épistémique des paramètres, à travers l'utilisation de la programmation mathématique floue et une approche de programmation basée sur la théorie de crédibilité. En fait, la solution proposée est efficace sur des petites structures logistiques, mais reste irréalisable dans les grandes structures. Pour cette raison une nouvelle métaheuristique nommée (*HGSCS*) a été proposée dans le cadre de ce travail. En effet, elle se base sur le développement de la métaheuristique nommée (*Hunger Games Search HGS*) par le processus de la recherche chaotique (*Chaotic Search*). Les résultats obtenus à l'aide de la nouvelle métaheuristique (*HGSCS*), montrent une performance élevée par rapport à d'autres algorithmes connus dans le domaine. Ce projet de recherche a été appliqué sur une chaîne logistique textile. Les résultats obtenus ont répondu aux objectifs stratégiques des gestionnaires de la même chaîne logistique. Les solutions proposées, dans le cadre de ce projet, sont applicables dans des petites et grandes structures des chaînes logistiques, centralisées ou bien décentralisées. De plus, les solutions développées peuvent être adaptées aussi pour d'autres chaînes logistiques similaires même dans d'autres secteurs.

**Mots-clés :** Programmation floue, théorie de crédibilité, *Hunger Games Search*, *Chaotic Search*.

## ABSTRACT

The flexible management for supply chain is crucial. It helps supply chain to create a sustainable competitiveness and to deal with complexity and uncertainty. Flexibility in management is primarily concerned with multi-level planning and decision-making in uncertain and complex environments. In this sense, several researchers use mathematical modeling to make decision-making under several constraints in the supply chain, more flexible and more optimal. Given the diversity of logistics structures as well as the diversity of hypotheses related to each supply chain, the proposed models in the literature remain limited. In this perspective, this thesis project contributes to extend the existing literature on the development practices of supply chain models, by integrating the functions of supply chain at the tactical level. Nevertheless, in the real case, the supply chain undergoes uncertain events, so to bring the model, proposed in the context of this work, closer to the uncertain industrial reality, the notion of uncertainty has been integrated to make the proposed model an uncertain model. Indeed, this model aims to deal with the epistemic uncertainty of the parameters, through the use of fuzzy mathematical programming and a programming approach based on credibility theory. The proposed solution is effective on small logistics structures, but remains unfeasible in large structures. For this reason, a new metaheuristic named (HGSCS) has been proposed as part of this work. Indeed, it is based on the development of the metaheuristic named Hunger Games Search (HGS) by the process of chaotic search (CS). The results obtained using the new metaheuristic (HGSCS), show a high performance compared to others known algorithms in the field. This research project was applied to a textile supply chain. The results obtained met the strategic objectives of the managers of the same supply chain. The solutions proposed, within the framework of this project, are applicable in small and large structures of the supply chains, centralized or decentralized. In addition, the solutions developed can also be adapted for other similar supply chains even in other sectors that consider the uncertain environment and situations of lack of transparency.

**Keywords:** Fuzzy Programming, Credibility Theory, *Hunger Games Search*, *Chaotic Search*

## LISTE DES ABREVIATIONS

ACO	Ant Colony Optimization
AG	Algorithme Génétique
DE	Differential Evolution
ES	Evolution Strategy
MODM	Multi-Objective Decision-Making
PSO	Particle Swarm Optimization
RT	Recherche Tabou
WOA	Whale Optimization Algorithm
GO	Gigaoctet
HGS	Hunger Game Search
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
PSO	Particle Swarm Optimization
SA	Simulated Annealing
3D	Trois Dimensions
CS	Chaotic Search
CSCMP	Council Of Supply Chain Management Professionals
CSHGS	Chaotic Search Hunger Game Search
DRP	Planification Des Ressources De Distribution
ECR	Efficient Customer Response
GAMS	General Algebraic Modeling System
IEEE	Institute of Electrical And Electronics Engineers
MRP II	Manufacturing Ressources Planning
QR	Quick Response
RAM	Random Access Memory
TIC	Technologies De L'information Et De La Communication

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : les paramètres des modèles de modélisation utilisés dans la thèse .....	5
Figure 2: La structure du chapitre I .....	7
Figure 3:Chaîne logistique de structure dyadique .....	10
Figure 4:Chaîne logistique de structure en série.....	10
Figure 5 Chaîne logistique de structure convergente .....	10
Figure 6:Chaîne logistique de structure divergente .....	11
Figure 7:Chaîne logistique de structure en réseau. ....	12
Figure 8: Processus de revue systématique de la littérature. ....	21
Figure 9:Pourcentage d'articles abordant les défis selon la classification. ....	28
Figure 10:Les défis majeurs de la gestion de la chaîne logistique.....	28
Figure 11: La structure du chapitre II .....	30
Figure 12: La chaîne logistique considérée .....	32
Figure 13:Classification des approches de modélisation .....	33
Figure 14:Classification des approches d'optimisation multi-objectif. ....	36
Figure 15: Gestion centralisée de la chaîne logistique.....	37
Figure 16:Gestion décentralisée de la chaîne logistique.....	38
Figure 17: Fonction d'appartenance pour l'objectif de coûts totaux.....	51
Figure 18: Fonction d'adhésion des livraisons à temps.....	51
Figure 19: Analyse de sensibilité de OF1 par rapport à la capacité des fournisseurs .....	56
Figure 20:Analyse de sensibilité de OF2 par rapport au taux de service et la capacité du fournisseur.....	57
Figure 21:Analyse de sensibilité de OF1 par rapport à la capacité de production 3000.....	58
Figure 22:Résumé des coûts totaux pour une capacité de production = 3000.....	58
Figure 23:La structure du chapitre III .....	60
Figure 24: Maturité de la chaîne logistique au niveau de la gestion des incertitudes.....	61
Figure 25: la classification de la programmation incertaine diagramme $\Psi$ [131].....	63
Figure 26: Répartition de tous les coûts pour toutes les instances considérées .....	84
Figure 27: Analyse de l'impact de la capacité du fournisseur sur OF1.....	84
Figure 28: La structure du chapitre IV .....	86
Figure 29 : Classification des types de problèmes .....	88
Figure 30: Structure d'agent proposée. ....	99
Figure 31: Le logigramme de l'algorithme CSHGS .....	101
Figure 32:Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'1.....	103
Figure 33:Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'2.....	104
Figure 34: Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'3.....	104



## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1:Nombre d'articles identifiés dans chaque recherche.....	23
Tableau 2:Nombre d'articles sélectionnés dans chaque étape.....	23
Tableau 3:Description de chaque défi de la chaîne logistique.....	23
Tableau 4:Résultats de la revue systématique de la littérature .....	26
Tableau 5: Les contraintes du modèle .....	41
Tableau 6:Paramètres déterministes .....	54
Tableau 7:Les résultats obtenus par l'approche Tiwari1987 [116] .....	55
Tableau 8: Les résultats obtenus par les approches Selim 2008 [117] et Torabi 2009 [118] .	55
<i>Tableau 9:Analyse impact de la capacité des fournisseurs et du le taux de service .....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 10:Analyse de l'impact de la capacité de production .....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 11:Les paramètres du modèle .....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 12:Problème d'instances .....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 13:Les résultats de la solution obtenus pour une structure centralisée. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 14:Les Résultats de la solution obtenus pour une structure décentralisée. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 15:Quantité produite de produits finis dans les usines .....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 16:Quantité d'inventaire de matières premières dans l'usine .....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 17:Quantité de stock de produits finis dans les usines .....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 18:Quantité de stock de produits finis dans les centres de distribution .....</i>	<i>82</i>
Tableau 19:Sensitivity analysis of supplier capacity and on-time delivery rate impact.....	83
Tableau 20:Résultats de calcul .....	103
Tableau 21: Résultats de calcul de OF1 et OF2 .....	103

# LISTE DE MATIERE

<b>DÉDICACES</b>	<b><i>i</i></b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b><i>ii</i></b>
<b>RESUMÉ</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>v</i></b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b><i>vi</i></b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b><i>viii</i></b>
<b>LISTE DE MATIERE</b>	<b><i>ix</i></b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b><i>1</i></b>
<b>1. Problématique</b>	<b><i>1</i></b>
<b>2. Objectifs de la recherche</b>	<b><i>2</i></b>
<b>3. Méthodologie suivie</b>	<b><i>3</i></b>
<b>4. Organisation de la thèse.</b>	<b><i>3</i></b>
<b>Liste de publication</b>	<b><i>6</i></b>
<b>Chapitre I : Cadre conceptuel et thématique de recherche.</b>	<b><i>7</i></b>
<b>1. Introduction.</b>	<b><i>7</i></b>
<b>2. Cadre général de recherche et revue de littérature.</b>	<b><i>7</i></b>
2.1. Revue littérature de la gestion de chaîne logistique	<i>7</i>
2.2. Définition de la chaîne logistique.	<i>7</i>
2.3. Générations la chaîne logistique.	<i>8</i>
2.3.1. Structures organisationnelles de la chaîne logistique.	<i>9</i>
2.3.2. Structures décisionnelles de la chaîne logistique.	<i>12</i>
2.3.3. Processus supports de la chaîne logistique.	<i>13</i>
2.4. Processus de production	<i>14</i>
2.5. Flux logistique de la chaîne logistique.	<i>15</i>
2.6. Gestion de la chaîne logistique.	<i>16</i>
2.6.1. Définition de la gestion de la chaîne logistique.	<i>16</i>
2.6.2. Problèmes de décision dans la gestion de la chaîne logistique.	<i>17</i>

2.7. Quatrième révolution industrielle et logistique.	18
2.7.1. Quatrième révolution industrielle.	18
2.7.2. Impact de la quatrième révolution industrielle sur la chaîne logistique.	19
<b>3. Problématique de recherche.</b>	<b>20</b>
3.1. Quatrième révolution logistique	20
3.1.1. Sélection des défis de la chaîne logistique 4.0.	20
3.1.2. Défis de la chaîne logistique.	23
<b>4. Défis majeurs de la chaîne logistique et perspectives</b>	<b>25</b>
<b>5. Conclusion.</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE II : La modélisation déterministe de la chaîne logistique.</b>	<b>30</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>30</b>
<b>2. Problématique de l'intégration et la flexibilité de la chaîne logistique</b>	<b>31</b>
2.1. Revue littérature de l'intégration et la flexibilité de la chaîne logistique	31
2.2. Modélisation de la chaîne logistique	31
2.2.1. Approche de modélisation	33
2.2.2. Types de modélisation	34
<b>3. Proposition du modèle d'optimisation multi-objectif de la chaîne logistique</b>	<b>36</b>
3.1. Hypothèses du modèle	37
3.1.1. Types de structure de décisions au sein de la chaîne logistique	37
3.1.2. Ensembles et Indices du modèle	38
3.1.3. Les paramètres du modèle :	38
3.1.4. Les Variables de décision :	40
3.2. Modélisation du problème d'optimisation	41
3.2.1. Contraintes du problème :	41
3.3. Fonctions objectifs :	46
3.3.1. Première fonction objectif.	46
3.3.2. Deuxième fonction objectif	49
<b>4. Résolution du problème d'optimisation multi-objectif</b>	<b>49</b>
4.1. Solution proposée	49
4.1.1. Étapes de la solution	49
<b>5. Résultats et analyse</b>	<b>54</b>
5.1. Étude de cas	54
5.1.1. Valeurs numériques des paramètres	54

5.1.2. Résultats obtenus par les trois approches	55
5.2. Analyse de sensibilité	56
<b>6. Conclusion</b>	<b>58</b>
<b>CHAPITRE III : La modélisation de la chaîne logistique sous incertitude.</b>	<b>60</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>60</b>
<b>2. Problématique de l'incertitude dans la chaîne logistique</b>	<b>61</b>
2.1. Contexte de l'incertitude dans la chaîne logistique	61
2.1.1. Types des incertitudes dans la chaîne logistique	61
2.1.2. Revue littérature de la gestion de l'incertitude	62
2.1.3. Classification des modèles de programmation incertains	63
2.2. Méthodes de gestion de l'incertitude	65
2.2.1. Programmation mathématique floue fondée sur théorie de crédibilité	65
2.2.2. Choix des approches de programmation basée sur la crédibilité	66
<b>3. Modélisation multi-objectif de la chaîne logistique sous incertitudes</b>	<b>67</b>
3.1. Fuzzification du problème d'optimisation	67
3.1.1. Application des théories de modélisation mathématique floue	67
3.2. Défuzzification du problème d'optimisation flou	70
3.2.1. Application de la théorie de crédibilité	71
3.2.2. Fonctions objectifs équivalentes nettes	72
3.2.3. Contraintes équivalentes nettes	72
<b>4. Résolution du problème d'optimisation multi-objectif incertain</b>	<b>73</b>
4.1. Solution proposée	73
4.1.1. Étapes de la solution	74
<b>5. Résultats et analyse</b>	<b>77</b>
5.1. Étude de cas	77
5.1.1. Valeurs numériques des paramètres flous	78
5.1.2. Instances considérées	79
5.1.3. Résultats obtenus par les trois approches	80
5.2. Analyse de sensibilité	83
<b>6. Conclusion</b>	<b>84</b>
<b>Chapitre IV : Le développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS) pour résoudre le problème d'optimisation.</b>	<b>86</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>86</b>

<b>2. Problématique de complexité des problèmes</b>	<b>87</b>
2.1. Étude de la complexité du problème	87
2.1.1. Classification de la complexité	87
2.2. Complexité du problème d'optimisation étudié	88
<b>3. Méthodes Métaheuristiques</b>	<b>89</b>
3.1. Cadre général des métaheuristiques.	89
3.1.1. Définition des métaheuristiques	89
3.1.2. Types d'algorithme métaheuristique	89
3.1.3. Caractéristiques principales des métaheuristiques	90
3.2. Amélioration des performances métaheuristiques	91
<b>4. Développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS)</b>	<b>91</b>
4.1. Métaheuristique Hunger Games Search (HGS)	91
4.1.1. Revue de Hunger Games Search (HGS)	91
4.1.2. Fondement mathématique de Hunger Games Search (HGS)	94
4.2. Recherche chaotique	96
4.2.1. Revue de la recherche chaotique	96
4.2.2. Mécanisme de la recherche chaotique	97
4.3. Développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS)	99
4.3.1. Étapes de développement	99
4.4. Nouvelle métaheuristique (CSHGS)	101
<b>5. Résultats et analyse</b>	<b>102</b>
5.1. Benchmarking des résultats (CSHGS/ (HGS, GA, PSO))	102
5.2. Comportement de convergence (CSHGS/ HGS, GA, PSO)	103
<b>6. Conclusion</b>	<b>104</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>105</b>
<b>1. Rappel de la problématique</b>	<b>105</b>
<b>2. Apports de la recherche</b>	<b>105</b>
<b>3. Perspectives</b>	<b>106</b>
<b>Références</b>	<b>108</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

La montée en flèche de la globalisation et la libéralisation du commerce, rend l'évolution de l'industrie et de l'économie mondiale dépendante de l'évolution de la chaîne logistique. L'évolution de la chaîne logistique est caractérisée principalement par l'intégration des tâches fragmentées et des acteurs logistiques. Ces composants interagissent entre eux selon différents niveaux de décision et selon toutes les fonctions principales de la chaîne logistique. Par conséquent, chaque acteur doit prendre en considération les contraintes des autres acteurs, de plus une simple variation dans une seule composante de la chaîne, impacte directement les autres composants. Dernièrement, en 2019 la perturbation de la chaîne logistique en Chine a pu impacter négativement le monde entier, ce qui justifie davantage la grande attention qu'il faut accorder au bon fonctionnement et à la stabilité des différents acteurs dans la chaîne logistique. En effet, ces perturbations mettent les gestionnaires face à des défis majeurs, qu'ils doivent gérer afin d'assurer la protection continue de l'entreprise contre la vulnérabilité issue de toutes les perturbations possibles. Dans ce sens, plusieurs chercheurs contemporains, essaient d'assister les gestionnaires à gérer les perturbations soudaines et imprévisibles de la chaîne logistique. Ces travaux motivent les chercheurs à développer des modèles des chaînes logistiques prenant en considérations les différents contraintes logistiques et les événements incertains. En revanche, jusqu'à aujourd'hui, plusieurs entreprises sont impactées négativement par des événements imprévisibles tels que le Covid 19 et la variation imprévisible de la demande... Donc un travail supplémentaire doit être fait, pour assurer une chaîne logistique plus fiable, plus commode et plus invulnérable.

## **1. Problématique**

Vu la globalisation et la libéralisation du commerce internationale, les chaînes logistiques sont devenues de plus en plus complexes. En effet, la complexité de la chaîne logistique est proportionnelle à plusieurs facteurs notamment le grand nombre des parties prenantes qui interviennent dans la chaîne logistique. Ces acteurs de la chaîne logistique interagissent selon différents niveaux de décision dans l'objectif d'optimiser les flux logistiques à savoir : les flux physiques, les flux d'informations et les flux financiers. De plus, les chaînes logistiques subissent des perturbations incertaines, telles que les catastrophes déclenchées par le changement climatique, les transactions inefficaces, la fraude et le vol, et les défis de la chaîne logistique pourrait également contribuer à l'augmentation de la gravité des perturbations [2]. De ce fait, cette complexité de la

chaîne logistique, mettent les gestionnaires devant plusieurs défis tels que : la personnalisation de masse, les défis financiers, la cybersécurité, le développement technologique et numérique, la flexibilité et l'intégration logistique, la complexité du réseau logistique et la gestion de l'incertitude. Dans ce sens, plusieurs travaux essaient de résoudre ces défis mais ces solutions restent limitées, vu l'absence d'une structure logistique générique et la variété des hypothèses. Ainsi, chaque structure logistique peut être de grandeur différente (petite, moyenne ou grande) de gestion différente (centralisée ou bien décentralisée) et d'un niveau d'intégration quelconque (tel que l'intégration de fonction d'approvisionnement, de production et de distribution). Bref, il faudrait savoir gérer et contenir les défis qui limitent l'efficacité des modèles logistiques. Donc un travail de fond doit être mené dans ce sens pour enrichir la littérature et assister les gestionnaires des chaînes logistiques à gérer les défis qui s'imposent devant eux.

## **2. Objectifs de la recherche**

Cette thèse à trois objectifs de recherche alignés aux trois défis majeurs de la chaîne logistique relevés par une analyse bibliographique :

Le premier objectif de la recherche concerne la gestion de la flexibilité et l'intégration logistique par l'intégration au niveau tactique des fonctions d'achat, de production, de transport et de distribution constituant un réseau d'une chaîne logistique qui compte plusieurs fournisseurs, plusieurs sites de production, plusieurs centres de distribution et plusieurs clients dispersés géographiquement. Le modèle vise à optimiser deux objectifs principaux à savoir : la minimisation du coût total de la chaîne logistique et la maximisation du niveau du service fourni par le fournisseur lors de la livraison des matières premières. Le modèle prend en considération plusieurs contraintes techniques.

Le deuxième objectif de recherche concerne la gestion de l'incertitude par l'intégration et l'optimisation de la chaîne logistique sous incertitude. Pour ce faire, les contraintes et les fonctions objectifs ont été étudiées, sous des conditions incertaines, en utilisant la programmation mathématique floue et une approche de programmation basée sur la théorie de crédibilité.

Le troisième objectif de recherche concerne la résolution de la complexité du réseau logistique par la résolution du modèle d'optimisation même pour les grandes structures logistiques en utilisant les métaheuristiques. Dans ce sens, une nouvelle métaheuristique nommée (*HGSCS*) a été

proposée. En effet, elle se base sur le développement de la métaheuristique nommée (*Hunger Games Search HGS*) par le processus de la recherche chaotique (*Chaotic Search*).

### **3. Méthodologie suivie**

La méthodologie de recherche est basée sur une étude critique de l'état d'art afin de constituer une vision globale sur l'évolution de la chaîne logistique et leurs défis majeurs. Par la suite trois défis majeurs ont été sélectionnés à l'aide d'une méthodologie rigoureuse. Durant ce projet, nous avons appliqué les solutions développées sur une étude de cas pratique dans le domaine du textile. Les solutions restent valables sur tous les types de chaînes logistiques similaires, contenant plusieurs fournisseurs, plusieurs sites de production, plusieurs centres distribution et plusieurs clients. Aussi valable pour les chaînes logistiques à gestion centralisée ou bien décentralisée que ce soit dans le domaine de textile ou d'autres domaines. Le chapitre II, propose une modélisation mathématique de la chaîne logistique répondant principalement aux défis relatifs à la flexibilité et l'intégration des fonctions principales de la chaîne logistique. Le chapitre III tente de porter des réponses aux défis relatifs à l'incertitude au cours de toute la chaîne logistique. Le dernier chapitre propose une solution répondant aux défis de complexité et la dispersion géographiques des acteurs de la chaîne logistique.

### **4. Organisation de la thèse.**

Cette thèse a été réfléchié selon une organisation qui s'articule autour de quatre chapitres correspondants au cheminement de notre démarche scientifique :

**Chapitre I :** présente le contexte général de notre étude. Une étude bibliographique et diachronique, sur les progrès de la chaîne logistique et les défis qui s'y rapportent, a été faite de façon minutieuse tant que possible. Trois défis majeurs ont été sélectionnés, par la suite, grâce à une méthodologie rigoureuse à savoir : la flexibilité et l'intégration de la chaîne logistique, la gestion de l'incertitude et les événements incertains susceptibles de perturber le déroulement normal de la chaîne logistique et la complexité des réseaux logistiques.

**Chapitre II :** propose un nouveau modèle multi-objectifs intégrant l'approvisionnement, la production, et la distribution, au niveau tactique tout en tenant compte des contraintes techniques de la production, du transport et de la logistique. Le modèle proposé vise, sous différentes contraintes, à minimiser le coût total de la chaîne logistique et à maximiser le niveau de service



offert par le fournisseur pour livrer de la matière première escomptée. La résolution du modèle a été appliquée sur une entreprise de textile.

**Chapitre III** : essaie de dresser le pont nécessaire entre la théorique et la pratique, ainsi il rapproche le modèle proposé de la réalité industrielle incertaine. En réalité, une chaîne logistique est toujours exposée à des événements incertains, tels que les grèves, les pandémies et les forces majeures... Pour qu'une chaîne logistique assume ces perturbations, ce chapitre, montre comment il faut rester attentif et vigilant vis-à-vis des paramètres incertains qui puissent être perturbés dans la réalité en recourant à la modélisation de la chaîne logistique sous incertitude. Le modèle proposé en se basant sur la théorie de crédibilité, a montré une performance élevée et les résultats ont pu satisfaire les objectifs stratégiques de l'entreprise étudiée. En revanche, la solution proposée reste valable pour les petites et les moyennes structures logistiques composées.

**Chapitre IV** : résout le modèle proposé dans le troisième chapitre, en prenant en considération les grandes structures logistiques. Pour trouver une solution optimale sur des grandes instances, une nouvelle métaheuristique nommée (*HGSCS*) a été développée dans ce chapitre. La nouvelle métaheuristique est basée sur le développement de la métaheuristique nommée (*Hunger Games Search HGS*) par le processus de la recherche chaotique (*Chaotic Search*). Finalement, le chapitre IV compare la solution proposée avec les meilleures métaheuristicues dans la littérature.

La fin de ce projet donne sur une conclusion générale synthétisant nos principales contributions et suggère les perspectives possibles qui peuvent faire l'objet des études futures.

Le schéma synoptique suivant (voir figure 1), décrit les paramètres de nos modèles de modélisation et l'organisation de ce manuscrit

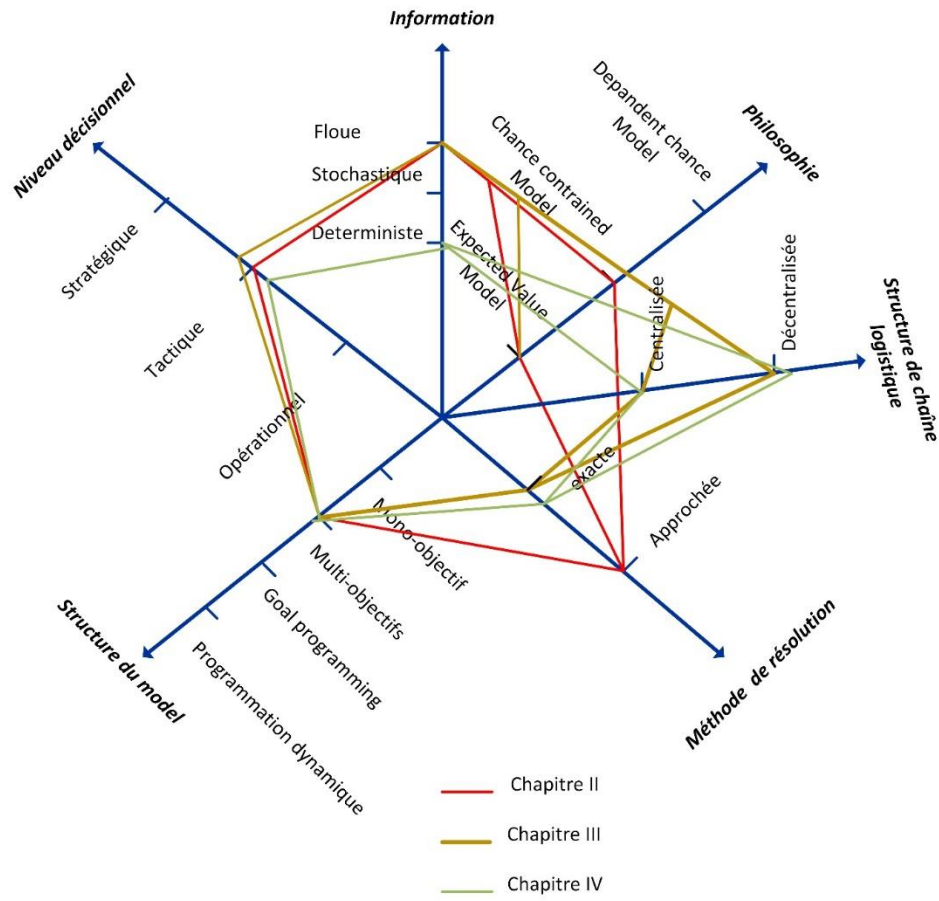


Figure 1 : les paramètres des modèles de modélisation utilisés dans la thèse

## Liste de publication

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A,** " Smart Supply Chain: An Overview of Key Benefits and Challenges" *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2022. Vol. 3, pp.1060–1068, doi:10.1007/978-3-030-90633-7\_93.

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A** "A multi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of supply chain network" *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2022. Vol. pp.1019–1035, doi: 10.1007/978-3-030-90639-9\_83.

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A** "Improved meta-heuristic for multi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of supply chain network under fuzziness uncertainties". *Journal of Computer Science*, 2021, 17(12), pp.1196–1209, doi:10.3844/jcssp.2021.1196.1209.

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A,** "A multi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of supply chain network under fuzziness uncertainties". *Scientific Journal of Maritime Research*, 2021, 35(2), pp.191–206, doi.10.31217/p.35.2.1.

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A,** "A multiobjective integrated procurement, production, and distribution problem of supply chain network under fuzziness ". *IFAC-PapersOnLine*, 2021. Vol. 54, no 1, p. 1104-1111, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.130.

**FRI, F. FEDOUAKI, F. DOUAILOU, K. MABROUKI, C. & SEMMA, E. A** "Supply chain performance evaluation models, state-of-the-art and future directions". *Int. J. Eng. Adv. Technol*, vol. 9, no 1, p. doi: 6336-6347, 2019.

**DOUAILOU, K., FRI, M., MABROUKI, C., & SEMMA, E. A.** "The interaction between industry 4.0 and smart logistics: concepts and perspectives". *2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, (2018). doi:10.1109/logistiqua.2018.8428.

# Chapitre I : Cadre conceptuel et thématique de recherche.

## 1. Introduction.

S'approvisionner à temps, à moindre coût et avec assurance constitue l'une des équations les plus complexes que toutes les entreprises de production ou même de service doivent résoudre au quotidien. Donc pour optimiser ce processus, il faut mûrir les stratégies et garantir la fluidité des échanges à l'intérieur comme à l'extérieur de la chaîne logistique. Cela doit être fait, à travers l'intégration de toutes les parties prenantes de la chaîne logistique. Dans ce sens, le présent chapitre présente une analyse de littérature afin de déterminer des défis qui freinent la réussite de l'optimisation et l'intégration globale de la chaîne logistique. Ce chapitre aidera à positionner le travail de cette thèse dans le vaste domaine de recherche. Ainsi la structure globale, du présent chapitre, est représentée sous forme d'un graphe décrivant la succession des idées de recherche (voir Figure 2).

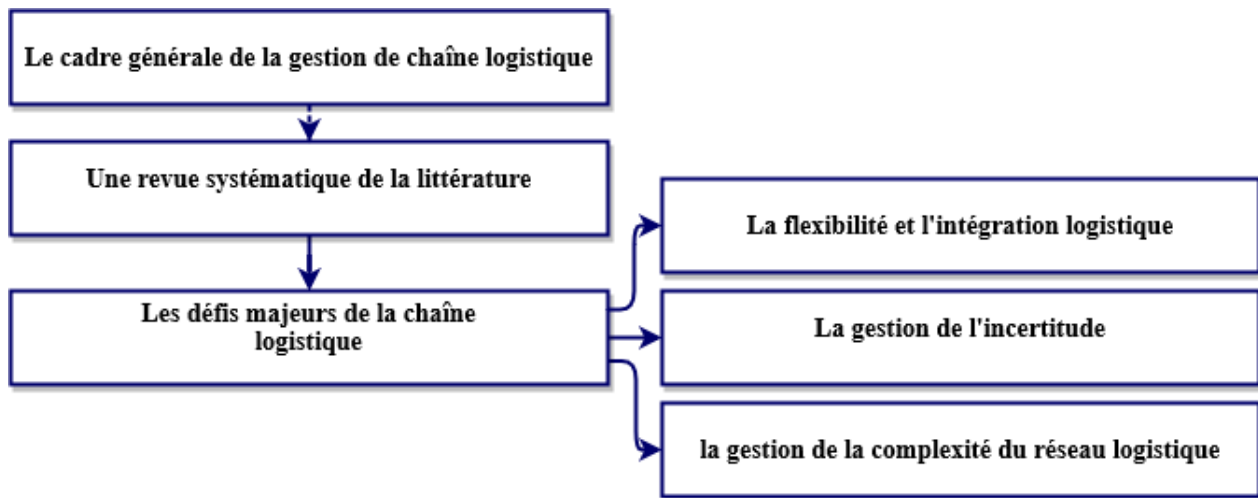


Figure 2: La structure du chapitre I

## 2. Cadre général de recherche et revue de littérature.

### 2.1. Revue littérature de la gestion de chaîne logistique

### 2.2. Définition de la chaîne logistique.

La chaîne logistique n'a ni une définition ni une structure universelle. En effet, la chaîne logistique est considérée comme un réseau d'installations qui assurent les fonctions d'approvisionnement de matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits

finis, et de distributions des produits finis vers les clients[2]. Ainsi, la chaîne logistique est perçue d'une vision plus opérationnelle qui insiste sur les fonctions nécessaires à la fabrication du produit. Pour d'autres travaux [3], la chaîne logistique concerne l'ensemble d'entreprises, qui participent à la fabrication d'un produit, en transmettant des matières depuis son acheminement jusqu'à l'utilisateur final. En effet, les entreprises de la chaîne logistique sont considérées comme des entités indépendantes de la chaîne logistique, et la relation entre ces entités constitue généralement à la notion de la chaîne logistique [4]. Dans le même sens, d'autres auteurs [5] considèrent la chaîne logistique comme un système qui englobe des sous-traitants, des producteurs, des distributeurs, des détaillants et des clients. Tous ces acteurs échangent, entre eux, des flux de matières allant depuis les fournisseurs vers les clients et des flux d'information allant dans les deux sens. Cette définition met en évidence la notion de flux matière et d'information en définissant une chaîne logistique comme un réseau. La chaîne logistique représente "Un réseau global d'organisations qui coopèrent pour réduire les coûts et augmenter la vitesse de la circulation des flux logistique au sein de la chaîne logistique" [6]. Cette notion de la chaîne logistique intègre l'évolution concurrentielle du marché en exigeant une amélioration de la performance globale. Elle implique aussi l'importance de l'aspect coopératif pour atteindre de meilleurs résultats globaux, et donc la nécessité de mettre en œuvre un processus de partage des informations au sein de la chaîne logistique. De plus, toutes les entreprises partenaires dans le même réseau de la chaîne logistique interagissent pour rester compétitifs et satisfaire les besoins du consommateur [7][8]. Ainsi, cette interaction facilite la cocréation de la valeur avec les clients, ce qui peut être particulièrement pertinent dans le cadre des événements incertains [9]. En fait, cette dernière perspective des événements incertains de la chaîne logistique survient dans les milieux académiques et professionnels en tant que pilier fondamental de la durabilité à long terme en abordant des préoccupations sociales et environnementales.

### **2.3. Générations la chaîne logistique.**

L'origine de la chaîne logistique se date après la Seconde Guerre mondiale [10]. En effet, elle a commencé par la gestion des produits et la gestion de la distribution physique. Actuellement, la chaîne logistique est en pleine mutation, vu la concurrence acharnée, qui pousse plusieurs organisations à coopérer entre elles afin de pouvoir survivre dans des conditions complexes et incertaines. Ainsi, les étapes importantes dans l'histoire de l'évolution de la chaîne logistique sont [11]:

- a. La première génération (chaîne logistique 1.0) : qui concerne une logistique non formalisée où les organisations gèrent leurs activités d'une manière traditionnelle, les managers ne considèrent pas la relation entre les partenaires comme un levier stratégique.
- b. La deuxième génération (chaîne logistique 2.0) : qui caractérise les chaînes logistiques qui sont principalement basées sur la communication en utilisant les papiers avec un faible niveau de numérisation. Les capacités numériques du réseau logistique sont très limitées et les données disponibles ne sont pas exploitées pour améliorer les décisions commerciales.
- c. La troisième génération (chaîne logistique 3.0) : qui concerne la chaîne logistique avec des composants numériques et des systèmes informatiques mis en œuvre et exploités afin d'améliorer la relation entre toutes les parties du réseau logistique, mais les capacités numériques étaient encore limitées. Seuls des algorithmes de base sont utilisés pour la planification et la prévision. De plus peu de données scientifiques étaient exploitées pour améliorer sa maturité numérique.
- d. La quatrième génération (chaîne logistique 4.0) : qui concerne la génération actuelle de la chaîne logistique qui exploite toutes les données disponibles le long de la chaîne logistique pour une prise de décision décentralisée plus rapide et plus avancée. De plus, les scientifiques tentent d'améliorer la chaîne logistique, en utilisant des algorithmes complexes de l'intelligence artificielle et des technologies révolutionnaires de l'industrie 4.0.

### **2.3.1. Structures organisationnelles de la chaîne logistique.**

Les structures des chaînes logistiques sont nombreuses en fonction de leurs relations hiérarchiques et fonctionnelles avec leurs collaborateurs. Les structures les plus répandues peuvent être classées comme suit : chaîne logistique de structure dyadique, chaîne logistique de structure en série, chaîne logistique de structure convergente, chaîne logistique divergente, chaîne logistique de structure conjointe et chaîne logistique de structure en réseau.

- a. Dyadique : la structure dyadique (voir Figure 3 ), se compose de deux entités commerciales (par exemple, acheteur-vendeur) [12].

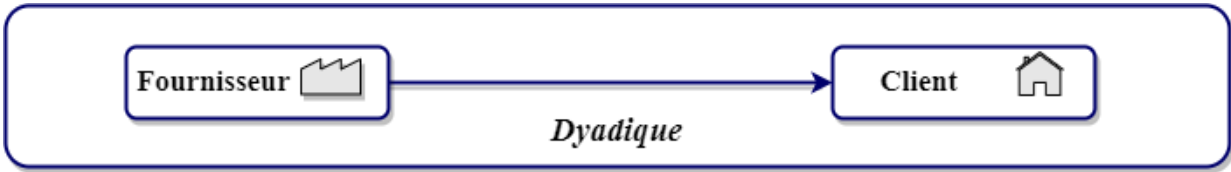


Figure 3:Chaîne logistique de structure dyadique

- b. Série : la cascade de plusieurs structures dyadiques forme une structure de chaîne logistique en série (voir Figure 4), généralement, elle se compose de : Fournisseur, fabricant, grossiste, distributeur, détaillant et client [12].



Figure 4:Chaîne logistique de structure en série

- c. Convergente : dans les structures convergentes (voir Figure 5)chaque nœud (ou installation) de la chaîne a au plus un successeur, mais peut avoir n'importe quel nombre de prédécesseurs [13]. Par exemple, si l'entreprise considérée est un constructeur de voitures, ses fournisseurs de rang 1 sont des équipementiers tels que la carrosserie, les sièges, le parebrise, les fournisseurs de rang 2, par exemple pour les sièges, sont les fournisseurs de matériaux textiles, ...

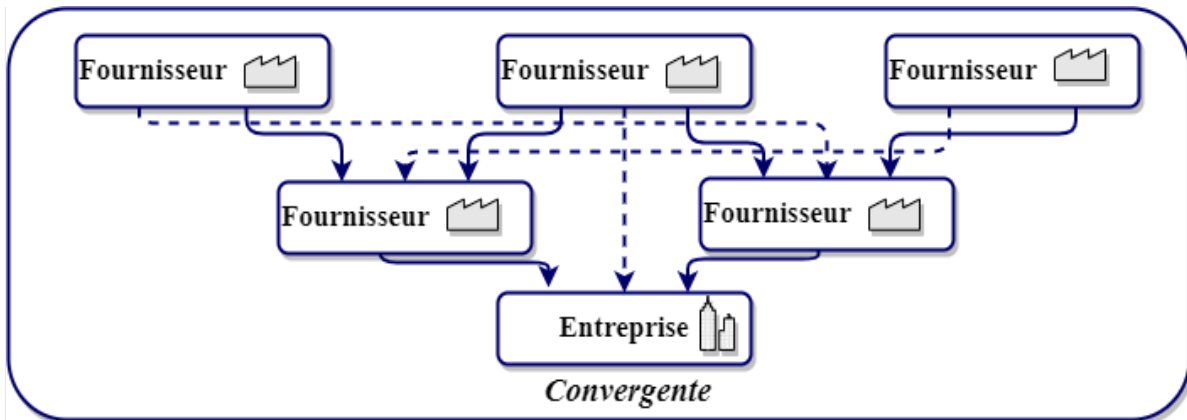


Figure 5 Chaîne logistique de structure convergente

- d. Divergent : dans les structures divergentes (voir Figure 6), chaque nœud a au plus un prédécesseur, mais un nombre quelconque de successeurs [13]. Une structure divergente peut être représentée par une chaîne logistique dans laquelle un fournisseur distribue des stocks à ses différentes entités en aval. Les organisations de traitement des minéraux ont tendance à avoir une structure divergente. Le cas est fréquent dans l'industrie électronique. Si l'entreprise

considérée est un fournisseur de cristaux de silicium. Les clients de rang un sont des constructeurs de puces, les clients de rang deux sont des constructeurs de circuits intégrés, enfin, les clients de rang trois sont, par exemple, les assembleurs de téléphones mobiles.

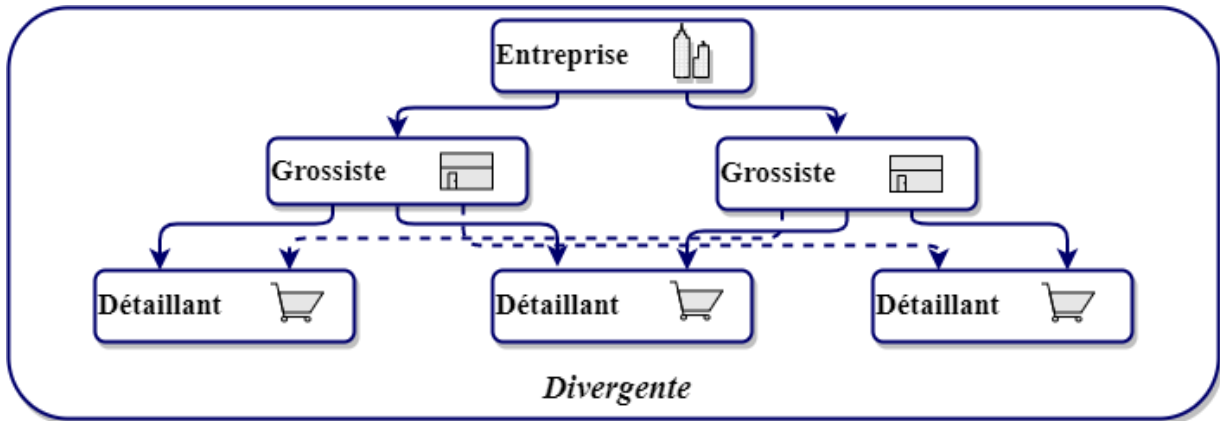


Figure 6:Chaîne logistique de structure divergente

- e. Réseau : les structures relèvent de la catégorie du réseau. C'est une structure complexe (voir Figure 7) [14], comme l'exemple des chaînes logistiques de fabrication électronique. Généralement, la topologie des chaînes logistiques réseau est la plus répandue avec des ramifications plus ou moins grandes. Ainsi, certaines chaînes logistiques peuvent s'avérer très étendues, en particulier pour des produits complexes. Pour les grands réseaux des chaînes logistiques il y a deux catégories d'acteurs : i) des membres essentiels qui sont des acteurs industriels majeurs contribuant à l'élaboration du produit. ii) des membres secondaires tels que les consultants, les banques, et les partenaires de recherche. Donc, afin d'améliorer la performance globale de la chaîne logistique, les chercheurs [15][16] proposent de se concentrer sur les membres essentiels et sur quelques relations uniques



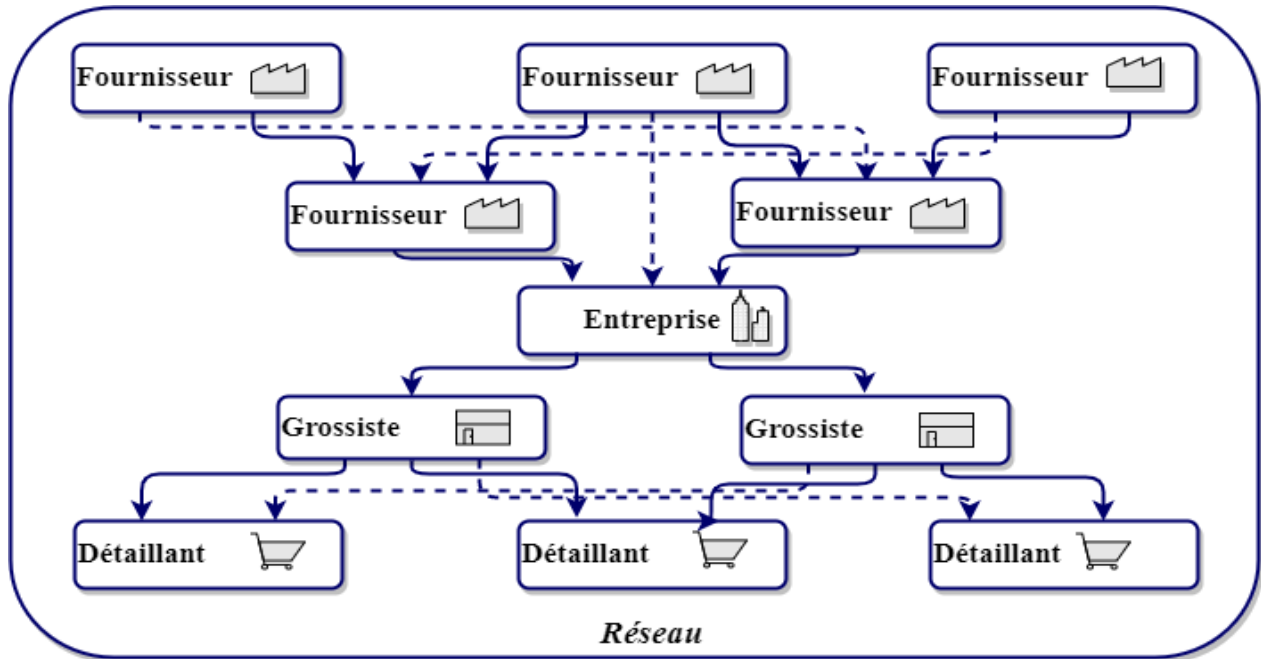


Figure 7: Chaîne logistique de structure en réseau.

### 2.3.2. Structures décisionnelles de la chaîne logistique.

La gestion de la chaîne logistique dépend généralement de sa structure organisationnelle. Parmi les structures décisionnelles relevées par les chercheurs [17], il y a la structure décisionnelle centralisée et la structure décisionnelle décentralisée.

#### 2.3.2.1. Structure centralisée.

La structure décisionnelle « centralisée » concerne le cas où un seul centre de décision central contrôle les autres entités de la chaîne logistique à travers la gestion de toutes les informations et toutes les décisions [17][18]. Les chaînes logistiques à décision centralisée sont rencontrées dans les deux cas suivants :

- a. Un acteur extérieur qui gère toutes les informations utiles à la prise de décision. Puis, il diffuse les résultats de son traitement (calcul de besoin, plan d'approvisionnement ou programme directeur de production) sur tous les acteurs de la chaîne logistique.
- b. Un pilote considéré comme un leader, au sein de la chaîne logistique, remplit le rôle de regroupement de toutes les informations utiles à la prise de décision. Dans une telle structure de décision, l'entité de décision centrale peut s'appuyer sur des méthodes analytiques pour fournir des décisions relatives à l'optimisation des activités de chaque entité, en tenant compte de l'intérêt collectif. Cependant, la structure décisionnelle centralisée paraît de moins en moins

adaptée au fait de la complexité et l'internationalisation accrue des chaînes logistiques. Dans ce contexte, l'entité centrale doit traiter et analyser une quantité d'informations très importante. La moindre défaillance ou erreur lors de l'échange d'information entre le centre pilote et les entités, engendre des dysfonctionnements néfastes au niveau de toute la chaîne logistique.

#### **2.3.2.2. Structure décentralisée.**

Au niveau des structures décentralisées[19][20][21], chaque entité est responsable de son propre développement et de ses propres décisions de recherche optimales locales. Ainsi, une entité n'assure que les décisions prises au niveau local. De telles structures décisionnelles sont adoptées souvent quand les entreprises sont juridiquement indépendantes. Pour assurer un pilotage cohérent au sein de ce type de chaînes logistique, l'échange d'information en temps réel est crucial [17][22]. La structure décentralisée diminue généralement la quantité des informations traitées dans chaque centre de décision et préserve les contraintes d'autonomie locale. Cependant, la flexibilité et la rapidité des structures décentralisées face aux changements de l'environnement, sont généralement pénalisées par les conflits d'intérêts qui peuvent apparaître entre les différentes entités [23][24]. Les structures décentralisées se résument en deux types :

- a. Structure pointe à point : cette structure est considérée comme un cas particulier des chaînes logistiques décentralisées. La communication et l'échange d'informations concernent uniquement l'entreprise avec ses partenaires directs (clients et fournisseurs). Dans le cas de l'industrie manufacturière, ce type de coordination se fait à travers différentes méthodes comme le MRP/MRP II, le DRP ou le Juste-à-Temps.
- b. Mode coopératif : les entreprises mettent en place un partage des informations et des ressources dans le cadre des relations de coopérations verticale et horizontale conformément aux démarches dites ECR ou QR.

#### **2.3.3. Processus supports de la chaîne logistique.**

Afin de prendre des décisions cohérentes sur l'ensemble des maillons de la chaîne logistique, tous les processus clés de toutes les entreprises partenaires doivent interagir et communiquer entre eux. Par exemple, le processus « Vente » doit communiquer régulièrement les demandes des clients au processus « Approvisionnement » pour que celui-ci prépare les achats. Les processus « Production » et « Distribution » doivent suivre les niveaux de stocks (composants, encours) dans

les différents entrepôts et renseigner le processus approvisionnement. Les processus « Approvisionnement », « Production » et « Distribution » doivent aussi coordonner pour la régulation des niveaux des stocks et notamment pour la détermination des stocks de sécurité afin de faire face aux aléas de la production et à l'incertitude liée à la demande (prévisions). Ainsi, la coordination entre ces processus est fondamentale pour l'intégration de toute de la chaîne logistique. À l'évidence, dans une relation client-fournisseur, le processus « Vente » de l'entreprise(fournisseur) est en relation directe avec le processus « Achat » de l'entreprise (client). Et c'est justement ce lien, dans l'histoire de l'économie, qui s'est étendu à un partenariat multi-entreprises, et qui est à l'origine de la notion de chaîne logistique.

#### ***2.3.3.1. Processus d'approvisionnement.***

Le processus approvisionnement s'intéresse au traitement de tous les composants nécessaires à la fabrication. Il se divise en deux grandes phases qui sont :

- a. La première phase consiste à sélectionner les fournisseurs de la chaîne logistique. Le choix des fournisseurs peut être fait selon différents critères, par exemple la qualité, le prix, les délais de réapprovisionnement des matières premières ou composants, et aussi leur capacité de production, leur facilité à accepter une demande très variable, leur pouvoir d'évoluer techniquement.... Il est possible de sélectionner un ou plusieurs fournisseurs par produit, pour minimiser le risque de rupture de livraison.
- b. La seconde phase du processus d'approvisionnement consiste à passer les commandes aux fournisseurs en fonction du plan production. Il s'agit aussi de vérifier que ces composants sont livrés dans de bonnes conditions, c'est-à-dire de vérifier que la livraison comporte les bons composants, de qualité requise, en quantité conforme et au bon moment. Le processus d'approvisionnement regroupe ainsi toutes les relations avec les fournisseurs pour assurer les niveaux de stocks en composants nécessaires et suffisants pour la fabrication.

#### **2.4. Processus de production**

Le processus production concerne l'ensemble des transformations subies par les matières premières pour réaliser les produits finis de l'entreprise. L'objectif du processus production est de créer la valeur ajoutée avec un taux optimal d'utilisation des ressources mobilisées. Les méthodes, utilisées pour la gestion de la production, visent à améliorer le flux des produits dans les lignes de

production. Par exemple , à travers la planification et l'ordonnancement[30][31], la détermination de la taille optimale des lots de production et la détermination des séries économiques[27][28]. Dans ce sens, plusieurs approches ont été développées dans le but de réduire la complexité de la gestion de l'incertitude des informations et des données utilisées [29], à travers des modèles mathématiques de prévisions.

#### **2.4.1.1. *Processus de distribution.***

Le processus de distribution gère les livraisons des produits finis aux clients en respectant les conditions d'optimisation de la distribution. En effet, il s'intéresse par exemple : à l'organisation et le choix du moyen de transport, au choix des intermédiaires, ainsi que le positionnement des entrepôts et leur mode de gestion pour une meilleure synchronisation entre qualité de service et coût économique.

#### **2.4.1.2. *Processus de vente.***

Le processus de vente, est mis en œuvre par le service commercial. Il concerne la gestion des relations avec les clients, la négociation des prix et les délais, l'étude des publicités et des promotions. Il s'intéresse aussi à l'étude du marché. En effet, il traite la demande prévisionnelle en intégrant des aspects commerciaux tels que la durée de vie du produit pour anticiper à l'évolution des ventes.

### **2.5. Flux logistique de la chaîne logistique.**

La chaîne logistique doit gérer ses flux logistiques afin de réussir l'intégration de l'ensemble de ses parties prenantes. Les flux logistiques majeurs sont : le flux d'information, le flux physique et le flux financier. Ces trois flux peuvent découler des règles stipulées dans le contrat de partenariat. Ces contrats définissent les limites et les droits entre les différentes entités de la chaîne logistique.

#### **2.5.1.1. *Flux d'information.***

Le flux d'information concerne l'ensemble des transferts ou des échanges des données entre les différents acteurs de la chaîne logistique. Il s'agit en premier lieu des informations commerciales, notamment les commandes passées entre clients et fournisseurs. Le flux d'information est devenu très rapide grâce aux progrès des technologies de l'industrie 4.0. En revanche, les risques liés à la confidentialité et à la sécurité des flux d'information au sein de la chaîne logistique sont les problèmes qui préoccupent les gestionnaires des chaînes logistiques.

### **2.5.1.2. Flux physique.**

Les flux physiques concernent les marchandises transportées depuis les matières premières jusqu'aux produits finis en passant par les divers stades de produits semi-finis. Il conditionne l'organisation des différents sites avec leurs ressources de production, les moyens de transport pour relier ces sites et les espaces de stockage nécessaires pour pallier les aléas et faire tampon entre deux activités successives. En bref, l'écoulement des flux physiques concerne principalement la mise en œuvre des diverses activités de manutention et de transformation des produits. Ces flux sont généralement considérés comme étant les plus lents par rapport aux autres flux logistiques.

### **2.5.1.3. Flux financier.**

La gestion des flux financiers englobe toute opération visant l'échange ou bien la gestion des flux monétaires à savoir : le vente ou l'achat des produits, des composants. etc. Les flux financiers sont généralement gérés de façon centralisée.

## **2.6. Gestion de la chaîne logistique.**

### **2.6.1. Définition de la gestion de la chaîne logistique.**

Une chaîne logistique existe quand deux entreprises collaborent pour assurer le bon acheminement d'un produit donné. La notion de la gestion de la chaîne logistique est apparue, lorsque l'association des entreprises est pilotée en vue de maximiser la performance globale de toutes les entreprises partenaires. La littérature relève plusieurs définitions de la gestion de la chaîne logistique [30]. Pourtant, il n'existe pas une seule définition générique. Dans ce sens *Council of Supply Chain Management Professionals* en 2019 : « la profession de la gestion de la chaîne logistique a progressivement évolué pour répondre aux besoins, économiques et industriels mondiaux, en pleine croissance. La chaîne logistique couvre un large éventail de disciplines, ce qui fait que sa définition peut ne pas être claire ». Ainsi la gestion de la chaîne logistique concerne la planification et la gestion de toutes les activités impliquées dans l'approvisionnement, la production et ainsi que dans la logistique. La gestion de la chaîne logistique inclut également la coordination et la collaboration avec les partenaires de distribution, qui peuvent être des fournisseurs, des intermédiaires, des prestataires de services tiers ou même des clients. En effet, la gestion de la chaîne logistique est un art d'intégration et l'optimisation de toutes les activités de la chaîne logistique dans un processus continu. Cet art se base sur l'utilisation des technologies permettant

de consolider les informations sur les demandes du marché et les échanger entre les organisations partenaires.

L'ensemble des processus de la chaîne logistique doit être géré comme un système unique. La performance de chaque membre de la chaîne logistique affecte la performance globale de toute la chaîne logistique. Ainsi, la communication entre les acteurs reste capitale pour la circulation efficace des flux logistiques dans l'ensemble de la chaîne logistique.

### **2.6.2. Problèmes de décision dans la gestion de la chaîne logistique.**

La bonne coordination entre l'ensemble des activités et les processus du réseau, est reliée au traitement des problèmes de décisions relatives à chaque niveau de décision dans la chaîne logistique.

#### **2.6.2.1. Problèmes de décision au niveau stratégique.**

Ces décisions sont prises par la direction générale concernant des projets et des sites de production. Ils sont des orientations sur le long terme varie de 6 mois à plusieurs années. En pratique, il y a des problèmes de décision propre à ce niveau. Selon la littérature ces problèmes sont divisés en quatre parties [10] :

- a. La partie « Objectifs stratégiques » : concerne la détermination des objectifs pour l'ensemble des parties prenantes (partenaires).
- b. La partie « Conception » : concerne la conception ou la configuration, telles que la détermination de la structure de la chaîne, sa topologie, ainsi que la sélection des parties prenantes ...etc.
- c. La partie « Développement d'avantages compétitifs » : concerne l'analyse, le développement et l'amélioration de la compétitivité de la chaîne logistique.
- d. La partie « Évolution historique » : se focalise sur l'évolution des stratégies des entreprises par rapport à la stratégie globale de chaîne logistique.

#### **2.6.2.2. Problèmes de décision au niveau tactique.**

Les décisions tactiques concernent les décisions à moyen terme qui varient de quelques semaines à quelques mois. La mise en place de ces décisions aide au déploiement de la stratégie globale de l'entreprise. Les décisions de ce niveau sont prises par le responsable de la production et les chefs des ateliers. Elles portent sur les problèmes liés à la gestion des ressources de l'entreprise, en

particulier la planification relative aux produits ou à la famille de produits. Pratiquement, il y a des problèmes des décisions propres à ce niveau. Selon la littérature les problèmes tactiques sont classés en quatre parties[10]:

- a. La partie « Développement des relations interentreprises » : que celles-ci soient bilatérales ou multilatérales, horizontales ou verticales.
- b. La partie « Gestion des opérations intégrées » : concerne la gestion des activités des entreprises pour garantir l'efficacité globale de la chaîne logistique.
- c. La partie « Gestion des systèmes collectifs de transport et de distribution ».
- d. La partie « Développement des systèmes d'information »: cherche à améliorer l'échange des informations dans le cadre des objectifs stratégiques.

### **2.6.2.3. Problèmes de décision au niveau opérationnel.**

Les décisions au niveau opérationnel sont limitées dans l'espace et le temps. Elles sont prises par les chefs d'équipe et éventuellement les opérateurs de production [31]. À ce niveau, les décisions tactiques génèrent un plan détaillé de production. En pratique, il y a des problèmes des décisions propres à ce niveau. Selon la littérature ils sont classés en quatre parties [10] :

- a. La partie « Contrôle et gestion des stocks et des flux physiques ».
- b. La partie « Coordination de la planification de la production ».
- c. La partie « Partage des informations opérationnelles ».
- d. La partie « Développement des outils de pilotage opérationnel ».

## **2.7. Quatrième révolution industrielle et logistique.**

### **2.7.1. Quatrième révolution industrielle.**

Les entreprises manufacturières doivent constamment assurer l'évolution permanente de leurs systèmes de production et s'adapter à la demande changeante du marché [32], afin de rester compétitives dans un environnement industriel qui change en permanence. Ce changement continu, impacte fortement le cycle de vie des produits [33]. Vu ces circonstances, l'objectif de l'ensemble des organismes et des entreprises dans le monde entier est la mise en pratique d'un nouveau concept industriel nommé l'industrie 4.0. Le concept de l'industrie 4.0 est largement reconnu dans le monde

depuis son introduction en 2011 à *Hannover Industrial Expo* [34]. Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 sont les technologies intelligentes, tel que : l'internet des objets, le système *cyberphysique*, le *Cloud Computing*, le *Big Data*, la réalité virtuelle et la réalité augmentée, l'impression 3D et l'intelligence artificielle. L'importance apportée par les chercheurs et les praticiens à l'implémentation de ces innovations dans les organismes est justifiée par l'ensemble des avantages offerts par ces innovations. Ainsi, elles peuvent affecter toutes les disciplines et tous les secteurs industriels par exemple : la flexibilité et l'agilité, l'efficacité, la productivité et la réduction des coûts.

### **2.7.2. Impact de la quatrième révolution industrielle sur la chaîne logistique.**

La stratégie de l'industrie 4.0 peut révolutionner les systèmes et les processus de fabrication mondiale, elle peut conduire aussi à la gestion intelligente de la chaîne logistique [35][37][38][39]. L'industrie 4.0, dans sa vision ne peut devenir une réalité que si la logistique est en mesure de fournir, aux systèmes de production, les facteurs d'entrée nécessaires au bon moment, dans la bonne qualité et au bon endroit. L'impact de l'industrie 4.0 sur les chaînes logistiques 4.0 se manifeste principalement dans des données importantes provenant de différents maillons de la chaîne logistique. Ces données peuvent être utilisées pour prendre en temps réel des décisions efficaces. Les informations collectées, à partir des produits, des opérations logistiques et des machines de fabrication, deviennent facilement disponibles dans le monde physique et numérique. Ces données aideront à améliorer les produits et les services par rapport aux alternatives actuelles. Ainsi, le composant intelligent de l'industrie 4.0 rend les produits « identifiables de manière unique » et « rend la complexité croissante des processus de fabrication gérable » [40]. De ce fait, l'industrie 4.0 sera apte à transformer la chaîne logistique traditionnelle en une chaîne logistique 4.0 c'est-à-dire intelligente.

Ainsi, la mise en pratique d'une industrie 4.0 ne peut réussir sans un système logistique adaptatif. La chaîne logistique 4.0 doit être flexible et agile comme les systèmes de production 4.0. C'est de cette manière que la chaîne logistique peut générer de la valeur pour le client à l'avenir en fournissant un bon produit, au bon moment, au bon endroit, et avec la bonne quantité et la bonne qualité.



### **3. Problématique de recherche.**

#### **3.1. Quatrième révolution logistique**

La chaîne logistique intelligente est devenue, actuellement, le centre de nombreux projets de recherche et développement qui visent à suivre, à surveiller et à prévoir les progrès des solutions logistiques futures [33]. Mais, jusqu'à aujourd'hui, il n'y a pas une définition unique pour la chaîne logistique intelligente dans la littérature [41]. Selon McFarlane [42], la chaîne logistique intelligente est liée à la planification et au contrôle par des outils, des moyens et des méthodes intelligentes. Ainsi, le degré d'intelligence de la chaîne logistique dépend des applications et des méthodes utilisées depuis la traçabilité des produits et l'identification des éléments de son environnement jusqu'à la détection du problème, le choix et l'exécution automatique de la solution. La chaîne logistique 4.0 est un système intégré complet des technologies et des théories de gestion pour la réalisation d'une chaîne logistique intelligente et automatisée [43]. Le premier objectif de la chaîne logistique intelligente est d'absorber les risques et les incertitudes dans la chaîne logistique et de parvenir à une intégration transparente entre l'approvisionnement, la planification, la production, la logistique et la distribution. Le terme « chaîne logistique 4.0 », est lié à l'application de certains concepts de l'industrie 4.0 dans la chaîne logistique, afin d'avoir une bonne la planification et une meilleure satisfaction de la demande [44]. Uckelmann [45] définit la chaîne logistique intelligente comme une chaîne logistique qui se base sur l'utilisation des produits intelligents et sur des services intelligents, pour obtenir des informations. Le traitement de ces informations facilitera la surveillance et le contrôle de toute la chaîne logistique en temps réel.

##### **3.1.1. Sélection des défis de la chaîne logistique 4.0.**

La détermination des défis qui freinent le développement de la chaîne logistique 4.0, aidera les gestionnaires lors de la mise en place de cette nouvelle génération de la chaîne logistique et permettra d'enrichir davantage la littérature. Dans cet objectif, une méthode de revue systématique de la littérature [46] a été adoptée pour organiser le processus de recherche.

###### ***3.1.1.1. Présentation des étapes de la méthode.***

La méthode de revue systématique de la littérature se compose de trois étapes [46] (voir Figure 8).

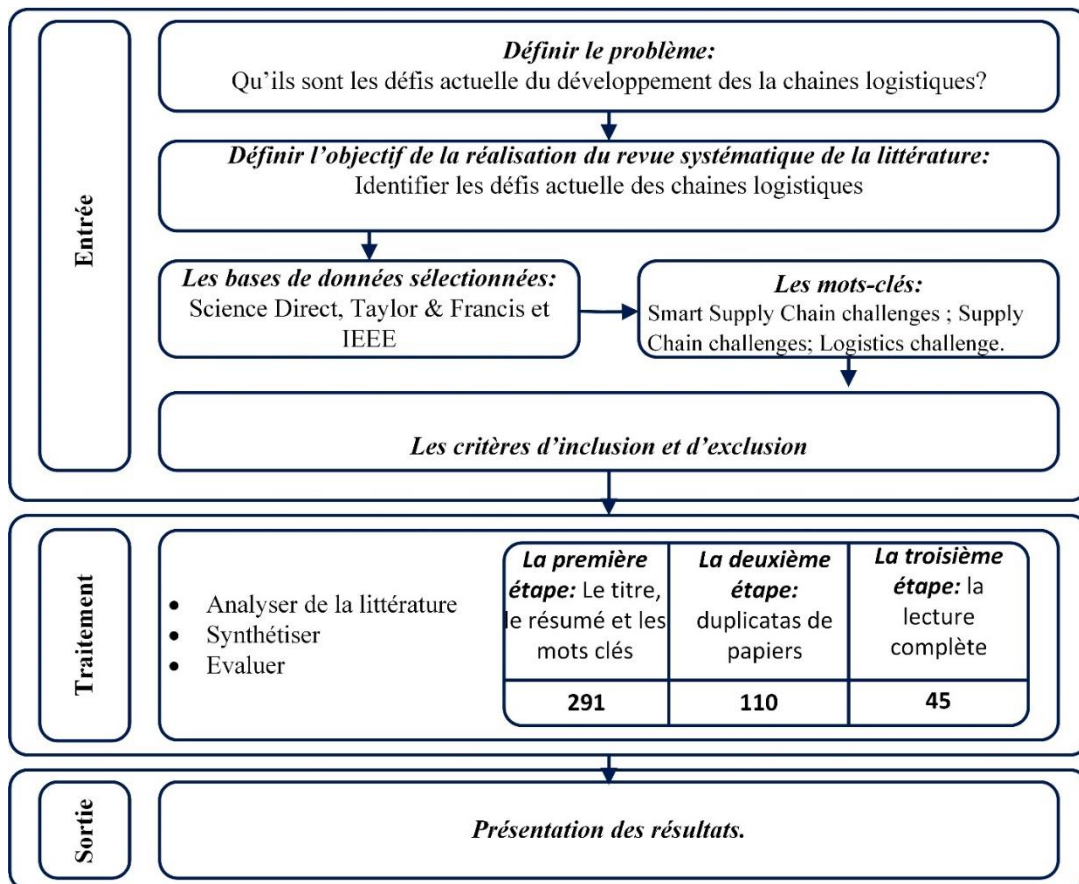


Figure 8: Processus de revue systématique de la littérature.

a. Première étape du processus.

Cette étape concerne le traitement des définitions de recherche, telles que les choix de base de données, les mots-clés recherchés et les critères d'inclusion et d'exclusion des articles. Pour se baser sur les articles pertinents, la recherche s'est focalisée sur quatre bases de données notamment : *Springer, Science Direct, Taylor & Francis et IEEE*. Dans chacune de ces bases de données, quatre groupes de mots-clés ont été utilisés pour couvrir toute la littérature pertinente :

- « Supply Chain 4.0 challenges » ;
- « Smart Supply Chain challenges » ;
- « Digital Supply Chain challenges » ;
- « Supply Chain challenges » ;
- « Logistics challenge » ;

- « Smart logistics challenge » ;

Ensuite, le travail a été analysé sur la base de trois étapes (voir Tableau 1) : la première étape, concerne la sélection selon le titre, le résumé et les mots-clés. La deuxième étape, concerne la sélection selon le duplicata du papier et la troisième étape concerne la sélection après une lecture complète de l'article.

L'analyse d'inclusion ou d'exclusion des articles s'est basée sur deux critères :

- Les articles qui se concentrent sur le thème des défis ou les challenges de la chaîne logistique, se concentrant sur l'examen, la recherche, la discussion ou la solution des problèmes de la chaîne logistique durant les cinq dernières années ;
- Les travaux où les mots-clés utilisés pour les recherches des documents sont au centre du travail, et pas seulement les expressions qui y sont citées.

b. Deuxième étape du processus.

Cette étape est composée de cinq sous-étapes :

- Identifier : identifier les publications et extraire leurs informations essentielles.
- Estimer : estimer l'importance de l'étude réalisée et du résultat présenté.
- Analyser : identifier la pertinence des informations présentées.
- Synthétiser : intégrer les résultats pour comprendre le concept dans son intégralité.
- Évaluer : faire la distinction entre les opinions, les théories et les faits institués de manière empirique.

c. Troisième étape du processus.

Cette étape concerne la présentation des résultats obtenus grâce aux étapes précédentes.

Dans ce sens, après avoir adopté toutes les étapes de la revue systématique, 291 articles ont été identifiés dans les bases de données choisies (voir Tableau 1). Puis ils ont été analysés selon les critères d'inclusion et d'exclusion, vers la fin 45 articles étaient retenus. Ainsi le tableau (voir Tableau 2) présente le nombre des articles sélectionnés.

Tableau 1:Nombre d'articles identifiés dans chaque recherche.

	<i>Supply Chain 4.0 challenges</i>	<i>Smart Supply Chain challenges</i>	<i>Digital Supply Chain challenges</i>	<i>Supply Chain challenges</i>	<i>Logistics challenge</i>	<i>Smart logistics challenge</i>
<b>Science Direct</b>	9	7	7	20	9	9
<b>Taylor &amp; Francis</b>	16	18	5	14	15	12
<b>IEEE</b>	18	23	27	27	24	21

Tableau 2:Nombre d'articles sélectionnés dans chaque étape

<i>La première étape : Le titre, le résumé et les mots-clés.</i>	<i>La deuxième étape : duplicata de papiers.</i>	<i>La troisième étape : La lecture complète.</i>
291	110	45

### 3.1.2. Défis de la chaîne logistique.

Après une analyse préliminaire, il existe sept défis principaux auxquels les gestionnaires sont confrontés lors de la mise en œuvre d'une chaîne logistique 4.0 ou l'amélioration de leurs chaînes logistiques. Ces 7 défis sont : la personnalisation de masse, les défis financiers, la cybersécurité, le développement technologique et numérique, la flexibilité et l'intégration logistique, la complexité et la gestion de l'incertitude. Le tableau (voir Tableau 3) permet de bien comprendre chacun de ces défis.

Tableau 3:Description de chaque défi de la chaîne logistique

<b>Défit</b>	<b>Description</b>
<b>La personnalisation de masse</b>	La personnalisation de masse est perçue comme une extension de la production de masse. Elle implique un niveau de diversité externe important en termes de produits et services et un niveau de diversité interne traduit par la complexité au sein du système productif et de toute la chaîne logistique

<b>Les défis financiers</b>	Dans la chaîne logistique, les contraintes financières sont considérées comme un défi parmi les organisations commerciales pour développer leurs capacités en termes d'équipements et de machines, d'installations et d'innovations durables. Les défis financiers se posent principalement en raison des immenses ressources financières requises pour l'acquisition de nouvelles technologies pour la chaîne logistique. En particulier pour les petites et moyennes entreprises.
<b>La cybersécurité</b>	Les systèmes de la chaîne logistique présentent des vulnérabilités de sécurité inhérentes, qui sont exploitées par les attaquants. La cybersécurité est la protection des données, des actifs et des services. La cybersécurité vise à réduire la probabilité de perte, de dommage, de corruption, de compromission ou d'utilisation abusive à un niveau proportionnel à la valeur attribuée.
<b>Le développement technologique et numérique</b>	La numérisation et l'innovation technologique sont devenues des exigences pour l'amélioration de la chaîne logistique. En fait, l'intégration de la numérisation et de l'innovation technologique sollicitent aux partenaires de la chaîne logistique, un échange et une analyse des données d'une manière plus efficaces. De plus, Industrie 4.0 généralement a une nature interdisciplinaire qui nécessite une numérisation pour connecter différents éléments du réseau logistique.
<b>La flexibilité et l'intégration logistique</b>	La flexibilité et l'intégration de la chaîne logistique représentent sa capacité : de prendre des décisions et d'agir rapidement. Cela inclut la coordination, la collaboration et la transparence entre les membres de la chaîne logistique. La coordination et la collaboration avec les fournisseurs, sont nécessaires pour un meilleur mécanisme de communication et de coordination entre toutes les parties prenantes de la chaîne logistique.
<b>La complexité du réseau logistique</b>	La mondialisation et la libéralisation du commerce international ont augmenté la complexité des chaînes logistiques. Cette complexité

	revient principalement au grand nombre d'acteurs logistique et à leurs dispersions géographiques.
La gestion de l'incertitude	La gestion de l'incertitude concerne la gestion des événements imprévisibles qui perturbent l'interaction des partenaires de la chaîne logistique. L'incertitude de la chaîne logistique est proportionnelle à complexité des réseaux mondiaux de la chaîne logistique.

#### 4. Défis majeurs de la chaîne logistique et perspectives

L'analyse des articles filtrés dans le processus précédent a été classée dans le tableau (voir le Tableau 4), qui présente les nombres des articles publiés dans chaque défi. D'après le graphe (voir Figure 9) qui présente les ratios d'importance relative à chaque défi de la chaîne logistique actuelle, qui ont été générés à partir du tableau 4, il résulte trois défis majeurs (voir Figure 10) qui sont :

- La flexibilité et l'intégration logistique.
- La gestion de l'incertitude.
- La complexité du réseau logistique.

D'après la littérature, il existe des travaux récents, qui ont proposé des pistes de recherches afin de développer des solutions efficaces qui permettent de surpasser les défis déjà cités. En effet, **la flexibilité et intégration logistique** était traitée à travers le développement d'un modèle mathématique qui assure la bonne coordination entre les membres d'une chaîne logistique en supposant que le temps de cycle commun pour tous les acheteurs non identiques. Cela facilite la consolidation des commandes par le vendeur et par la suite par les fournisseurs. De ce fait, la chaîne logistique devient plus **flexible** face au traitement des commandes et aussi dans la réduction des coûts [47]. De plus, la problématique liée à la gestion de l'**incertitude** dans les chaînes logistiques est un sujet de recherche important et vaste [48]. En effet, dans la littérature, plusieurs méthodes ont été suggérées pour faire face aux incertitudes liées au monde réel, y compris l'application de la logique floue dans les problèmes d'optimisation et de modélisation mathématique de la chaîne logistique [49]. Généralement, les problèmes relatifs à la gestion de la chaîne logistique, sont généralement des problèmes NP-difficiles [50], dont la complexité algorithmique constitue toujours une problématique importante pour de très nombreux chercheurs. Cependant, dans la

littérature, plusieurs chercheurs ont proposé divers algorithmes puissants capables de gérer cette complexité, tel que les métaheuristiques[51] [51].

Donc pour faire face à ces défis, le présent travail vise à intégrer les fonctions de la chaîne logistique, au niveau tactique, à travers la modélisation mathématique de la chaîne logistique. Ensuite, pour pouvoir gérer et absorber les risques imprévisibles de la chaîne logistique. Il faut transformer le modèle mathématique déterministe en un modèle conceptuel incertain, dont la méthode de résolution doit être valable pour les petites structures et aussi pour les structures les plus complexes. Dans cette perspective, l'utilisation des métaheuristiques était utile.

Tableau 4:Résultats de la revue systématique de la littérature

Référence	Date	La complexité	Le développement technologique et numérique	La gestion de l'incertitude	La cybersécurité	La flexibilité	La personnalisation de masse	Les défis financiers
[52]	2021	1	1	1	0	1	0	0
[53]	2021	0	1	0	0	1	0	1
[54]	2019	0	1	1	0	1	0	0
[55]	2020	1	0	1	0	0	1	0
[56]	2019	1	0	1	0	1	0	0
[57]	2018	1	1	1	0	0	1	0
[58]	2018	1	0	1	0	1	0	0
[59]	2020	1	1	1	1	1	1	
[60]	2020	1	1	1	0	1	0	0
[61]	2018	0	1	0	0	0	0	1
[62]	2019	0	1	1	0	1	1	1
[63]	2017	0	0	1	1	1	0	0
[64]	2018	1	0	0	0	0	0	0
[65]	2020	0	0	1	1	1	0	0
[66]	2020	0	0	1	1	1	0	0
[67]	2018	1	0	1	0	1	1	0

Référence	Date	La complexité	Le développement technologique et numérique	La gestion de l'incertitude	La cybersécurité	La flexibilité	La personnalisation de masse	Les défis financiers
[68]	2020	0	1	1	0	1	0	1
[69]	2018	1	0	1	0	0	0	0
[70]	2019	1	1	1	0	1	1	0
[71]	2019	0	0	1	1	0	0	0
[72]	2020	0	0	0	1	1	0	0
[73]	2020	0	0	1	0	1	0	0
[74]	2018	1	0	1	0	0	1	0
[75]	2019	1	0	1	0	0	0	0
[70]	2019	1	0	1		0	0	0
[76]	2019	0	0	1	0	0	0	1
[77]	2019	0	0	1	0	0	0	0
[78]	2018	0	0	0	0	0	0	0
[79]	2020	1	0	1	0	1	0	0
[80]	2019	1	0	1	1	0	0	0
[81]	2021	1	0	1	0	0	0	0
[82]	2018	1	0	1	0	0	0	0
[83]	2019	1	0	1	1	0	0	1
[84]	2019	0	0	1	1	0	0	0
[85]	2019	0	0	1	1	1	0	0
[86]	2019	1	0	0	0	0	0	0
[87]	2018	1	1	0	0	0	0	0
[88]	2018	0	1	0	1	0	0	0
[89]	2019	1	0	1	0	0	0	1
[90]	2019	0	0	1	0	1	0	0
[91]	2019	1	1	0	0	1	0	0



Référence	Date	La complexité	Le développement technologique et numérique	La gestion de l'incertitude	La cybersécurité	La flexibilité	La personnalisation de masse	Les défis financiers
[92]	2019	1	0	1	0	1	0	0
[93]	2018	1	1	1	1	1	1	0
[94]	2020	1	0	1	0	1	0	1
Nombre des articles		26	14	35	12	23	8	8

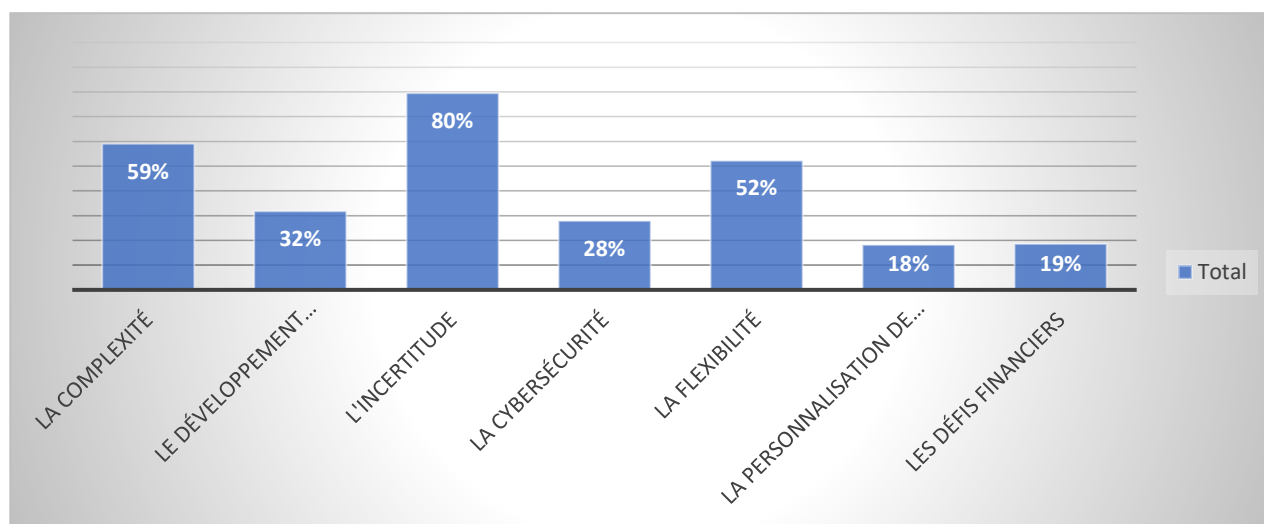


Figure 9: Pourcentage d'articles abordant les défis selon la classification.

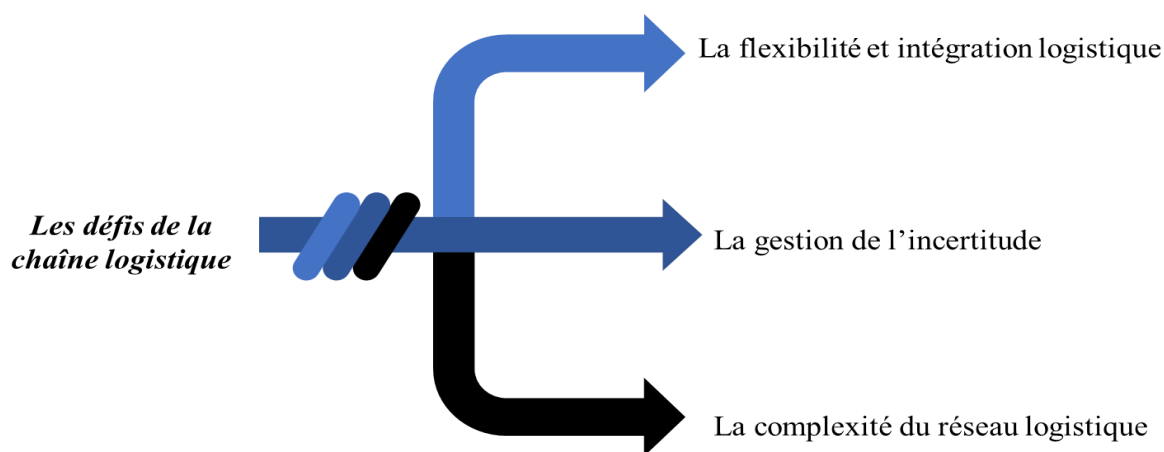


Figure 10: Les défis majeurs de la gestion de la chaîne logistique

## **5. Conclusion.**

- Ce chapitre introductif, présente un état de l'art de l'évolution de la chaîne logistique depuis la première la chaîne logistique 1.0 jusqu'à la chaîne logistique 4.0. Cette évolution a été accompagnée par l'augmentation de la complexité du réseau logistique. En conséquence, le progrès de la chaîne logistique aujourd'hui, affronte plusieurs défis. Dans cette perspective, plusieurs chercheurs essayent de faire face aux défis de la chaîne logistique. Donc pour déterminer les défis réels et les défis qui influencent fortement la chaîne logistique, une analyse de la littérature a été faite.
- Le prochain chapitre traitera, le défi de la flexibilité et l'intégration de la chaîne logistique, à travers la proposition et la résolution d'un modèle d'optimisation. Ce modèle permet d'intégrer l'approvisionnement, la production et la distribution dans différentes structures de chaînes logistiques que ce soit les centralisées ou les décentralisées.

# CHAPITRE II : La modélisation déterministe de la chaîne logistique.

## 1. Introduction

La mondialisation et la libéralisation du commerce international permettent facilement aux entreprises de s'approvisionner, de produire et de commercialiser leurs produits dans le monde entier. Vu ces circonstances, la chaîne logistique est devenue dispersée géographiquement. Donc pour pouvoir faire face à cette dispersion géographique, plusieurs chercheurs et praticiens se concentrent sur l'intégration des différentes fonctions de la chaîne logistique pour augmenter la flexibilité, améliorer les temps de cycle et réduire les coûts. Cette intégration réduit non seulement le nombre des étapes dans ce processus, mais tend également à éliminer les barrières inhérentes entre les différentes fonctions afin d'atteindre une optimisation globale. Ce chapitre propose un modèle d'optimisation pour intégrer efficacement des fonctions telles que l'approvisionnement, la production, le stockage et la distribution dans le réseau de la chaîne logistique. Les solutions proposées ont été appliquées sur une chaîne logistique textile. Ainsi la structure globale, du présent chapitre, est représentée sous forme d'un graphe décrivant la succession des idées de recherche (voir *Figure 11*)

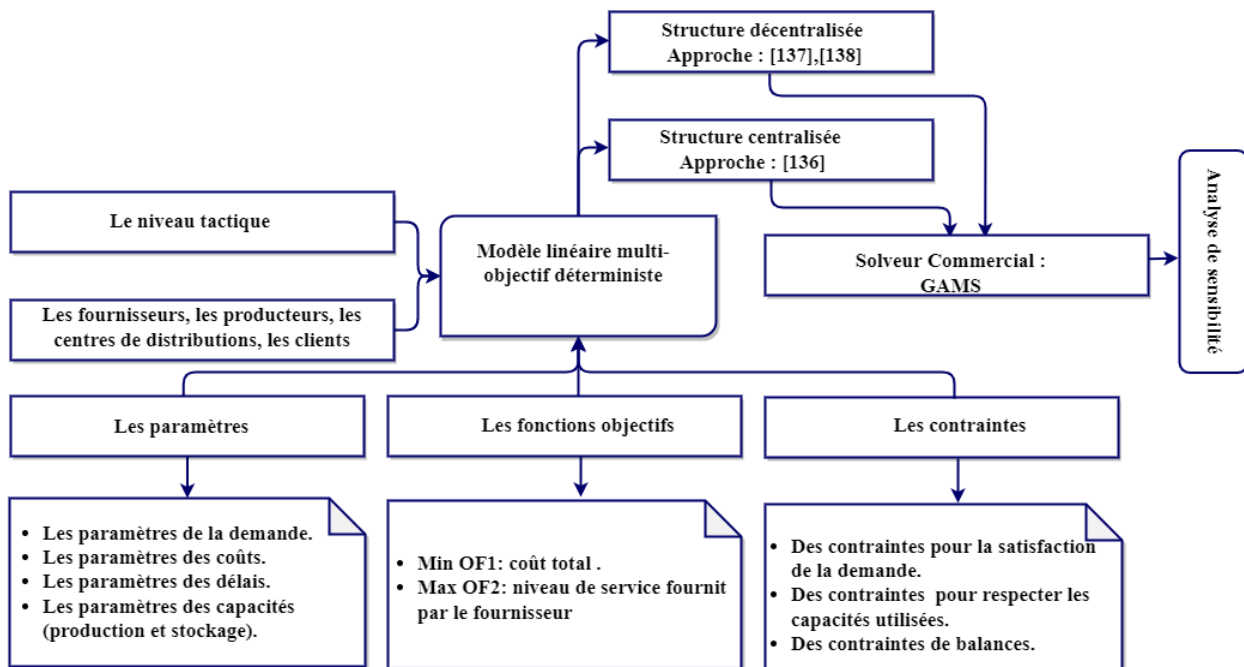


Figure 11: La structure du chapitre II

## **2. Problématique de l'intégration et la flexibilité de la chaîne logistique**

### **2.1. Revue littérature de l'intégration et la flexibilité de la chaîne logistique**

L'intégration de la chaîne logistique favorise les relations intra et inter-organisationnelles[98], entre les différents maillons et les différentes parties prenantes de la chaîne logistique. Cette intégration a subi diverses modifications selon différentes perspectives. Dans cette perspective, Kim [96] souligne le rôle incontournable des participants de la chaîne logistique dans l'intégration des flux de matériel et d'information. Dans la littérature, il existe plusieurs travaux qui ont traité l'intégration de la chaîne logistique [97] [98]. Parmi les recherches approfondies menées dans cette perspective, il existe la proposition d'une intégration hiérarchique de la chaîne logistique [102]. Cette structure se base sur la modélisation et l'optimisation, selon trois niveaux à savoir : le niveau de planification et de prise de décision à long terme, le niveau de planification et d'ordonnement de la chaîne logistique durable et le niveau de simulation et d'optimisation des processus unitaires. Aussi, il existe des travaux qui abordent l'importance des interactions entre les acteurs le long d'une chaîne logistique intégrée, en présentant cinq études de cas de l'industrie textile [99]. En outre, le développement d'un modèle pour l'intégration de la chaîne logistique, pour optimiser le contrôle des stocks et réduire les coûts de manutention des produits pharmaceutiques dans le secteur de la santé [100]. En outre, l'autre du travail [101] présente aussi un modèle de programmation linéaire simple et puissant, pour une intégration de la chaîne logistique multinationale dans le domaine pharmaceutique. Ensuite, l'autre du travail [102] présente un modèle mathématique qui aide à prendre des décisions dans une chaîne logistique intégrée, il permet de minimiser le coût total de la chaîne logistique en bioéthanol. Ensuite, le travail [103], fournit un modèle mathématique simple. Il intègre la politique d'inventaire optimal entre le vendeur et l'acheteur en tenant compte des erreurs d'inspection de la qualité du côté de l'acheteur, durant la production et du côté du vendeur. En outre, le travail [104], traite la relation entre l'engagement des employés afin d'améliorer la performance globale concernant la flexibilité, la livraison, la qualité, l'inventaire et la satisfaction du client.

### **2.2. Modélisation de la chaîne logistique**

La modélisation et la conception de la chaîne logistique impliquent un cadre de modélisation mathématique, qui a comme objectif d'atteindre une meilleure configuration et un meilleur fonctionnement de toute la chaîne logistique [105]. En effet, la modélisation mathématique de la

chaîne logistique est un problème complexe, qui a été l'objet de plusieurs travaux de recherche. La modélisation de la chaîne logistique consiste à formuler la chaîne logistique comme des nœuds et des arcs qui se connectent, et qui sont présentés en couches pour chaque échelon qui construit la chaîne logistique. Dans chaque couche, plusieurs alternatives sont présentées telles que les modes de transport, les technologies utilisées, les emplacements géographiques des sites, et parmi d'autres choix possibles. Tandis que les arcs peuvent représenter des attributs et des critères d'intérêt tels que les distances etc. Tandis que l'optimisation, de la chaîne logistique, consiste à trouver la meilleure configuration du réseau, qui remplit les objectifs uniques ou multiples qui intéressent le décideur. Dans cette perspective, le présent travail traite l'intégration au niveau tactique de la chaîne logistique qui se compose de plusieurs fournisseurs, de plusieurs usines de production, de plusieurs centres de distribution et de plusieurs clients. Cette intégration sera faite à travers la modélisation mathématique de toutes ces parties prenantes (voir Figure 12).

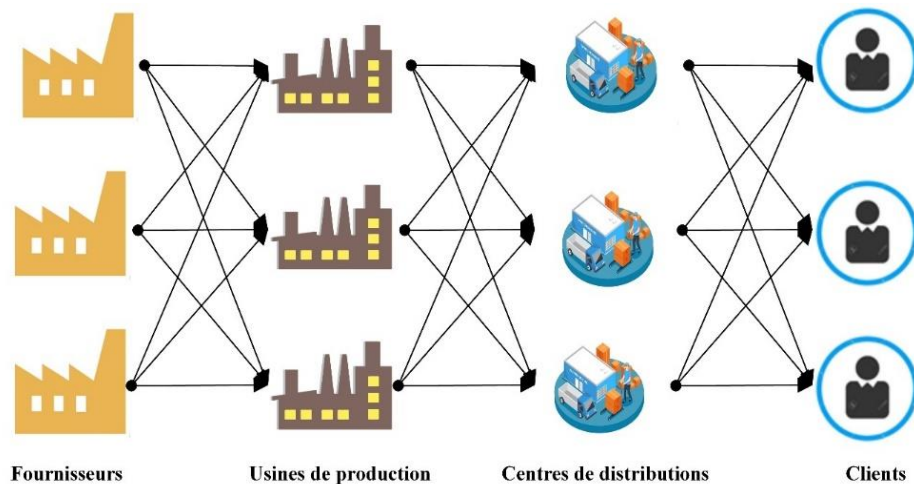


Figure 12: La chaîne logistique considérée

## 2.2.1. Approche de modélisation

Les approches de modélisation de la chaîne logistique sont [106]: les modèles descriptifs et les modèles prescriptifs (voir Figure 13).

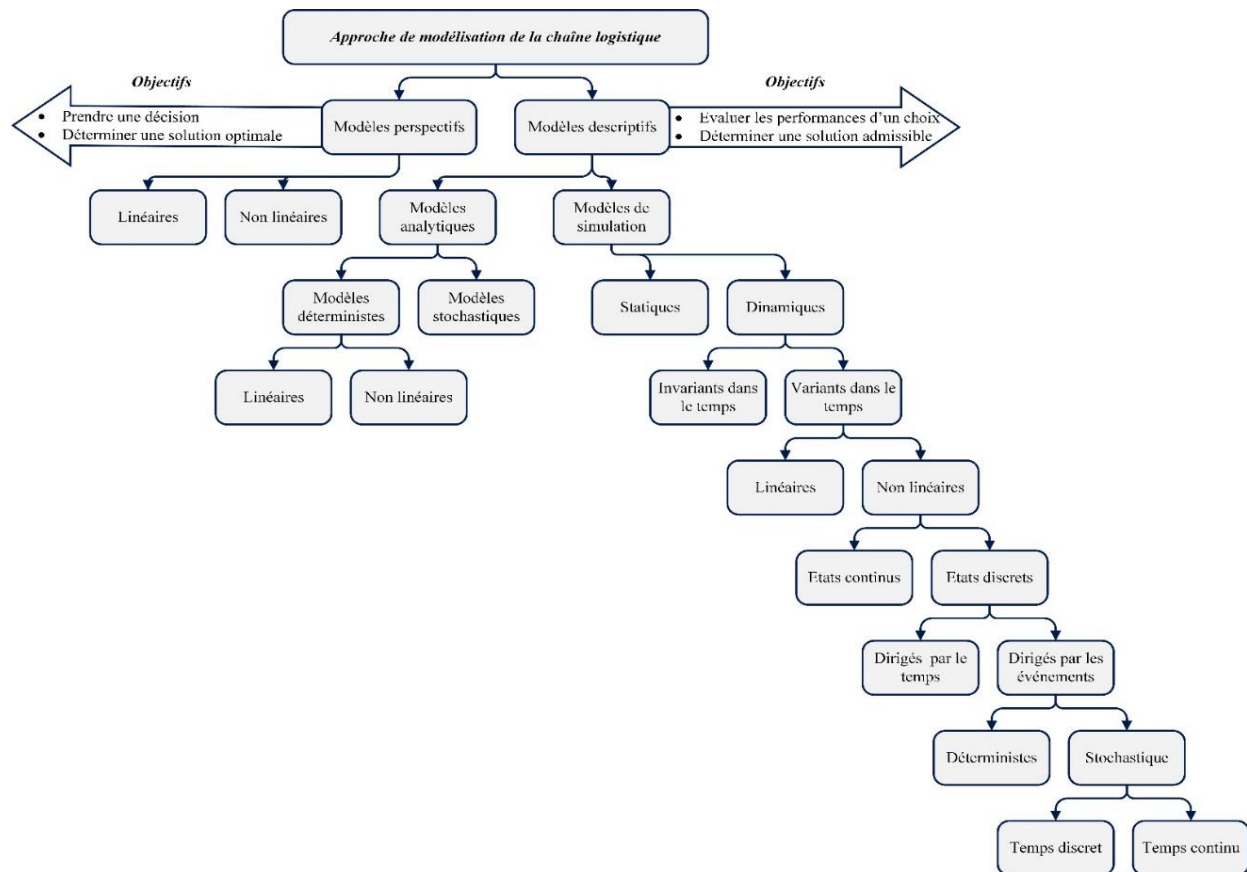


Figure 13: Classification des approches de modélisation

### 2.2.1.1. Modèles prescriptifs

Les modèles prescriptifs sont utilisés pour prendre des décisions concernant : les problèmes d'implantation, les problèmes de dimensionnement de ressources, et les problèmes d'exploitation d'une chaîne logistique [107]. Aussi, il y a des modèles prescriptifs pour le dimensionnement des tailles des lots et l'ordonnancement [107].

### 2.2.1.2. Modèles descriptifs

Les modèles descriptifs permettent l'évaluation de la performance des décisions prises sur la base des modèles prescriptifs. Ils se divisent en deux classes :

a. Modèles analytiques :

Les modèles analytiques visent à décrire le comportement d'une chaîne logistique par un modèle mathématique [10].

b. Modèles de simulation :

Les modèles de simulations sont adaptés plus à l'analyse des systèmes dont le comportement évolue dans le temps ou de manière aléatoire [108] en fonction d'un état passé. La simulation permet de prévoir le comportement d'un système physique réel en exploitant un ensemble de modèles et méthodes. La simulation sollicite, généralement, une analyse plus réaliste qu'un modèle analytique. Ce type de modèle nécessite souvent des hypothèses importantes de simplification du système réel, il permet ainsi d'affiner l'évaluation de certaines performances qui sont approchées par les modèles analytiques.

### **2.2.2. Types de modélisation**

#### ***2.2.2.1. Modélisation mono-objectif***

La prise de décision dans le monde réel évoque toujours plusieurs objectifs à atteindre tels que : la minimisation des risques, la maximisation de la fiabilité, la minimisation des écarts par rapport aux niveaux souhaités, la minimisation des coûts, etc. L'objectif principal de l'optimisation à objectif unique est de trouver la « meilleure » solution, qui correspond à la valeur minimale ou maximale d'une fonction objectif unique regroupant tous les objectifs différents en un seul. Ce type d'optimisation est un outil qui fournit aux décideurs un aperçu de la nature du problème, mais généralement ne peut pas fournir un ensemble de solutions alternatives qui négocient différents objectifs les uns contre les autres. L'optimisation à objectif unique identifie une seule alternative optimale. Cela n'implique pas d'agréger les différents objectifs en une seule fonction objectif, mais par exemple, considérer un seul objectif et de définir les autres comme des contraintes dans le processus d'optimisation. Ces objectifs exprimés sous forme de contraintes se voient attribuer différents niveaux de réalisation de leurs fonctions objectives respectives (par exemple, niveaux de fiabilité minimum) et plusieurs essais sont effectués pour obtenir des solutions correspondant à différentes satisfactions de contraintes.

L'optimisation à objectif unique peut détecter une solution optimale en une seule analyse, tandis que l'optimisation multi-objectif peut détecter un ensemble complet de solutions optimales (Pareto), c'est-à-dire détecter toute la surface de compromis.

### **2.2.2.2. Modélisation multi-objectif**

Les problèmes d'optimisation rencontrés en pratique sont rarement mono-objectifs. Généralement, il existe plusieurs critères contradictoires à optimiser simultanément. L'optimisation multi-objectifs, est utilisée dans la résolution de nombreux problèmes du monde réel, y compris des problèmes dans les domaines de l'ingénierie [109], des mines [110] et des finances [111]. Dans l'optimisation multi-objectifs, il existe plusieurs objectifs contradictoires dans lesquels l'amélioration d'un objectif réduira la valeur des autres, ce qui implique enfin un compromis entre les solutions. L'objectif principal d'optimisation multi-objectifs est d'aider un décideur à choisir une solution préférée parmi tous les compromis. Les problèmes multi-objectifs peuvent se présenter sous une forme linéaire, entiers et entiers mixtes ayant respectivement des solutions continues, discrètes et à la fois continues et discrètes. Dans une optimisation multi-objectif il n'y a pas de solution optimale unique. L'interaction entre les différents objectifs donne lieu à un ensemble de solutions compromises, largement connues sous le nom de solutions de compromis, non dominées, non inférieures ou pareto-optimales.

### **2.2.2.3. Classification des approches d'optimisations multi-objectif**

Les approches d'optimisation multi-objectifs peuvent être classées en fonction de la succession chronologique des processus d'optimisation et des décisions [112]: l'approche à priori, l'approche à postériori, et l'approche interactive(voir Figure 14). Si le processus de décision précède le processus d'optimisation, il est défini comme une méthode à priori. Dans la méthode à postériori, le processus d'optimisation doit avoir lieu avant le processus de décision. Dans l'approche interactive, le processus d'optimisation est alterné avec le processus de décision.

- a. Dans l'approche à priori avec optimisation simple, le problème multicritère est converti en un problème unique en prenant une somme pondérée des différents objectifs [113]. Les préférences se traduisent par des poids. Les objectifs les plus importants reçoivent un poids plus important. Les poids doivent être spécifiés avant l'optimisation. Cette méthode est très populaire dans la littérature. Si ce processus de fixation des poids n'a lieu qu'une seule fois, donc il existe une seule approche d'optimisation à priori.
- b. Dans l'approche à postériori, les solutions générées lors du processus d'optimisation sont indépendantes de la décision prise [114]. Ce n'est qu'après le processus d'optimisation que le



meilleur résultat est sélectionné. Cette approche est considérée comme plutôt subjective, car la solution de l'optimisation dépend fortement de ces poids choisis.

- c. Dans la méthode interactive, aussi appelée méthode progressive : le planificateur montre comment la solution doit évoluer au cours du processus d'optimisation. L'optimisation et l'indication des préférences se font alternativement [113]. Après chaque étape d'optimisation, le planificateur de traitement doit indiquer quels critères doivent être améliorés en faisant une classification des fonctions objectifs au point Pareto optimal. Puis l'optimisation est à nouveau effectuée, en tenant compte de la classification. Ensuite, tout le processus est répété, jusqu'à ce que le physicien soit satisfait d'une solution particulière. L'avantage de la méthode interactive c'est le fait que le processus de calcul soit moins étendu, car l'optimisation se concentre sur une région spécifique du front de Pareto, c'est-à-dire la région au point Pareto-optimal [113].

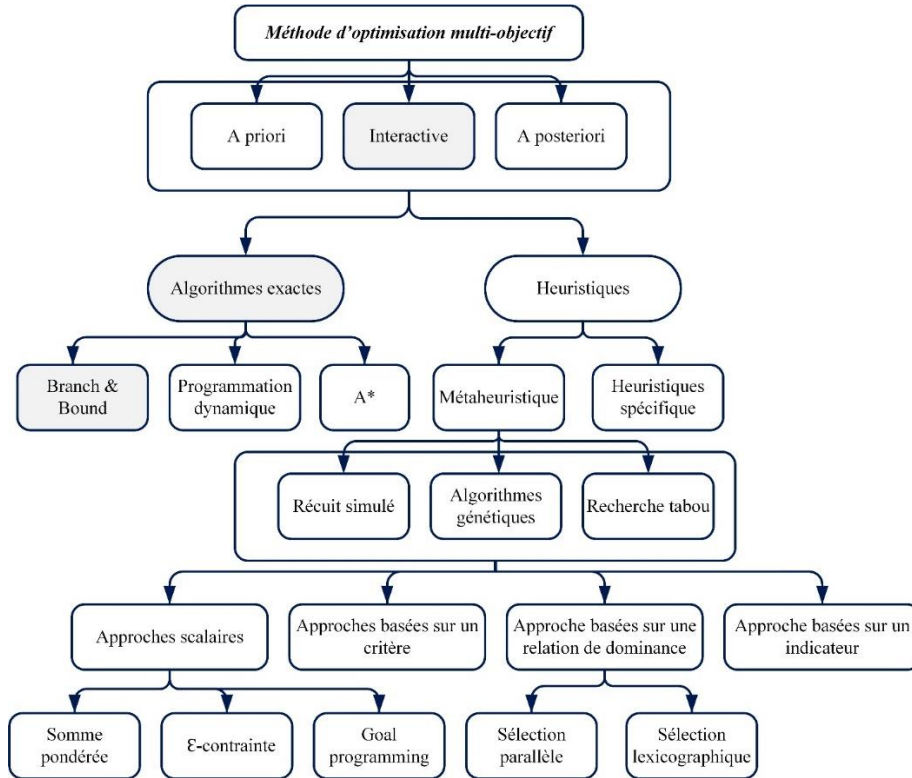


Figure 14: Classification des approches d'optimisation multi-objectif.

### 3. Proposition du modèle d'optimisation multi-objectif de la chaîne logistique

Dans le cadre de ce travail, les principaux processus décisionnels mis en œuvre dans une chaîne logistique sont : le processus d'approvisionnement, le processus de production et le processus de distribution. Donc pour l'intégration de ce type de chaîne logistique, un nombre de décisions sur

un horizon tactique, s'impose pour chacun de ses processus. En effet, cela concerne les quantités de matière première à approvisionner, les volumes à produire, les quantités à stocker, les quantités à transporter, les délais de livraison....

### 3.1. Hypothèses du modèle

Les considérations fondamentales du problème considéré sont résumées dans cette partie de ce travail :

#### 3.1.1. Types de structure de décisions au sein de la chaîne logistique

Le présent travail considère deux types de structures de décisions qui sont : les structures centralisées et les structures décentralisées, puisqu'elles sont les plus répandus dans le monde actuel et elles sont les plus citées dans la littérature récente.

##### 3.1.1.1. Structure de décision centralisée

Une architecture de pilotage centralisée implique une dépendance décisionnelle au niveau de chaque entité de la chaîne logistique. La planification opérée par un centre de décision central dépendra d'un seul plan de demande envoyé par le centre de décision aval. Ensuite, les résultats de la planification détermineront le plan d'approvisionnement qu'il faut communiquer au centre de décision amont (voir *Figure 15*).

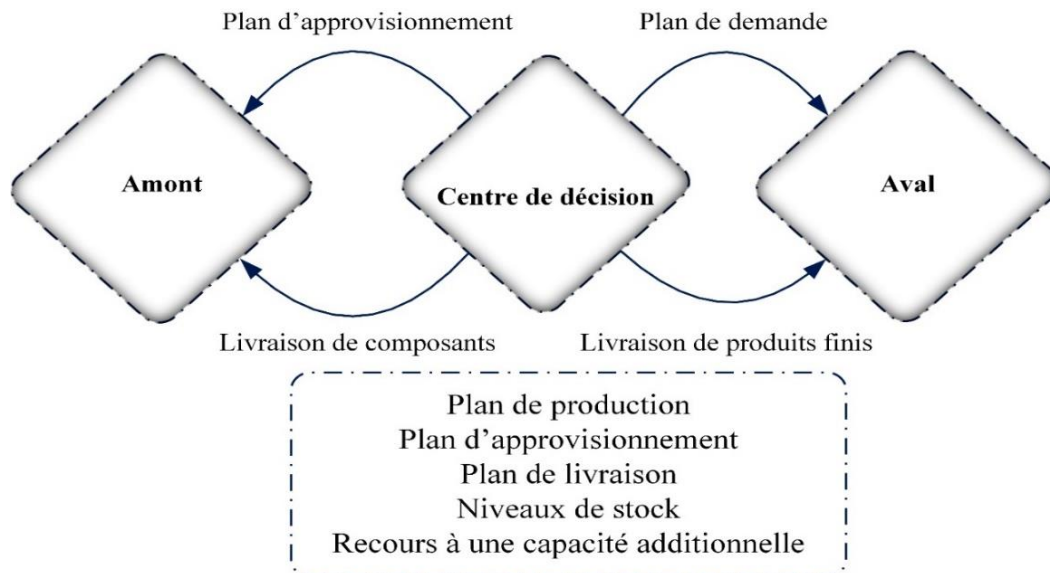


Figure 15: Gestion centralisée de la chaîne logistique

### 3.1.1.2. Structure de décision décentralisée

Une architecture de pilotage décentralisée implique une autonomie décisionnelle au niveau de chaque centre de décision composant la chaîne logistique. Chaque entité du réseau prend ses décisions en fonction des informations qu'elle reçoit des centres de décisions en amont et en aval (voir Figure 16).

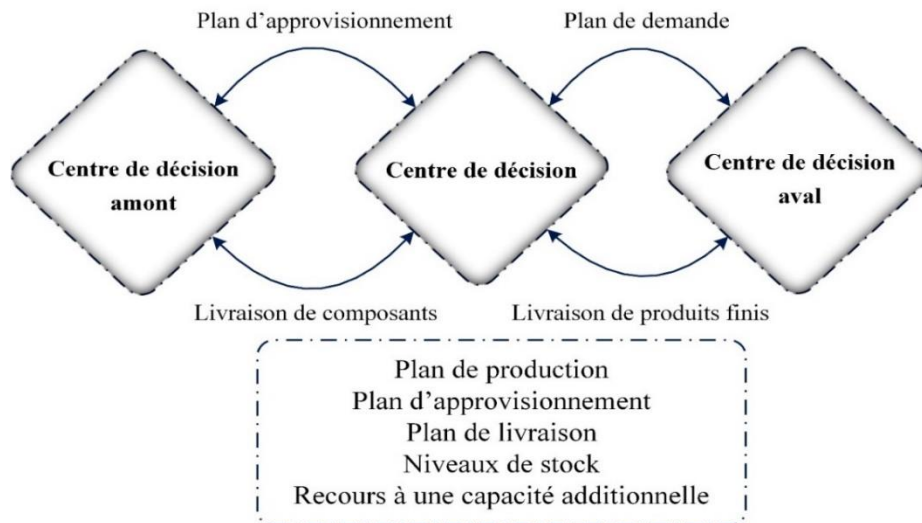


Figure 16: Gestion décentralisée de la chaîne logistique

### 3.1.2. Ensembles et Indices du modèle

- (t): Indice utilisé pour désigner une période de l'horizon de planification  $t = 1, \dots, T$
- (s): Indice utilisé pour désigner un fournisseur  $s = 1, \dots, S$
- (r): Indice utilisé pour désigner une matière première  $r = 1, \dots, R$
- (p): Indice utilisé pour désigner une usine de production  $p = 1, \dots, P$
- (k): Indice utilisé pour désigner un produit fini  $k = 1, \dots, K$
- (d): Indice utilisé pour désigner un centre de distribution  $d = 1, \dots, D$
- (c): Indice utilisé pour désigner un client  $c = 1, \dots, C$

### 3.1.3. Les paramètres du modèle :

- $DC_{k,c,t}$  : La demande de produit  $k$  par le client  $c$  pendant la période  $t$ .

- $CQSP_{rm,s,p,t}$  : Le coût unitaire de transport de la matière première  $rm$  depuis le fournisseur  $s$  du vers l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $CIPRM_{rm,p,t}$  : Le coût unitaire de possession du stock de matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $CQPK_{k,p,t}$  : Le coût unitaire de production du produit  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $CSPK_{k,p,t}$  : Le coût unitaire de configuration de la ligne de production pour produire le produit  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $CIPK_{k,p,t}$  : Le coût unitaire de possession du stock de produits finis  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $CQPD_{k,p,d,t}$  : Le coût unitaire de transport de produit  $k$  depuis l'usine  $p$  vers le distributeur  $d$  durant la période  $t$ .
- $CIDK_{k,d,t}$  : Le coût unitaire de possession du stock de produits  $k$  dans le centre  $d$  durant la période  $t$ .
- $CQDC_{k,d,c,t}$  : Le coût unitaire de transport de produit  $k$  depuis centre  $d$  vers le client  $c$  durant la période  $t$ .
- $CBQC_{k,c,t}$  : Le coût unitaire de *backorder* de produit  $k$  par le client  $c$  durant de la période  $t$ .
- $SCap_{rm,s,t}$  : La capacité du fournisseur  $s$  à fournir la matière première  $rm$  durant la période  $t$ .
- $\alpha_{rm,k}$  : Le taux d'utilisation de la matière première  $rm$  dans la production du produit  $k$ .
- $V_{rm}$  : Le volume unitaire de la matière première  $rm$ .
- $PCap_{p,t}^1$  : La capacité de l'usine  $p$  pour le stockage des matières premières, durant la période  $t$ .
- $TTP_{p,t}$  : Le temps maximal de disponibilité de l'usine  $p$  durant la période de temps  $t$ .
- $pt_{k,p}$  : Le temps de production du produit  $k$  dans l'usine  $p$ .
- $st_{k,p}$  : Le temps de configuration pour produire le produit  $k$  dans l'usine  $p$ .
- $V_k$  : Le volume de chaque produit  $k$ .
- $PCap_{p,t}^2$  : La capacité de l'usine  $p$  pour stockage des produits finis durant la période  $t$ .

- $DKCap_{d,t}$  : La capacité de l'entrepôt du centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .
- $\lambda_{k,d,c,t}$  : Le taux de livraison à temps du produit  $k$  offert par le centre de distribution  $d$  au client  $c$  durant la période  $t$ .
- $\eta_{rm,s,p,t}$  : Le taux de livraison à temps de la matière première  $rm$  offert par le fournisseur  $s$  à l'usine  $p$  pendant la période  $t$ .
- $Tacc_{k,c}$  : Le taux de livraison minimal acceptable le client  $c$  pour le produit  $k$ .
- $\beta_{k,c}$  : Le taux de quantité maximale de *backorder* autorisée par le client  $c$  du produit  $k$  durant la période  $t$ .

#### 3.1.4. Les Variables de décision :

- $QSP_{rm,s,p,t}$  : La quantité de la matière première  $rm$  transportée depuis le fournisseur  $s$  vers l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $QPK_{k,p,t}$  : La quantité du produit  $k$  produite par l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $X_{k,p,t}$  : Un variable qui égale à 1-si le produit  $k$  est produit dans l'usine  $p$  à la période  $t$ .
- $IPRM_{rm,p,t}$  : L'inventaire du stock de la matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  à la fin de la période  $t$ .
- $IPK_{k,p,t}$  : L'inventaire du stock du produit  $k$  dans l'usine  $p$  à la fin de période  $t$ .
- $IDK_{k,d,t}$  : L'inventaire du stock du produit  $k$  dans le centre de distribution  $d$  à la fin de période  $t$ .
- $QPD_{k,p,d,t}$  : La quantité du produit  $k$  expédiée par l'usine  $p$  vers le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .
- $QDC_{k,d,c,t}$  : La quantité du produit  $k$  expédiée par le centre  $d$  vers le client  $c$  durant la période  $t$ .
- $BQC_{k,d,t}$  : La quantité de *backorder* du produit  $k$  par le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .

### 3.2. Modélisation du problème d'optimisation

La modélisation mathématique de la chaîne logistique est faite sous forme d'un problème d'optimisation qui vise à optimiser deux fonctions objectifs sous 14 contraintes.

#### 3.2.1. Contraintes du problème :

Les contraintes du modèle sont représentées par les équations de (C1) à (C14) dans le tableau (voir Tableau 5), alors que la signification de chacune de ces contraintes est largement décrite dans la sous-partie suivante.

Tableau 5: Les contraintes du modèle

<b>Contraintes des capacités utilisées</b>	<b>C1:</b>	$\sum_{rm \in RM} QSP_{rm,s,p,t} \leq SCap_{rm,s,t} \quad \forall s \in S, p \in P, t \in T$
	<b>C2:</b>	$\sum_{rm \in RM} V_{rm} * IPRM_{rm,p,t} + \sum_{s \in S} \sum_{rm \in RM} V_{rm} * QSP_{rm,s,p,t} \leq PCap_{p,t}^1 \quad \forall p \in P, t \in T$
	<b>C3:</b>	$\sum_{k \in K} V_k * IPK_{k,p,t} \leq PCap_{p,t}^2 \quad \forall p \in P, t \in T$
	<b>C4:</b>	$\sum_{k \in K, p \in P} V_k * QPD_{k,p,d,t} + \sum_{k \in K} V_k * IDK_{k,d,t} \leq DKCap_{d,t} \quad \forall d \in D, t \in T$
<b>Contraintes de demande</b>	<b>C5:</b>	$\sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \leq DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T$
	<b>C6:</b>	$\sum_{d \in D} (1 - \lambda_{k,d,c,t}) * QDC_{k,d,c,t} \leq (1 - Tacc_{k,c}) * DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T$
<b>Contrainte de temps production</b>	<b>C7:</b>	$\sum_{k \in K} pt_{k,p} * QPK_{k,p,t} + \sum_{k \in K} st_{k,p} * X_{k,p,t} \leq TTP_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T$
<b>Contraintes de backorder</b>	<b>C8:</b>	$BQC_{k,d,t} = BQC_{k,d,t-1} + DC_{k,c,t} - \sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T$

	<b>C9:</b>	$BQC_{k,d,t} \leq \beta_{k,c} * DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, d \in D, c \in C, t \in T$
<b>Contrainte de balance</b>	<b>C10:</b>	$IPRM_{rm,p,t} = IPRM_{rm,p,t-1} + \sum_{k \in K} \alpha_{rm,k} \times QPK_{k,p,t} \quad \forall rm \in RM, p \in P, t \in T$
	<b>C11:</b>	$IPK_{k,p,t} = IPK_{k,p,t-1} + QPK_{k,p,t} - \sum_{d \in D} QPD_{k,p,d,t} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T$
	<b>C12:</b>	$IDK_{k,d,t} = IDK_{k,d,t-1} + \sum_{p \in P} QPD_{k,p,d,t} - \sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t} \quad \forall k \in K, d \in D, t \in T$
	<b>C13:</b>	$\sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} - BQC_{k,d,t-1} = DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C$
<b>Le statut des variables</b>	<b>C14:</b>	$QSP_{rm,s,p,t}, QPK_{k,p,t}, IPRM_{rm,p,t}, IPK_{k,p,t}, IDK_{k,d,t} \geq 0$ $QPD_{k,p,d,t}, QDC_{k,d,c,t}, BQC_{k,d,t} \geq 0 \quad X_{k,p,t} \in \{0,1\}$

### 3.2.1.1. La contrainte 1

Cette contrainte garantit que les quantités de matière première  $rm$  transportées depuis le fournisseur  $s$  à l'ensemble des usines durant la période  $t$  ne peuvent pas dépasser la capacité de ce fournisseur  $s$ .

$$\sum_{s \in S} QSP_{rm,s,p,t} \leq SCap_{rm,s,t} \quad \forall rm \in RM, p \in P, t \in T \quad (1)$$

### 3.2.1.2. La contrainte 2

Cette contrainte assure la balance du stock de la matière première. En effet, l'inventaire du stock de la matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$  est égal à l'inventaire du stock de la matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  durant la période précédente  $t-1$  plus la somme des quantités des produits finis produites par l'usine  $p$  durant la période  $t$  multipliée par taux d'utilisation de la matière première  $rm$  dans la production de chaque produit fini  $k$ .

$$IPRM_{rm,p,t} = IPRM_{rm,p,t-1} + \sum_{k \in K} \alpha_{rm,k} \times QPK_{k,p,t} \quad \forall rm \in RM, p \in P, t \in T(2)$$

### 3.2.1.3. La contrainte 3

Cette contrainte garantit la balance du stock du produit fini  $k$  dans l'usine de production  $p$ . En effet, l'inventaire du stock de produits finis  $k$  dans l'usine de production  $p$  durant la période  $t$  est égale à l'inventaire du produit  $k$  dans l'usine de production  $p$  durant la période  $t-1$  plus la quantité produite du produit  $k$  par l'usine  $p$  durant la période  $t$  moins la somme des quantités du produit  $k$  expédiées par l'usine  $p$  vers l'ensemble des centres de distributions durant la période  $t$ .

$$IPK_{k,p,t} = IPK_{k,p,t-1} + QPK_{k,p,t} - \sum_{d \in D} QPD_{k,p,d,t} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T(3)$$

### 3.2.1.4. La contrainte 4

Cette contrainte garantit la balance du stock du produit fini  $k$  dans le centre de distribution  $d$ . En effet, l'inventaire du stock de produits finis  $k$  dans le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$  est égale à l'inventaire du stock de produits finis  $k$  dans le centre de distribution  $d$  durant la période  $t-1$  plus la somme des quantités des produits finis  $k$  expédiées par l'ensemble des usines vers le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$  moins la somme des quantités distribuées par le centre de distribution  $d$  vers l'ensemble des clients durant la période  $t$ .

$$IDK_{k,d,t} = IDK_{k,d,t-1} + \sum_{p \in P} QPD_{k,p,d,t} - \sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t} \quad \forall k \in K, d \in D, t \in T(4)$$

### 3.2.1.5. La contrainte 5

Cette contrainte montre que la quantité de matière première expédiée à l'usine  $p$  par l'ensemble des fournisseurs plus le niveau de stock de matière première dans l'usine  $p$  au cours de la période  $t$  est limité par la capacité de l'usine  $p$  durant la période  $t$ . En effet, la somme de l'inventaire du stock de chaque matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$  multipliée par le volume de cette matière première  $rm$  plus la somme des quantités des matières premières expédiées par l'ensemble des fournisseurs vers l'usine  $p$  durant la période  $t$  doit être inférieure à la capacité du stockage de produit fini  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{rm \in RM} V_{rm} * IPRM_{rm,p,t} + \sum_{s \in S} \sum_{rm \in RM} V_{rm} * QSP_{rm,s,p,t} \leq PCap_p^1 \quad \forall p \in P, t \in T$$



(5)

**3.2.1.6. La contrainte 6**

Cette contrainte garantit que le volume de production doit être inférieur ou égal à la capacité totale de stockage de l'usine  $p$  dans la période de temps  $t$ . Ainsi, la somme de l'inventaire du stock de chaque produit fini dans l'usine  $p$  durant la période  $t$  multiplié par le volume de ce produit fini doit être inférieure ou égale à la capacité du stockage des produits finis dans d'usine  $p$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{k \in K} V_k * IPK_{k,p,t} \leq PCap_{p,t}^2 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (6)$$

**3.2.1.7. La contrainte 7**

Cette contrainte garantit que la quantité de produits expédiée depuis l'usine  $p$  vers le centre de distribution  $d$  plus le niveau de stock du produit  $k$  dans le centre de distribution  $d$  au cours de la période  $t$  est limitée par à la capacité du centre de distribution  $d$ . Autrement dit, la somme des quantités de chaque produit fini expédiées par l'ensemble des usines vers le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$  multipliée par le volume de ce produit fini plus la somme de l'inventaire du stock de chaque produit fini durant la période  $t$  multipliée par le volume de ce produit fini, doit être inférieure ou égale à la capacité du stockage des produits finis dans le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{k \in K, p \in P} V_k * QPD_{k,p,d,t} + \sum_{k \in K} V_k * IDK_{k,d,t} \leq DKCap_{d,t} \quad \forall d \in D, t \in T \quad (7)$$

**3.2.1.8. La contrainte 8**

Cette contrainte garantit que le temps total de production de tous les produits dans l'usine  $p$  ne doit pas dépasser le temps total de disponibilité de l'usine  $p$ . En d'autres termes, la somme du temps de production de chaque produit fini dans l'usine  $p$  multipliée par la quantité produite de ce produit fini dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ , plus la somme du temps de configuration nécessaire pour la production de chaque produit fini s'il était produit dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ , doit être inférieure ou égale au temps total de disponibilité de l'usine  $p$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{k \in K} pt_{k,p} * QPK_{k,p,t} + \sum_{k \in K} st_{k,p} * X_{k,p,t} \leq TTP_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (8)$$

### 3.2.1.9. La contrainte 9

Cette contrainte représente l'équation des quantités du *backorder* par chaque client. En effet, la quantité de *backorder* du produit  $k$  par le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$  égale à la quantité de *backorder* du produit  $k$  durant la période  $t-1$  plus la demande du produit  $k$  par le client  $c$  durant la période  $t$  moins la somme des quantités du produit  $k$  livrées par tous les centres de distribution vers le client  $c$  durant la période  $t$ .

$$BQC_{k,d,t} = BQC_{k,d,t-1} + DC_{k,c,t} - \sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T(9)$$

### 3.2.1.10. La contrainte 10

Cette contrainte concerne l'équation de balance du *backorder* durant la période précédente. En effet, la demande du produit  $k$  par le client  $c$  durant la période  $t$  égale à la somme des quantités de produits finis  $k$  livrée par tous les centres de distribution pour le client  $c$  durant la période  $t$ , moins la quantité de *backorder* du produit  $k$  par le centre de distribution  $d$  durant la période  $t-1$ .

$$\sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} - BQC_{k,d,t-1} = DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C(10)$$

### 3.2.1.11. La contrainte 11

Cette contrainte garantit que la quantité d'un produit expédiée à chaque client dans une période ne doit pas dépasser sa demande. En effet, la somme des quantités de produits finis  $k$  livrées par tous les centres de distribution pour le client  $c$  durant la période  $t$ , doit être inférieure à la demande du produit  $k$  par le client  $c$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \leq DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T(11)$$

### 3.2.1.12. La contrainte 12

Cette contrainte garantit que les quantités de *backorder* du produit  $k$  durant la période  $t$  sont limitées à un pourcentage de la demande durant cette période. La quantité de *backorder* du produit  $k$  dans le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ , doit être inférieure à la demande du produit  $k$  par client  $c$  durant la période  $t$ , multipliée par le taux de la quantité maximale de *backorder* autorisée par le client  $c$  du produit  $k$  durant la période  $t$ .

$$BQC_{k,d,t} \leq \beta_{k,c} * DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T(12)$$

### 3.2.1.13. La contrainte 13

Cette contrainte garantit la livraison à temps pour le client. En effet, la somme de 1 moins le taux de livraison à temps du produit offert par chaque centre de distribution pour le client  $c$  durant la période  $t$ , le tous multipliées par la quantité de produits finis  $k$  livré par le centre de distribution  $k$  pour le client  $c$  durant la période  $t$ , doit être inférieure à d'un moins le taux de livraison minimal acceptable le client  $c$  pour le produit  $k$ , le tous multipliées par la demande du produit  $k$  par client  $c$  durant la période  $t$ .

$$\sum_{d \in D} (1 - \lambda_{k,d,c,t}) * QDC_{k,d,c,t} \leq (1 - Tacc_{k,c}) * DC_{k,c,t} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (13)$$

### 3.2.1.14. La contrainte 14

Cette contrainte concerne la définition du statut des variables de décision. En fait, les variables de décision de notre modèle sont des grandeurs physiques donc ils doivent être positifs.

$$\begin{aligned} QSP_{r,m,s,p,t}, QPK_{k,p,t}, IPRM_{r,m,p,t}, IPK_{k,p,t}, IDK_{k,d,t} &\geq 0 \\ QPD_{k,p,d,t}, QDC_{k,d,c,t}, BQC_{k,d,t} &\geq 0 \quad X_{k,p,t} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (14)$$

## 3.3. Fonctions objectifs :

Le modèle proposé considère deux objectifs à savoir :

- a. La minimisation du coût total de la logistique (OF1).
- b. La maximisation des livraisons à temps des matières premières (OF2).

### 3.3.1. Première fonction objectif.

La première fonction objectif (OF1) : est couramment utilisée, dans la littérature, comme un système de performance globale (*major system-wide*) dans les chaînes logistiques classiques où un seul objectif est utilisé. (OF1) vise à réduire les composants importants des coûts d'exploitation de la chaîne logistique et à obtenir une meilleure utilisation des ressources. Cette fonction objectif est représentée par l'équation (15). Les neuf coûts principaux qui composent cette fonction objectif sont bien expliqués par la suite.

$$\begin{aligned}
OF1 = & \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CQSP_{rm,s,p,t} \times QSP_{rm,s,p,t} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CQPK_{k,p,t} \times QPK_{k,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CSPK_{k,p,t} \times X_{k,p,t} + \sum_{rm \in RM} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CIPRM_{rm,p,t} \times IPRM_{rm,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CIPK_{k,p,t} \times IPK_{k,p,t} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} CQPD_{k,p,d,t} \times QPD_{k,p,d,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} CIDK_{k,d,t} \times IDK_{k,d,t} + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} CQDC_{k,d,c,t} \times QDC_{k,d,c,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{d \in C} \sum_{t \in T} CBQC_{k,d,t} \times BQC_{k,d,t} \quad (15)
\end{aligned}$$

### 3.3.1.1. Coût total de transport en amont de la chaîne logistique :

Représente la somme des coûts totaux du transport de toutes les matières premières livrées par tous les fournisseurs vers toutes les usines durant toutes les périodes (voir équation 16).

$$\sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CQSP_{rm,s,p,t} \times QSP_{rm,s,p,t} \quad (16)$$

### 3.3.1.2. Coût total de production dans la chaîne logistique :

Représente la somme des coûts totaux de production de tous les produits finis dans toutes les usines durant toutes les périodes (voir équation 17).

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CQPK_{k,p,t} \times QPK_{k,p,t} \quad (17)$$

### 3.3.1.3. Coût total de configuration dans la chaîne logistique :

Représente la somme des coûts totaux de configuration de production pour produire tous les produits finis dans toutes les usines de production dans la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 18).

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CSPK_{k,p,t} \times X_{k,p,t} \quad (18)$$

### 3.3.1.4. Coût total de possession des stocks de la matière première dans la chaîne logistique :

Représente la somme des coûts totaux de possession des stocks de toutes les matières premières dans toutes les usines de production dans la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 19).

$$\sum_{rm \in RM} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CIPRM_{rm,p,t} \times IPRM_{rm,p,t} \quad (19)$$

**3.3.1.5. Coût total de possession des stocks de produits finis dans toutes les usines de production de la chaîne logistique :**

Représente la somme des coûts totaux de possession des stocks de tous produits finis dans toutes les usines de production de la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 20).

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CIPK_{k,p,t} \times IPK_{k,p,t} \quad (20)$$

**3.3.1.6. Coût total d'expédition du produit fini vers le centre de distribution :**

Représente la somme des coûts totaux d'expédition de tous les produits finis depuis toutes les usines de production vers tous les centres de distribution de la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 21).

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} CQPD_{k,p,d,t} \times QPD_{k,p,d,t} \quad (21)$$

**3.3.1.7. Coût total de possession des stocks de produits finis dans tous les entrepôts des centres de distribution de la chaîne logistique :**

Représente la somme des coûts totaux de possession des stocks de tous les produits finis dans tous les entrepôts des centres de distribution de la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 22).

$$\sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} CIDK_{k,d,t} \times IDK_{k,d,t} \quad (22)$$

**3.3.1.8. Coût total de livraison du produit fini vers les clients :**

Représente la somme des coûts totaux de livraison de tous les produits finis depuis tous les centres de distribution vers tous les clients finaux de la chaîne logistique durant toutes les périodes (voir équation 23).

$$\sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} CQDC_{k,d,c,t} \times QDC_{k,d,c,t} \quad (23)$$

### 3.3.1.9. Coût total de backorder :

Représente la somme des coûts totaux de tous les *backorder* de tous les produits par tous les centres de distributions durant toutes les périodes (voir équation 24).

$$\sum_{k \in K} \sum_{d \in C} \sum_{t \in T} CBQC_{k,d,t} \times BQC_{k,d,t} \quad (24)$$

### 3.3.2. Deuxième fonction objectif

La deuxième fonction objectif (OF2) : est considérée comme évaluation de l'impact des livraisons à temps du côté amont de la chaîne logistique afin d'assurer un flux continu de production et de minimiser les arrêts des lignes de production en raison de l'indisponibilité des matières premières. Cet objectif peut être exprimé comme suit (voir équation 25) :

$$OF2 = \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QSP_{rm,s,p,t} \times \eta_{rm,s,p,t} \quad (25)$$

## 4. Résolution du problème d'optimisation multi-objectif

### 4.1. Solution proposée

Pour résoudre les modèles multi-objectifs, différentes méthodes ont été proposées dans la littérature [115]. Dans ce travail, les méthodes interactives ont été utilisées. En effet, les méthodes interactives sont l'une des approches les plus attractives dans ce domaine. Elles facilitent la mesure et l'ajustement des niveaux de satisfaction pour chaque fonction objectif en fonction des préférences du décideur de manière interactive et progressive. En fonction de la structure de la chaîne logistique considérée dans ce travail, l'approche additive pondérée proposée par l'article [136], est utilisée pour gérer les structures centralisées de la chaîne logistique. Ensuite, l'approche proposée par l'article [117] et aussi l'approche proposée par l'article [138] sont utilisées, simultanément, pour gérer les structures décentralisées de la chaîne logistique.

#### 4.1.1. Étapes de la solution

Les étapes de la méthode interactive considérée peuvent être résumées comme suit :

##### 4.1.1.1. Étape 1 :

Résolution du problème, comme étant mono-objectif. En d'autres termes :

- a. Pour la fonction de coûts totaux : Min OF1 soumis aux contraintes (C1)-(C14).

b. Pour la fonction de niveau de livraison à temps : Max OF2 soumis aux contraintes (C1)-(C14).

Avec :

$x$  et  $x'$  représentent respectivement les solutions optimales obtenues en résolvant le modèle en considérant premièrement l'objectif d'optimisation des coûts totaux et deuxièmement la livraison à temps. Si  $x=x'$  une solution efficace est obtenue et le processus s'arrête ; sinon, passez à l'étape.2.

#### 4.1.1.2. Étape 2 :

Évaluation des deux fonctions objectifs aux solutions obtenues. En effet, cela revient à déterminer la solution idéale  $\alpha$ -négative ( $OF_1^{NIS}$ ) et la solution idéale  $\alpha$ -positive ( $OF_1^{PIS}$ ) pour l'objectif des coûts totaux ; et la solution idéale  $\alpha$ -négative ( $OF_2^{NIS}$ ) et la solution idéale  $\alpha$ -positive ( $OF_2^{PIS}$ ) pour objectif d'optimisation de la livraison à temps total (voir équation 26) :

$$\begin{cases} OF_1^{NIS} = OF_1(x) \\ OF_1^{PIS} = OF_1(x') \\ OF_2^{PIS} = OF_2(x') \\ OF_2^{NIS} = OF_2(x) \end{cases} \quad (26)$$

#### 4.1.1.3. Étape 3 :

Définition des fonctions d'appartenance linéaires pour la première et la deuxième fonction objectif (voir équation 27 et 28) :

$$\mu_{OF_1}(x) = \begin{cases} 1, & OF_1(x) \leq OF_1^{NIS} \\ \frac{OF_1^{PIS} - OF_1(x)}{OF_1^{PIS} - OF_1^{NIS}}, & OF_1^{NIS} < OF_1(x) \leq OF_1^{PIS} \\ 0, & OF_1(x) \geq OF_1^{PIS} \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu_{OF_2}(x) = \begin{cases} 1, & OF_2(x) \geq OF_2^{PIS} \\ \frac{OF_2(x) - OF_2^{NIS}}{OF_2^{PIS} - OF_2^{NIS}}, & OF_2^{NIS} < OF_2(x) \leq OF_2^{PIS} \\ 0, & OF_2(x) \leq OF_2^{NIS} \end{cases} \quad (28)$$

Où  $\mu_{OF_1}(x)$  et  $\mu_{OF_2}(x)$  désignent le degré de satisfaction des deux fonctions objectives :

Les coûts totaux et la livraison à temps pour donner respectivement la solution  $x$ . Une représentation graphique des deux fonctions d'appartenance est présentée dans les graphes (Figure 17 et Figure 18) respectivement.

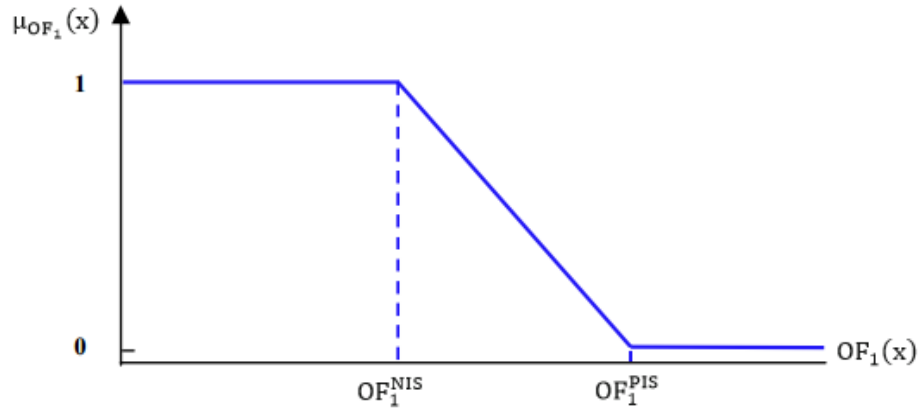


Figure 17: Fonction d'appartenance pour l'objectif de coûts totaux

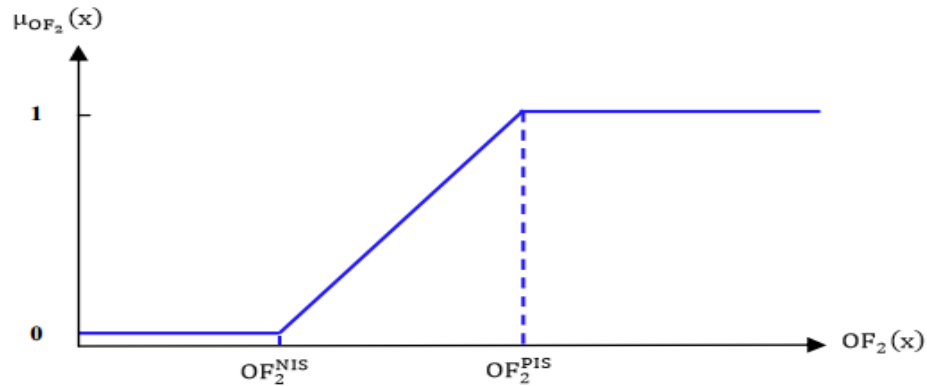


Figure 18: Fonction d'adhésion des livraisons à temps

#### 4.1.1.4. Étape 4 :

Transformation du modèle multi-objectif en un modèle à objectif unique en tenant compte des deux cas : le cas des chaînes logistiques centralisées, et le cas des chaînes logistiques décentralisées.

a. Cas des structures centralisées.

Afin de traiter le problème dans les chaînes logistiques à gestion centralisée, l'approche additive pondérée proposée dans le travail [116] a été utilisée. Cette approche est définie par l'équation suivante (équation 29) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \sum_k \omega_k * \mu_k(x) \\ \text{S. t} \\ \mu_k(x) \in [0,1] \\ x \geq 0 \end{array} \right. \quad (29)$$



Dans cette approche,  $\omega_k$  et  $\mu_k$  désignent respectivement le poids et le degré de satisfaction du  $k^{ième}$  objectif. Par conséquent, cette approche additive pondérée permet au partenaire dominant dans la chaîne logistique d'attribuer différents poids aux objectifs individuels.

L'application de cette approche [116], sur le modèle proposé dans ce travail, peut-être formulée comme suit (voir équation 30):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x) \\ \text{S. t} \\ \mu_{OF_1}(x), \mu_{OF_2}(x) \in [0,1] \end{array} \right. \quad (30)$$

1 – 14

b. Cas des structures décentralisées.

Afin de traiter le problème, des chaîne logistiques décentralisées les approches mentionnées dans les articles[137] et [119] ont été utilisées. Selon ces approches, un modèle multi-objectif peut être transformé en un modèle à objectif unique par l'équation (voir équation 31):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * \sum_k \theta_k * \lambda_k(x) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 + \lambda_k \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, n \\ x \in F(x) \\ \lambda_0, \lambda_k, \gamma \in [0,1] \end{array} \right. \quad (31)$$

Où  $\mu_k$  et  $\lambda_0 = \min\{\mu_k(x)\}$  dénotent le degré de satisfaction correspondant à la  $k^{ième}$  fonction objectif, ainsi que le degré minimum de satisfaction des objectifs, respectivement. En outre,  $\lambda_k$  désigne la différence entre le niveau de satisfaction de chaque objectif et le niveau minimum de satisfaction correspondant aux objectifs ( $\lambda_k = \mu_k - \lambda_0$ ). En outre,  $\theta_k$  et  $\gamma$  indiquent l'importance relative, respectivement, à la  $k^{ième}$  fonction objectif et au coefficient de compensation.

Les paramètres  $\theta_k$  sont déterminés en fonction des préférences du décideur tel que (voir équation 32) :

$$\sum_k \theta_k = 1; \theta_k > 0. \quad (32)$$

L'application de cette approche, sur le modèle proposé dans ce travail, peut-être formulée comme suit (voir équation 33) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser } \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * (\omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x)) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 + \lambda_{OF_1} \leq \mu_{OF_1}(x) \\ \lambda_0 + \lambda_{OF_2} \leq \mu_{OF_2}(x) \\ \omega_{OF_1} + \omega_{OF_2} = 1; \\ \lambda_0, \lambda_{OF_1}, \lambda_{OF_2}, \gamma \in [0,1] \end{array} \right. \quad (33)$$

Selon les chercheurs [118], l'approche proposée par l'article [117] aboutit généralement à une solution efficace mais malheureusement déséquilibrée et mal compromise, de sorte que les degrés de satisfaction des objectifs présentent des différences considérables, ce qui n'est pas souvent acceptable par les décideurs. Pour surmonter ce problème, les chercheurs proposent une nouvelle approche pour transformer les modèles multi-objectif en un modèle à objectif unique [138], (voir équation 34) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * \sum_k \theta_k * \lambda_k(x) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, n \\ x \in F(x) \\ \lambda_0, \gamma \in [0,1] \end{array} \right. \quad (34)$$

Où  $\mu_k$  et  $\lambda_0 = \min\{\mu_k(x)\}$  Représentent respectivement, le degré de satisfaction de la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif et le degré minimum de satisfaction des objectifs. En outre,  $\theta_k$  et  $\gamma$  indiquent le degré l'importance relative à la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif ainsi que le coefficient compensation.

L'application de cette approche, sur le modèle proposé dans ce travail, peut-être formuler comme suit (voir équation 35) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser } \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * (\omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x)) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 \leq \mu_{OF_1}(x) \\ \lambda_0 \leq \mu_{OF_2}(x) \\ \omega_{OF_1} + \omega_{OF_2} = 1; \\ \lambda_0, \gamma \in [0,1] \end{array} \right. \quad (35)$$

#### 4.1.1.5. Étape 5 :

Spécification de l'importance des objectifs  $\omega_{OF_1}$  et  $\omega_{OF_2}$  et la valeur du coefficient de compensation  $\gamma$ , est définie en fonction des préférences des décideurs. Finalement, la résolution du problème à

objectif unique. Si le décideur est satisfait, la solution efficace est retenue, puis l'arrêt et la sélection de la solution actuelle comme décision finale ; sinon, la modification des paramètres requis en fonction des préférences mises à jour du décideur. Puis la reformulation du modèle et la répétition des cinq étapes.

## 5. Résultats et analyse

### 5.1. Étude de cas

Les solutions proposées ont été appliquées sur une chaîne logistique textile et la résolution proposée du modèle est codée à l'aide du logiciel d'optimisation *GAMS 22.5/CPLEX 12.2* et toutes les expériences numériques sont résolues à l'aide d'un ordinateur *Core i5 2,20 GHz* avec *4 Go de RAM*.

#### 5.1.1. Valeurs numériques des paramètres

Le tableau (voir Tableau 6) présente la distribution aléatoire, des paramètres du modèle, associée à une chaîne logistique en textile.

Tableau 6: Paramètres déterministes

Parameter	Related random distribution	Parameter	Related random distribution
$DC_{k,c,t}$	$\sim U(1000,1200)$	$VR_{Mrm}$	$\sim U(0.8,1.5)$
$CQSP_{rm,s,p,t}$	$\sim U(1,2)$	$Pcapp_{p,t}$	$\sim U(40000,60000)$
$CIPR_{Mrm,p,t}$	$\sim U(3,4)$	$TTP_{p,t}$	$\sim U(3000,3000)$
$CQP_{Kk,p,t}$	$\sim U(3,4)$	$KPCap_{k,p,t}$	$\sim U(1000,1200)$
$CIPR_{Mrm,p,t}$	$\sim U(1,2)$	$pt_{k,p}$	$\sim U(0.1,0.9)$
$CIP_{Kk,p,t}$	$\sim U(2,3)$	$stk_{p,t}$	$\sim U(10,15)$
$CQPD_{k,p,d,t}$	$\sim U(4,5)$	$VK_k$	$\sim U(2,3)$
$CIDK_{k,d,t}$	$\sim U(4,5)$	$KPcapmin_{k,p,t}$	$\sim U(100,120)$
$CQDC_{k,d,c,t}$	$\sim U(2,3)$	$DKCap_{d,t}$	$\sim U(40000,60000)$
$CBQC_{k,c,t}$	$\sim U(2,3)$	$LDT_s$	$\sim U(2000,3500)$
$Scap_{rm,s,t}$	$\sim U(1200,1200)$	$Tacc_{k,c}$	$\sim U(0.80,0.85)$
$\alpha_{rm,k}$	$\sim U(0.1,0.3)$	$\beta_{k,c}$	$\sim U(0.10,0.15)$
$IPRMO_{rm,p}$	$\sim U(0,0)$	$IPKO_{k,p}$	$\sim U(0,0)$
$IDKO_{k,d}$	$\sim U(0,0)$	$BQCO_{k,c}$	$\sim U(0,0)$
$LTO_{s,p}$	$\sim U(1,1)$	$LT1_{p,d}$	$\sim U(1,1)$
$LT2_{d,c}$	$\sim U(1,1)$		

### 5.1.2. Résultats obtenus par les trois approches

Les résultats obtenus, par l'approche proposée dans l'article [117], pour les structures des chaînes logistiques centralisées, ainsi que les résultats obtenus par les approches proposées dans les articles [138] et [117] pour les structures décentralisées sont présentés dans la sous-partie suivante. Pour explorer l'influence de différents poids sur les résultats des problèmes, plusieurs instances de problème sont générées, sachant que  $\gamma$  désigne le coefficient de compensation.

#### 5.1.2.1. Résultats obtenus pour les structures centralisées

Le tableau (voir Tableau 7) représente les résultats obtenus par l'approche de Tiwari de l'article [116]. Il résulte, que le degré de satisfaction de chaque fonction objectif augmente avec l'augmentation de son poids. Ainsi, avec les valeurs numériques des paramètres prises, le 0.7 et 0.3 pour le poids respectivement de OF1 et OF2, donnent une satisfaction optimale des deux fonctions objectifs.

Tableau 7: Les résultats obtenus par l'approche Tiwari 1987 [116]

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b><math>\omega OF1</math></b>	0.1	0.3	0.5	<b>0.7</b>	0.9
<b><math>\omega OF2</math></b>	0.9	0.7	0.5	<b>0.3</b>	0.1
<b><math>\mu OF1(x)</math></b>	0.79	0.93	0.89	<b>0.94</b>	0.99
<b><math>\mu OF2(x)</math></b>	1.00	0.98	0.97	<b>0.95</b>	0.64

#### 5.1.2.2. Résultats obtenus pour les structures décentralisées

Le tableau ( voir Tableau 8) représente les résultats obtenus par les deux approches citées dans les articles [117] [118], pour gérer les structures décentralisées. En effet, les résultats du tableau montrent que la méthode proposée par l'article [117] est sensible au coefficient de compensation de sorte qu'elle produit différentes solutions déséquilibrées. D'autre part, la méthode proposée par l'article [118] n'est pas très sensible à la valeur de sorte qu'elle produit de manière appropriée des solutions efficaces.

Tableau 8: Les résultats obtenus par les approches Selim 2008 [117] et Torabi 2009 [118]

		<b><math>\gamma</math></b>						
		<b>0.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>
<b>SO</b>	<b><math>\mu OF1(x)</math></b>	0.96	0.95	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89
	<b><math>\mu OF2(x)</math></b>	1.00	0.98	0.97	0.97	0.97	0.95	0.96
<b>TH</b>	<b><math>\mu OF1(x)</math></b>	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.92</b>	<b>0.93</b>	<b>0.94</b>	<b>0.94</b>
	<b><math>\mu OF2(x)</math></b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>

## 5.2. Analyse de sensibilité

L'analyse post-optimale ou l'analyse de sensibilité permet de déterminer les intervalles de variations des données pour lesquels la base optimale de la solution ne change pas et reste toujours optimale. Cette analyse permet de déterminer la sensibilité d'un programme par rapport aux données. Dans ce sens, une analyse de sensibilité a été réalisée pour étudier l'impact de certains paramètres sur la valeur des deux fonctions objectives. Le tableau du fournisseur (voir du fournisseur

Tableau 9) représente l'impact des délais de livraison fournis par le fournisseur et l'impact de la capacité du fournisseur sur le deuxième objectif. Ainsi, le même tableau est représenté graphiquement (voir Figure 20 ), qui permettent de déduire que les quantités de matières premières livrées à temps augmentent à mesure que les deux paramètres augmentent. Donc une décision légitime c'est de considérer un poids plus élevé à ces critères lors de la sélection des fournisseurs.

L'impact de la capacité de production sur les coûts totaux est présenté dans le tableau (voir Tableau 10), le même tableau est représenté graphiquement dans le graphe (voir Figure 21) qui montre que le coût total diminue lorsque la capacité de production augmente.

Enfin, le graphe (voir Figure 22) présente un résumé des coûts totaux d'une capacité de production de 3000. Il résulte que les coûts de stockage y compris (stockage dans les usines et les dans les centres de distribution) sont égaux à zéro. Cela est dû au fait que le modèle privilégie la distribution (les coûts de distribution représentent la valeur la plus élevée dans le graphique) plutôt que le stockage pour satisfaire la demande client. Ce qui est vérifié par le total des coûts de *backorder* égal à zéro.

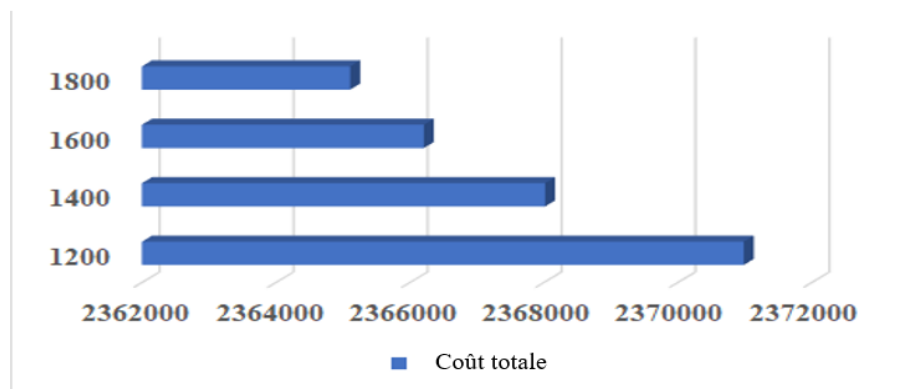


Figure 19: Analyse de sensibilité de OF1 par rapport à la capacité des fournisseurs

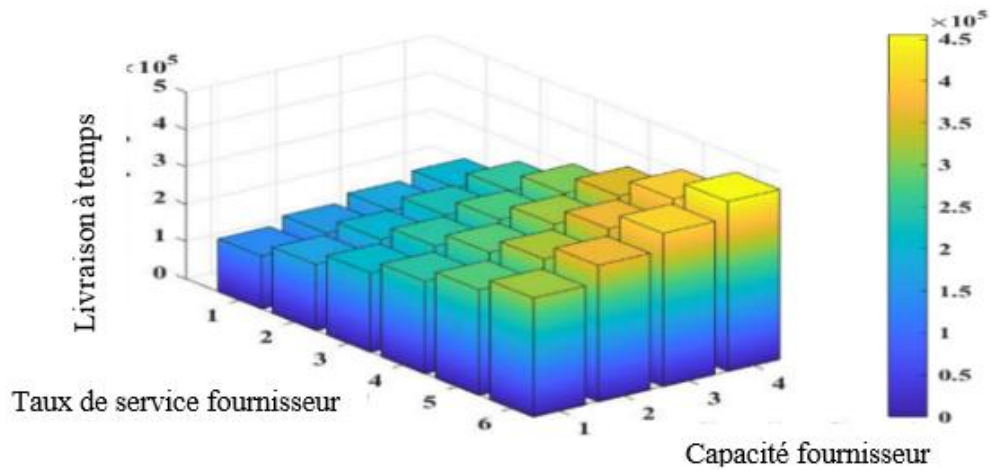


Figure 20:Analyse de sensibilité de OF2 par rapport au taux de service et la capacité du fournisseur

Tableau 9:Analyse impact de la capacité des fournisseurs et du le taux de service

Taux de service — capacité du fournisseur	1200	1400	1600	1800
<b>0,4</b>	141606	162466	182501	202354
<b>0,5</b>	177008	203083	228126	252942
<b>0,6</b>	212410	243700	273751	303531
<b>0,7</b>	247811	284317	319377	354120
<b>0,8</b>	283213	324933	365002	404708
<b>0,9</b>	318615	365550	410627	<b>455297</b>

Tableau 10:Analyse de l'impact de la capacité de production

Capacité de production	Capacity 1000	1500	2000	2500	3000
<b>Coût total</b>	2392533	2379413	2374968	2372623	2371522

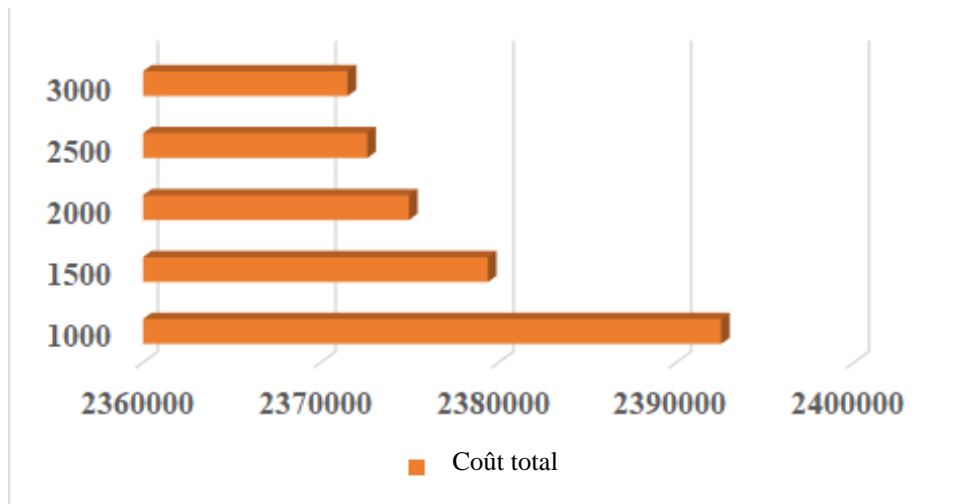


Figure 21: Analyse de sensibilité de OF1 par rapport à la capacité de production 3000

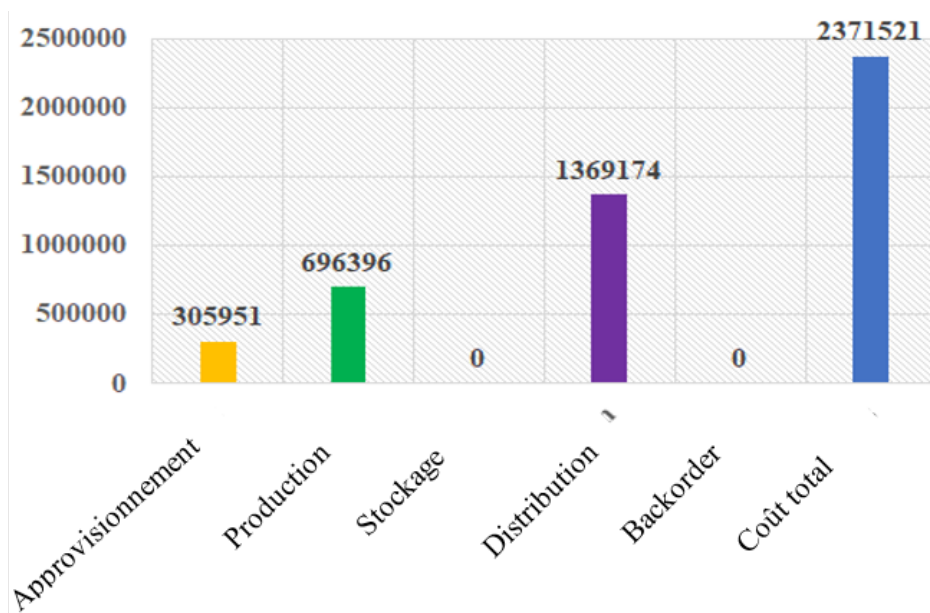


Figure 22: Résumé des coûts totaux pour une capacité de production = 3000

## 6. Conclusion

Ce chapitre traite le problème d'intégration de la chaîne logistique au niveau tactique. Cela est fait, par un problème de modélisation mathématique linéaire mixte à deux objectifs. Ce problème d'optimisation prend en compte les contraintes technologiques liées à de nombreux types de réseaux de la chaîne logistique. Il vise à minimiser les coûts totaux tels que, le coût de la production,

le coût du stockage et le coût de la distribution. Et aussi maximiser les livraisons à temps afin d'assurer un flux continu de production et de minimiser les arrêts de ligne dans les usines dus à l'indisponibilité des matières premières. Les solutions proposées ont été appliquées sur une étude de cas d'une chaîne logistique en textile.

En revanche selon les chercheurs, toute modélisation qui se base sur des conditions déterministes risque de perdre sa pérennité au cours du temps. Pour cela, il faut rapprocher le modèle d'optimisation proposé dans ce chapitre à la réalité industrielle incertaine. Pour ce faire, dans le prochain chapitre, le modèle mathématique proposé sera transformé en un modèle conceptuel flou qui permet d'absorber les perturbations et la majorité des événements incertains qui peuvent subvenir dans le monde industriel.



# CHAPITRE III : La modélisation de la chaîne logistique sous incertitude.

## 1. Introduction

Il est vrai que toute planification de la chaîne logistique qui repose sur des conditions déterministes risque de perdre sa durabilité et sa continuité [95]. Donc, il ne suffit pas de prendre en considération seulement des paramètres habituels tels que la demande, les prix ou d'autres paramètres tels que des variables aléatoires, mais, il faut considérer aussi des évènements indésirables tels que les attentats terroristes et les catastrophes naturelles... Par conséquent, il est nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui intègre l'incertitude dans la gestion de l'intégration de la chaîne logistique. Pour rapprocher le modèle mathématique, proposé dans le chapitre II, à la réalité industrielle incertaine, les coefficients de la fonction objectif et des contraintes seront représentés par des nombres triangulaires flous tels que : la demande et la capacité de production. Le nouveau modèle flou équivalent au modèle déterministe déjà proposé sera modélisé par le critère de valeur attendue et le critère des contraintes de chance. Afin de résoudre ce modèle équivalent, il sera transformé à son équivalent net puis résolu par les mêmes approches déjà présentées dans le chapitre II. Ainsi la structure globale, du présent chapitre, est représentée sous forme d'un graphe décrivant la succession des idées de recherche (voir *Figure 23*)

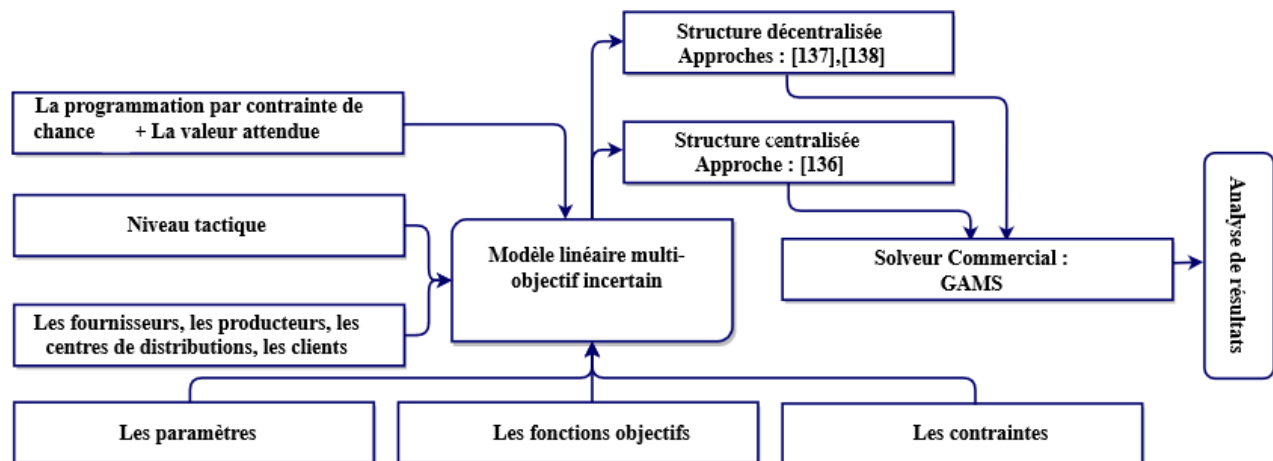


Figure 23:La structure du chapitre III

## 2. Problématique de l'incertitude dans la chaîne logistique

### 2.1. Contexte de l'incertitude dans la chaîne logistique

La gestion de la chaîne logistique est souvent confrontée à la présence de plusieurs types d'incertitudes qui affectent par exemple les délais, les demandes des clients... ces incertitudes peuvent engendrer des perturbations au niveau des systèmes de production. De ce fait, les décisions planifiées deviennent inapplicables [120]. Cette problématique de l'incertitude concerne principalement la prise des décisions (dans des situations de risque ou de crise, de difficulté de comprendre des informations relatives à l'environnement de la chaîne logistique, de manque de capacités de traitement de l'information et de prédire avec une bonne précision l'impact éventuel des mesures et des contrôles actuels sur le comportement de la chaîne logistique future, ainsi que le manque d'action de contrôle efficace) [95]. Dans ce sens, la gestion de l'incertitude dans la chaîne logistique est un défi majeur. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir une stratégie spécifique qui intègre l'incertitude dans les modèles d'optimisation de la chaîne logistique, afin d'améliorer le niveau de maturité de la chaîne logistique par rapport à la gestion des incertitudes (voir Figure 24).

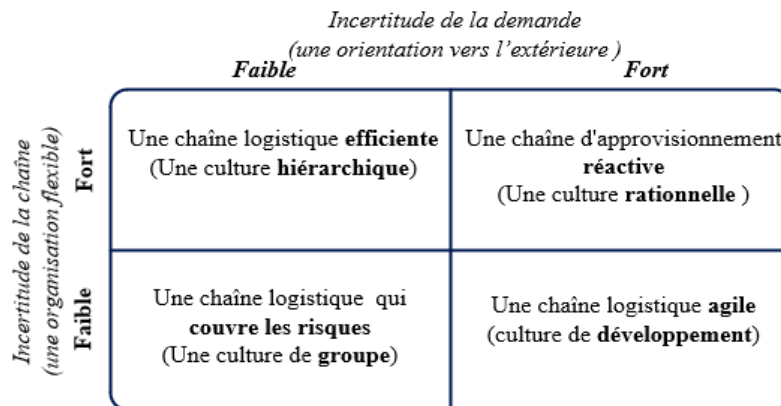


Figure 24: Maturité de la chaîne logistique au niveau de la gestion des incertitudes

#### 2.1.1. Types des incertitudes dans la chaîne logistique

La problématique liée à l'incertitude dans les chaînes logistiques est devenue, depuis quelques années, un sujet de recherche important [48]. En effet, il est nécessaire de connaître les différentes sources de l'incertitude. Dans ce cadre, différentes sources des incertitudes ont été distinguées [142][143] :

- a. La fiabilité des sources de l'information : la difficulté d'obtention ou de vérification des sources des informations.
- b. La qualité des prévisions : l'aspect aléatoire de la demande.
- c. L'imprécision et l'incomplétude des informations : les imprécisions peuvent être dues soit à une approximation (« environ dix pièces »), ou à une définition "floue" des bornes d'une catégorie (« vieux », « grand »), ou au passage progressif entre deux propriétés (« à côté de », « loin »).

### **2.1.2. Revue littérature de la gestion de l'incertitude**

La gestion de l'incertitude dans la chaîne logistique attire depuis quelques années une double attention à la fois dans la pratique et aussi dans le milieu universitaire[125]. Cette attention est justifiée par les circonstances vécues par les entreprises dans le cadre des pandémies et des perturbations politiques. En effet, plusieurs méthodes ont été suggérées pour pouvoir cerner l'incertitude dans la chaîne logistique, y compris l'application de la programmation mathématique floue. Dans ce sens, lorsque les informations disponibles sont vagues, la théorie de la programmation mathématique floue peut être utilisée afin de traiter à l'incertitude dans la chaîne logistique. Liu [123] a fourni un modèle qui hybride la programmation stochastique et la programmation floue. Ce modèle est nommé la théorie de la programmation incertaine. Pawlak [124] a initialisé la théorie approximative des ensembles, qui s'avère être un excellent outil mathématique qui traite des événements flous. L'hypothèse fondamentale de la théorie approximative des ensembles est que tout un événement est perçu à travers les informations disponibles, qui ne peuvent pas être suffisantes pour décrire exactement cet événement. Dans les travaux de recherche [125][126] les auteurs ont développé la variable aléatoire floue pour toute fonction mesurable dans un espace de probabilité. Dans le travail[127], l'auteur présente un modèle de programmation stochastique d'une chaîne logistique. Ce modèle stochastique est transféré à un modèle déterministe équivalent utilisant une programmation contrainte par le hasard, puis résolu par une procédure basée sur la décomposition. Une étude informatique est menée pour démontrer l'efficacité du modèle proposé. Les auteurs [128] envisagent un réseau de chaîne logistique stochastique de plusieurs usines fournissant plusieurs marchés avec un seul produit. Enfin, les auteurs [129] traitent un problème d'optimisation multi-objectif sous les incertitudes liées à des paramètres mal connus, qui sont représentées par des nombres flous triangulaires. Le modèle est

résolu par la méthode e-contrainte, et son application est démontrée par un exemple illustratif. Cooper [49] considère la programmation par contrainte de chance (CCP), comme un moyen efficace de gestion de l'incertitude. En effet, elle permet de spécifier le niveau de confiance que le gestionnaire souhaite maintenir. La programmation aléatoire floue est la théorie qui traite des problèmes d'optimisation dans des environnements aléatoires. La variable floue aléatoire a été initialisée par Liu [130]. Elle est définie comme une fonction dans un espace de possibilité à une collection de variables aléatoires. Autrement dit, une variable floue aléatoire est une variable floue définie sur l'ensemble universel de variables aléatoires.

### 2.1.3. Classification des modèles de programmation incertains

Il existe de nombreuses façons possibles pour classer les modèles de programmation incertains. Par exemple selon [131], ils peuvent être classés selon l'état des connaissances sur l'information, la structure de modélisation et la philosophie de gestion des incertitudes.

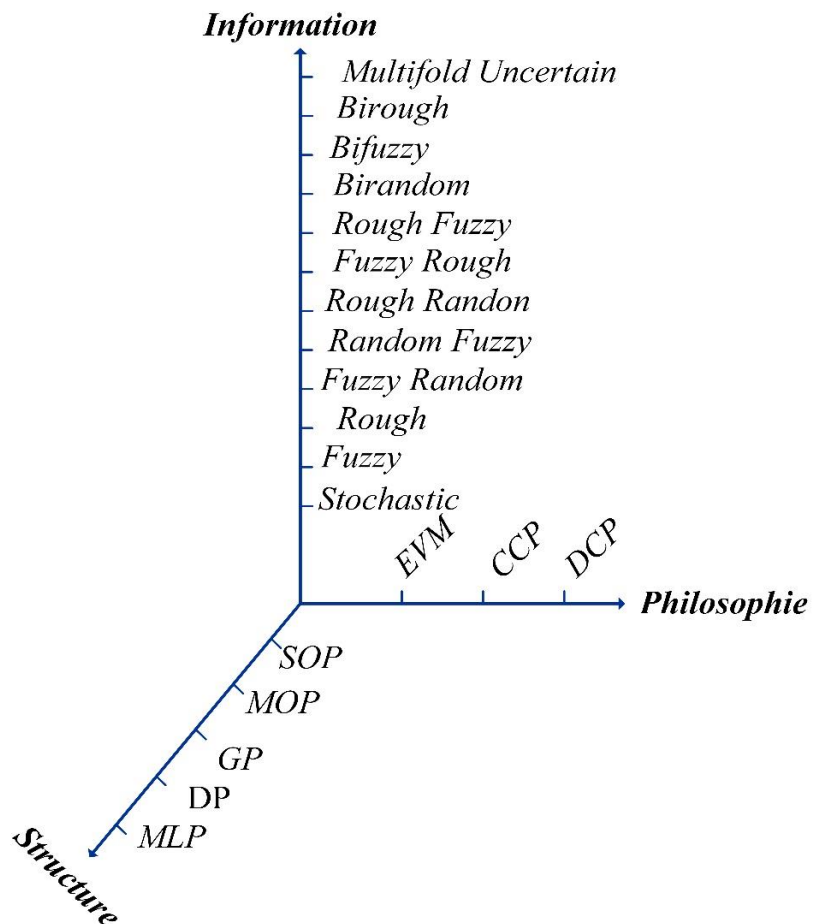


Figure 25: la classification de la programmation incertaine diagramme  $\Psi$  [131]

a. Type des variables de l'information :

- i. Variables stochastiques.
- ii. Variables floues.
- iii. Variables approximatives.
- iv. Variables aléatoires floues.
- v. Variables floues aléatoires.
- vi. Variables approximatives aléatoires.
- vii. Variables aléatoires approximatives.
- viii. Variables approximatives floues.
- ix. Variables approximatives floues.
- x. Variables Birandom.
- xi. Variables bifuzzy.
- xii. Variables de Birough.
- xiii. Variables incertaines multiples.

b. Modélisation de la structure :

- i. Programmation mono-objectif (Single-objective programming (SOP)).
- ii. Programmation multi-objectif (*Multiobjective programming* (MOP)).
- iii. Programmation par but (*Goal programming* (GP)).
- iv. Programmation dynamique (*Dynamic programmin* (DP)).
- v. Programmation à plusieurs niveau (*Multilevel programming* (MLP)).

c. Philosophie de la gestion des incertitudes :

- i. Modèle de la valeur attendue (*Expected Value Model* (EVM)).
- ii. (*Chance-Constrained Programming* (CCP)).
- iii. (*Dependent-chance programming*( DCP))

## **2.2. Méthodes de gestion de l'incertitude**

### **2.2.1. Programmation mathématique floue fondée sur théorie de crédibilité**

#### ***2.2.1.1. Définition de la théorie de la crédibilité***

Dans la théorie des ensembles flous, il existe trois types de mesures pour un évènement flou, à savoir : la possibilité, la nécessité et la mesure de crédibilité. La théorie des possibilités est considérée comme une base mathématique de la théorie des probabilités [122]. Ainsi, la théorie des possibilités est largement utilisée dans la littérature pour traiter les variables floues. De plus, la théorie des possibilités est incompatible avec la loi du tiers exclu et la loi de la contradiction. Par exemple, un évènement flou peut échouer même si sa valeur de possibilité égale à un (1) et de même il peut être maintenu même si sa valeur de nécessité égale à zéro (0). Ceci est principalement dû au fait que la mesure de possibilité ne satisfait pas la propriété d'autodualité qui est absolument nécessaire à la fois en théorie et en pratique. Pour surmonter cette difficulté, Liu et Liu [132] ont proposé une mesure d'autodualité, à savoir la mesure de crédibilité. Celle-ci est une indicatrice d'inégalité floue plus logique que la possibilité et la nécessité, car elle compense leurs inconvénients. Par exemple, un évènement d'une possibilité maximale égale à un (1) peut ne pas se produire alors qu'un évènement d'une crédibilité maximale égale à (1) se produira sûrement. De plus, un évènement flou d'une possibilité maximale égale à un (1) ne contient parfois aucune information tandis qu'un évènement flou d'une crédibilité maximale égale à (1) signifie qu'il se produira à la plus grande chance [133]. Dans le processus d'optimisation de la gestion et la planification, généralement le niveau de crédibilité est supposé supérieur à (0,5) pour éviter les non-satisfactions inappropriées et les risques violés [134].

#### ***2.2.1.2. Approches de programmation basée sur la crédibilité***

La programmation basée sur la crédibilité, est divisée en trois approches à savoir: la programmation par contraintes de chance [135], la programmation par le critère de la valeur attendue [132] et la programmation par contraintes de chance dépendantes [136].

##### **a. Programmation par contrainte de chance.**

Le premier modèle à savoir la programmation par contrainte de chance utilise l'opérateur de la valeur attendue pour chaque coefficient imprécis dans la fonction objectif et dans les contraintes. Il peut être appliqué facilement sans augmenter la complexité du modèle d'origine par rapport aux

deux autres méthodes de programmation, mais en même temps, il n'a aucun contrôle sur le niveau de confiance des contraintes floues.

b. Programmation par le critère de la valeur attendue

Le deuxième modèle, à savoir le critère de la valeur attendue, est capable de contrôler le niveau de satisfaction en utilisant le concept de  $\alpha$  – level. Mais il modèle augmente considérablement la complexité du modèle, car il ajoute une nouvelle contrainte pour chaque fonction objectif du modèle principal.

c. Programmation par contraintes de chance dépendantes

Le troisième modèle, à savoir la programmation par contraintes de chance dépendantes, il est similaire au second modèle d'une certaine manière. Mais il fournit une décision plus conservatrice pour le décideur, car il accorde plus d'importance à la maximisation des niveaux de satisfaction.

### **2.2.2. Choix des approches de programmation basée sur la crédibilité**

Dans la plupart des situations de la vie réelle, les paramètres d'entrée d'un problème logistique sont entachés d'un degré élevé d'incertitude épistémique. Pour faire face à ce problème difficile, la programmation par contraintes de chance et le critère de la valeur attendue paraissent comme des approches efficaces [137] [132]. Elle repose sur des concepts mathématiques solides (c'est-à-dire la valeur attendue d'un nombre flou et la mesure de crédibilité). De plus, elle peut prendre en charge différents types de nombres flous tels que les formes triangulaires et trapézoïdales, et permet au décideur de satisfaire certaines contraintes de chance avec au moins un certain niveau de confiance. Pour cela le présent travail considère, le critère de la valeur attendue et la programmation par contraintes de chance pour traiter respectivement les paramètres incertains des fonctions objectifs ainsi que les contraintes floues du modèle. La raison de cette combinaison, est justifier par le fait que l'opérateur de valeur attendue n'a pas besoin d'informations supplémentaires pour une fonction objectif telle que le niveau de confiance ou la solution idéale. Ajoutant, que cette combinaison bénéficie également des avantages de l'approche (programmation par contraintes de chance) afin de contrôler le niveau de satisfaction des contraintes floues en utilisant le concept de  $\alpha$  – level [134].

### 3. Modélisation multi-objectif de la chaîne logistique sous incertitudes

#### 3.1. Fuzzification du problème d'optimisation

##### 3.1.1. Application des théories de modélisation mathématique floue

Les planificateurs ont souvent des difficultés à prévoir la demande des clients en divers produits, et la capacité de production disponible dans une entreprise, en raison des pannes d'équipement imprévisibles. Ce qui fait que les demandes des clients et la capacité de production soit des variables toujours floues. De ce fait, le modèle d'optimisation linéaire déterministe est remplacé par un modèle d'optimisation flou. Dans cette section, les demandes, la capacité des fournisseurs, les coûts de toutes les unités, le transport, le stockage et backorder sont tous des variables floues. Ainsi, les coûts totaux et les livraisons à temps des matières premières sont également des variables floues.

##### 3.1.1.1. Paramètres flous du modèle :

- $\overline{SCap_{rm,s,t}}$ : Le paramètre de capacité floue du fournisseur  $s$  pour fournir la matière première  $rm$  pendant la période  $t$ .
- $\overline{DC_{k,c,t}}$ : Le paramètre de la demande floue du produit  $k$  requise par le client  $c$  à la période  $t$ .
- $\overline{\eta_{rm,s,p,t}}$ : Le paramètre du taux de livraison à temps flou de la matière première  $rm$  offert par le fournisseur  $s$  à l'usine  $p$  pendant la période  $t$ .
- $\overline{CBQC_{k,c,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire flou de *backorder* du produit  $k$  par le client  $c$  en période  $t$ .
- $\overline{CIPRM_{rm,p,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire flou de possession des stocks de la matière première  $rm$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CIPK_{k,p,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire flou de possession des stocks du produit fini  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CIDK_{k,d,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire flou de possession des stocks du produit fini  $k$  dans le centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .
- $V_k$ : Le volume de chaque produit  $k$ .



- $V_{rm}$ : Le volume unitaire de la matière première  $rm$ .
- $\overline{pt_{k,p,t}}$ : Le paramètre du temps de production flou du produit  $k$  dans l'usine  $p$ .
- $\overline{st_{k,p,t}}$ : Le paramètre du temps de configuration flou pour produire le produit  $k$  dans l'usine  $p$ .
- $\overline{TTP_{p,t}}$ : Le paramètre du temps maximal de disponibilité flou de l'usine  $p$  durant la période de temps  $t$ .
- $\overline{CQPK_{k,p,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire de production du produit  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CSPK_{k,p,t}}$ : Le paramètre  $f$  du coût unitaire de configuration de la ligne de production pour produire le produit  $k$  dans l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CQSP_{r,m,s,p,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire de transport de la matière première  $rm$  depuis le fournisseur  $s$  vers l'usine  $p$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CQPD_{k,p,d,t}}$ : Le paramètre du coût unitaire du transport de produit  $k$  depuis l'usine  $p$  vers le distributeur  $d$  durant la période  $t$ .
- $\overline{CQDC_{k,d,c,t}}$ : Le paramètre flou du coût unitaire du transport de produit  $k$  depuis le centre  $d$  vers le client  $c$  durant la période  $t$ .
- $\overline{PCap_{p,t}^1}$ : Le paramètre flou de la capacité de l'usine  $p$  pour le stockage des matières premières durant la période  $t$ .
- $\overline{PCa_{p,t}^2}$ : Le paramètre flou de la capacité de l'usine  $p$  pour le stockage des produits finis durant la période  $t$ .
- $\overline{DKCap_{d,t}}$ : Le paramètre flou de la capacité de l'entrepôt du centre de distribution  $d$  durant la période  $t$ .
- $\overline{\lambda_{k,d,c,t}}$ : Le paramètre du taux de livraison à temps flou du produit  $k$  offert par le centre de distribution  $d$  au client  $c$  dans le temps  $t$ .

### 3.1.1.2. Fonctions objectifs flous (le critère de la valeur attendue)

Pour traiter les fonctions objectifs flous du problème d'optimisation considéré, le présent travail intègre le critère de la valeur attendue dans les équations des fonctions objectifs principales. Ce qui formulé par les équations (voir équation 44) et (voir équation 45), qui simulent les fonctions objectifs flous du problème de l'intégration de la chaîne logistique sous incertitude

$$\begin{aligned}
\text{Min OF}_1 = & \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{CQSP}_{rm,s,p,t}] * QSP_{rm,s,p,t} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{CQPK}_{k,p,t}] * QPK_{k,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{CSPK}_{k,p,t}] * X_{k,p,t} \\
& + \sum_{rm \in RM} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{CIPRM}_{rm,p,t}] * IPRM_{rm,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{CIPK}_{k,p,t}] * IPK_{k,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} E[\overline{CQPD}_{k,p,d,t}] * QPD_{k,p,d,t} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} E[\overline{CIDK}_{k,d,t}] * IDK_{k,d,t} + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} E[\overline{CBQC}_{k,d,c,t}] * BQC_{k,d,c,t}
\end{aligned} \tag{44}$$

$$\text{Max OF}_2 = \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} E[\overline{\eta}_{rm,s,p,t}] * QSP_{rm,s,p,t} \tag{45}$$

### 3.1.1.3. Contraintes floues (la programmation par contrainte de chance)

Pour traiter les contraintes floues du problème d'optimisation considéré, le présent travail intègre le critère des contraintes de chance dans les équations contraintes principales. Ceci est formulé par les équations (voir équation 46- 59), qui simulent les contraintes floues du problème d'intégration de la chaîne logistique sous incertitude.

$$Cr \left\{ \sum_{p \in P} QSP_{rm,s,p,t} \leq \overline{SCap}_{rm,s,t} \right\} \geq \theta \quad ; \quad \forall rm \in RM, s \in S, p \in P, t \in T \tag{46}$$

$$IPRM_{rm,p,t} = IPRM_{rm,p,t-1} + \sum_{k \in K} \alpha_{rm,k} \times QPK_{k,p,t} \quad \forall rm \in RM, p \in P, t \in T \tag{47}$$

$$IPK_{k,p,t} = IPK_{k,p,t-1} + QPK_{k,p,t} - \sum_{d \in D} QPD_{k,p,d,t} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \tag{48}$$

$$IDK_{k,d,t} = IDK_{k,d,t-1} + \sum_{p \in P} QPD_{k,p,d,t} - \sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t} \quad \forall k \in K, d \in D, t \in T \quad (49)$$

$$Cr \left\{ \sum_{k \in K} \overline{pt_{k,p}} * QPK_{k,p,t} + \sum_{k \in K} \overline{st_{k,p}} * X_{k,p,t} \leq \overline{TTP_{p,t}} \right\} \geq \theta \quad ; \forall p \in P, t \in T \quad (50)$$

$$\sum_{rm \in RM} V_{rm} * IPRM_{rm,p,t} + \sum_{s \in S} \sum_{rm \in RM} V_{rm} * QSP_{rm,s,p,t} \leq PCap_{p,t}^1 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (51)$$

$$\sum_{k \in K} V_k * IPK_{k,p,t} \leq PCap_{p,t}^2 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (52)$$

$$\sum_{k \in K, p \in P} V_k * QPD_{k,p,d,t} + \sum_{k \in K} V_k * IDK_{k,d,t} \leq DKCap_{d,t} \quad \forall d \in D, t \in T \quad (53)$$

$$Cr \left\{ BQC_{k,c,t} = BQC_{k,c,t-1} + \overline{DC_{k,c,t}} - \sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \right\} \geq \theta \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (54)$$

$$Cr \left\{ \sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} - BQC_{k,c,t-1} \leq \overline{DC_{k,c,t}} \right\} \geq \theta \quad \forall k \in K, c \in C \quad (55)$$

$$Cr \left\{ \sum_{d \in D} QDC_{k,d,c,t} \leq \overline{DC_{k,c,t}} \right\} \geq \theta \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (56)$$

$$Cr \{ BQC_{k,c,t} \leq \beta_{k,c} * \overline{DC_{k,c,t}} \} \geq \theta \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (57)$$

$$Cr \{ \sum_{d \in D} (1 - \overline{\lambda_{k,d,c,t}}) * QDC_{k,d,c,t} \leq (1 - Tacc_{k,c}) * \overline{DC_{k,c,t}} \} \geq \theta \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T \quad (58)$$

$$QSP_{rm,s,p,t}, QPK_{k,p,t}, IPRM_{rm,p,t}, IPK_{k,p,t}, IDK_{k,d,t} \geq 0 \quad (59)$$

$$QPD_{k,p,d,t}, QDC_{k,d,c,t}, BQC_{k,c,t} \geq 0 \quad ; X_{k,p,t} \in \{0,1\}$$

### 3.2. Défuzzification du problème d'optimisation flou

Afin de résoudre le problème d'optimisation flou, il faut le transformer à son équivalent net. Donc, il est devenu évident de transformer, les fonctions objectifs floues ainsi que les contraintes floues, en leurs équivalentes nettes. Cela doit être fait par rapport au niveau de confiance prédéterminé par le décideur. Par la suite, résoudre le modèle équivalent net en utilisant la théorie de crédibilité [117]. Dans ce sens, les paramètres incertains sont représentés par des nombres flous triangulaires.

### 3.2.1. Application de la théorie de crédibilité

#### 3.2.1.1. Distribution de la crédibilité

Soit  $\xi$  une variable floue de fonction d'appartenance  $\mu(x)$ , et soit  $t$  un nombre réel. Selon les chercheurs[132], la mesure de crédibilité est définie comme suit (voir équation 37):

$$\text{Cr}\{\xi \leq t\} = \frac{1}{2} \left( \text{Sup}_{x \leq t} \mu(x) + 1 - \text{Sup}_{x > t} \mu(x) \right), \quad (37)$$

Sachant que, à partir de  $\text{Pos}\{\xi \leq t\} = \text{Sup}_{x \leq t} \mu(x)$  et  $\text{Nec}\{\xi \leq t\} = 1 - \text{Sup}_{x > t} \mu(x)$ , la mesure de crédibilité peut-être définie comme (voir équation 38):

$$\text{Cr}\{\xi \leq t\} = \frac{1}{2} (\text{Pos}\{\xi \leq t\} + \text{Nec}\{\xi \leq t\}), \quad (38)$$

En conséquence, la mesure de crédibilité pourrait être définie comme une moyenne des mesures de possibilité (Pos) et de nécessité (Nec). De plus, la valeur attendue de  $\xi$  peut être déterminée en fonction de la mesure de crédibilité comme suit [132] (voir équation 39):

$$E[\xi] = \int_0^{\infty} \text{Cr}\{\xi \geq t\} dt - \int_{-\infty}^0 \text{Cr}\{\xi \leq t\} dt, \quad (39)$$

Maintenant, supposons que  $\xi$  est un nombre flou triangulaire défini par trois points (a,b,c). D'après l'équation (voir équation 39), la valeur attendue (*expected value*) de  $\xi$  est  $E[\xi] = \frac{a+2*b+c}{4}$  et les mesures correspondantes de crédibilité sont les suivantes (voir équation 40,41) :

$$\text{Cr}\{\xi \leq t\} = \begin{cases} 0, & \text{si } t \leq a \\ (t - a)/2(b - a), & \text{si } a < t \leq b \\ (c - 2b + t)/2(c - b), & \text{si } b < t \leq c \\ 1, & \text{si } t > c \end{cases} \quad (40)$$

$$\text{Cr}\{\xi \geq t\} = \begin{cases} 1, & \text{si } t \leq a \\ (2b - a - t)/2(b - a), & \text{si } a < t \leq b \\ (c - t)/2(c - b), & \text{si } b < t \leq c \\ 0, & \text{si } t > c \end{cases} \quad (41)$$

#### 3.2.1.2. Distribution de la crédibilité inverse

Sur la base des équations (40) et (41), selon la littérature [138], il peut être prouvé que si  $\xi$  est un nombre triangulaire flou et  $\beta > 0,5$  alors les équations suivantes sont correctes (voir équation 42,43). Pratiquement, les équations (42) et (43) peuvent être appliquées directement par rapport aux valeurs  $\alpha$  – level proposé par Liu [139], pour convertir les contraintes floues en leurs équivalentes nettes.

$$\text{Cr}\{\xi \leq t\} \geq \beta \Leftrightarrow t \geq (2\beta - 1)c + (2 - 2\beta)b \quad (42)$$

$$\text{Cr}\{\xi \geq t\} \geq \beta \Leftrightarrow t \leq (2\beta - 1)a + (2 - 2\beta)b \quad (43)$$

### 3.2.2. Fonctions objectifs équivalentes nettes

Les équations équivalentes nettes des fonctions objectifs (voir équation 60-61) et des contraintes équivalentes nettes (voir les équations 46, 50, 51, 54, 55, 56, 57, 58) sont données sur la base de la propriété des nombres flous triangulaires,

$$\begin{aligned} & \text{Min OF}_1 \\ & = \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{CQSP^a_{rm,s,p,t} + 2 * CQSP^b_{rm,s,p,t} + CQSP^c_{rm,s,p,t}}{4} \right) \\ & * QSP_{rm,s,p,t} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{CQPK^a_{k,p,t} + 2 * CQPK^b_{k,p,t} + CQPK^c_{k,p,t}}{4} \right) * QPK_{k,p,t} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{CSPK^a_{k,p,t} + 2 * CSPK^b_{k,p,t} + CSPK^c_{k,p,t}}{4} \right) * X_{k,d,t} \\ & + \sum_{rm \in RM} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{CIPRM^a_{rm,p,t} + 2 * CIPRM^b_{rm,p,t} + CIPRM^c_{rm,p,t}}{4} \right) * IPRM_{rm,p,t} \quad (60) \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{CIPK^a_{k,p,t} + 2 * CIPK^b_{k,p,t} + CIPK^c_{k,p,t}}{4} \right) * IPK_{k,p,t} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \left( \frac{CQPD^a_{k,p,d,t} + 2 * CQPD^b_{k,p,d,t} + CQPD^c_{k,p,d,t}}{4} \right) * QPD_{k,p,d,t} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \left( \frac{CIDK^a_{k,d,t} + 2 * CIDK^b_{k,d,t} + CIDK^c_{k,d,t}}{4} \right) * IDK_{k,d,c,t} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \left( \frac{CBQC^a_{k,d,c,t} + 2 * CQDC^b_{k,d,c,t} + CQDC^c_{k,d,c,t}}{4} \right) * BQC_{k,d,c,t} \end{aligned}$$

$$\text{Min OF}_2 = \sum_{rm \in RM} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \left( \frac{\eta^a_{rm,s,p,t} + 2 * \eta^b_{rm,s,p,t} + \eta^c_{r,s,p,t}}{4} \right) * QSP_{rm,s,p,t} \quad (61)$$

### 3.2.3. Contraintes équivalentes nettes

$$\begin{aligned} \sum_{rm \in RM} QSP_{rm,s,p,t} & \leq (2\theta - 1) * SCap^a_{rm,s,t} + (2 - 2\theta) * SCap^b_{rm,s,t} ; \\ & \forall rm \in RM, s \in S, p \in P, t \in T \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k \in K} [(2\theta - 1) * pt^c_{k,p} + (2 - 2\theta) * pt^b_{k,p}] * QPK_{k,p,t} \\
& + \sum_{k \in K} [(2\theta - 1) * st^c_{k,p} + (2 - 2\theta) * st^b_{k,p}] * X_{k,p,t} \\
& \leq [(2\theta - 1) * TTP^a_{p,t} + (2 - 2\theta) * TTP^b_{p,t}]; \forall p \in P, t \in T
\end{aligned} \tag{63}$$

$$\begin{aligned}
BQC_{k,c,t} = BQC_{k,c,t-1} + \left( \frac{DC^a_{k,c,t} + 2 * DC^b_{k,c,t} + DC^c_{k,c,t}}{4} \right) - \sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t}; \\
\forall k \in K, c \in C, t \in T
\end{aligned} \tag{64}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t} - BQC_{k,c,t-1} \leq (2\theta - 1) * DC^a_{k,c,t} + (2 - 2\theta) * DC^b_{k,c,t}; \\
\forall k \in K, d \in D, t \in T
\end{aligned} \tag{65}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{c \in C} QDC_{k,d,c,t} \leq (2\theta - 1) * DC^a_{k,c,t} + (2 - 2\theta) * DC^b_{k,c,t}; \\
\forall k \in K, c \in C, t \in T
\end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
BQC_{k,d,t} \leq \beta_{k,c} * [(2\theta - 1) * DC^a_{k,c,t} + (2 - 2\theta) * DC^b_{k,c,t}]; \\
\forall k \in K, c \in C, t \in T
\end{aligned} \tag{67}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{c \in C} (1 - [(2\theta - 1) * \lambda^c_{k,d,c,t} + (2 - 2\theta) * \lambda^b_{k,d,c,t}]) * QDC_{k,d,c,t} \\
\leq (1 - Tacc_{k,c}) * [(2\theta - 1) * DC^a_{k,c,t} + (2 - 2\theta) * DC^b_{k,c,t}]; \\
\forall k \in K, c \in C, t \in T
\end{aligned} \tag{68}$$

## 4. Résolution du problème d'optimisation multi-objectif incertain

### 4.1. Solution proposée

Relativement à la structure de la chaîne logistique, trois approches sont utilisées dans ce travail, qui sont : l'approche additive pondérée proposée par [116], pour gérer les structures centralisées des chaînes logistiques. L'approche proposée par [117] et l'approche proposée par [118] pour la gestion des structures décentralisées des chaînes logistiques.

Les étapes, de la méthode interactive floue utilisée, peuvent être résumées dans la sous-partie suivante.

### 4.1.1. Étapes de la solution

#### 4.1.1.1. Étape 1 :

Résoudre le modèle en considérant un problème à objectif unique concernant les coûts en d'autres termes :

- a. La fonction des coûts totaux : soumise aux contraintes (voir équation 62-68) et (voir équation 47, 48, 49 ,51, 52 ,59).
- b. La fonction du niveau de service : soumise aux contraintes (voir équation 62-68) et (voir équation 47, 48, 49 ,51, 52 ,59).

Soit  $x$  et  $x'$  les solutions optimales obtenues, en résolvant les problèmes à objectif unique, respectivement pour la fonction d'objectif des coûts totaux et la fonction d'objectif du niveau de service. Si  $x = x'$ , une solution alors la solution efficace est obtenue (compromis préféré), ainsi le processus doit arrêter ; sinon, le processus passe à l'étape 2.

#### 4.1.1.2. Étape 2 :

Évaluer les deux fonctions objectifs par rapport aux solutions obtenues. Déterminer la solution idéale  $\alpha$ -négative ( $OF_1^{NIS}$ ) et la solution idéale  $\alpha$ -positive ( $OF_1^{PIS}$ ) pour l'objectif des coûts totaux ; et la solution idéale  $\alpha$ -négative ( $OF_2^{NIS}$ ) et la solution idéale  $\alpha$ -positive ( $OF_2^{PIS}$ ) pour l'objectif du niveau de service comme suit (voir équation (78)).

$$\begin{cases} OF_1^{NIS} = OF_1(x) \\ OF_1^{PIS} = OF_1(x') \\ OF_2^{PIS} = OF_2(x') \\ OF_2^{NIS} = OF_2(x) \end{cases} \quad (78)$$

#### 4.1.1.3. Étape 3 :

Définir les fonctions d'appartenance linéaires pour les fonctions objectifs des coûts totaux et du niveau de service comme suit (voir équations 79 et 80) :

$$\mu_{OF_1}(x) = \begin{cases} 1, & OF_1(x) \leq OF_1^{NIS} \\ \frac{OF_1^{PIS} - OF_1(x)}{OF_1^{PIS} - OF_1^{NIS}}, & OF_1^{NIS} < OF_1(x) \leq OF_1^{PIS} \\ 0, & OF_1(x) \geq OF_1^{PIS} \end{cases} \quad (79)$$

$$\mu_{OF_2}(x) = \begin{cases} 1, & OF_2(x) \geq OF_2^{PIS} \\ \frac{OF_2(x) - OF_2^{NIS}}{OF_2^{PIS} - OF_2^{NIS}}, & OF_2^{NIS} < OF_2(x) \leq OF_2^{PIS} \\ 0, & OF_2(x) \leq OF_2^{NIS} \end{cases} \quad (80)$$

Où  $\mu_{OF_1}(x)$  et  $\mu_{OF_2}(x)$  désignent respectivement le degré de satisfaction des fonctions objectifs qui concerne le coût total et du niveau de service pour la solution donnée  $x$ . Une représentation graphique des deux fonctions d'appartenance est présentée (*Figure 17 et Figure 18*) respectivement.

#### 4.1.1.4. Étape 4 :

Convertir le modèle équivalent net multi-objectif en un modèle mono-objectif en tenant compte des deux cas, le cas d'une chaîne logistique centralisée et le cas d'une chaîne logistique décentralisée.

a. La chaîne logistique centralisée.

Afin de traiter le problème pour le cas de la chaîne logistique centralisée, les auteurs [116] utilisent l'approche additive pondérée. Cette approche est définie comme suit (voir équation 81) :

$$\begin{cases} \text{Max} \sum_k \omega_k * \mu_k(x) \\ \text{S. t} \\ \mu_k(x) \in [0,1] \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (81)$$

Dans cette approche,  $\omega_k$  et  $\mu_k$  désignent respectivement le poids et le degré de satisfaction du  $k^{\text{ième}}$  objectif. Par conséquent, l'approche additive pondérée [116] permet au partenaire dominant dans la chaîne logistique d'attribuer différents poids aux objectifs individuels.

L'application de cette approche [116], sur notre modèle équivalent net peut-être formulée comme suit (voir équation 82).

$$\begin{cases} \text{Max} \omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x) \\ \text{S. t} \\ \mu_{OF_1}(x), \mu_{OF_2}(x) \in [0,1] \\ (62 - 68), (47, 48, 49, 51, 52, 59). \end{cases} \quad (82)$$

b. La chaîne logistique décentralisée.



Afin de traiter le cas de la chaîne logistique décentralisée, deux approches sont considérées [117] et [119]. Selon ces approches, le modèle multi-objectif équivalent net peut être transformé en un modèle à objectif unique comme suit (voir équation 83):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \quad \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * \sum_k \theta_k * \lambda_k(x) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 + \lambda_k \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, n \\ x \in F(x) \\ \lambda_0, \lambda_k, \gamma \in [0, 1] \end{array} \right. \quad (83)$$

Où  $\mu_k$  et  $\lambda_0 = \min\{\mu_k(x)\}$  dénotent le degré de satisfaction correspondant respectivement, à la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif et le degré minimum de satisfaction des objectifs. En outre,  $\lambda_k$  désigne la différence entre le niveau de satisfaction de chaque objectif et le niveau minimum de satisfaction correspondant aux objectifs ( $\lambda_k = \mu_k - \lambda_0$ ). En outre,  $\theta_k$  et  $\gamma$  indiquent l'importance relative, respectivement, à la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif et au coefficient de compensation.

Les paramètres  $\theta_k$  sont déterminés par le décideur en fonction de ses préférences (voir équation 84) :

$$\sum_k \theta_k = 1 ; \theta_k > 0. \quad (84)$$

L'application de cette approche [117], sur notre modèle équivalent net peut-être formulée comme suit pour résoudre un modèle unique( voir équation 85).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser} \quad \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * (\omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x)) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 + \lambda_{OF_1} \leq \mu_{OF_1}(x) \\ \lambda_0 + \lambda_{OF_2} \leq \mu_{OF_2}(x) \\ \omega_{OF_1} + \omega_{OF_2} = 1; \\ \lambda_0, \lambda_{OF_1}, \lambda_{OF_2}, \gamma \in [0, 1] \end{array} \right. \quad (85)$$

(62 – 68), (47, 48, 49 ,51, 52 ,59).

Concernant l'efficacité de l'approche proposée par [117], cette approche aboutit généralement à une solution efficace, mais déséquilibrée de sorte que les degrés de satisfaction des objectifs présentent des différences considérables, la chose qui est critiquée par les décideurs [118]. Pour surmonter ce problème, une nouvelle approche floue monphasée a été proposée [118]. Selon cette approche [118], un modèle multi-objectif pourrait être transformé en un modèle à objectif unique en appliquant (l'équation 86):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \quad \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * \sum_k \theta_k * \lambda_k(x) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 \leq \mu_k(x) \quad k = 1, 2, \dots, n \\ x \in F(x) \\ \lambda_0, \gamma \in [0, 1] \end{array} \right. \quad (86)$$

Où  $\mu_k$  et  $\lambda_0 = \min\{\mu_k(x)\}$  : représentent respectivement, le degré de satisfaction de la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif et le degré minimum de satisfaction des objectifs. En outre,  $\theta_k$  et  $\gamma$  indiquent l'importance relative à la  $k^{\text{ème}}$  fonction objectif et l'importance du coefficient compensation.

L'application de cette approche [118], sur notre modèle équivalent net peut-être formulée comme suit (voir équation 87).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maximiser} \quad \lambda(x) = \gamma * \lambda_0 + (1 - \gamma) * (\omega_{OF_1} * \mu_{OF_1}(x) + \omega_{OF_2} * \mu_{OF_2}(x)) \\ \text{s. t} \\ \lambda_0 \leq \mu_{OF_1}(x) \\ \lambda_0 \leq \mu_{OF_2}(x) \\ \omega_{OF_1} + \omega_{OF_2} = 1; \\ \lambda_0, \gamma \in [0, 1] \end{array} \right. \quad (87)$$

(62 – 68), (47, 48, 49, 51, 52, 59).

#### 4.1.1.5. Etape 5 :

Préciser les coefficients d'importance des objectifs ( $\omega_{OF_1}, \omega_{OF_2}$ ) et la valeur du coefficient de compensation ( $\gamma$ ) basée sur les préférences du décideur. Après, résoudre le problème à objectif unique qui en résulte des équations (voir équation 82, 85, 87). Si le décideur est satisfait de la solution efficace obtenue, le processus est arrêté et de la solution actuelle est sélectionnée comme décision finale, sinon, il faut modifier les paramètres :  $\beta$ ,  $\omega_{OF_1}$ ,  $\omega_{OF_2}$  et  $\gamma$  selon les préférences des décideurs. Enfin le modèle sera reformulé (voir équation 82, 85, 87) et le processus recommencera encore une fois.

## 5. Résultats et analyse

### 5.1. Étude de cas

Les solutions proposées ont été appliquées sur une étude de cas d'une entreprise en textile. La résolution du modèle proposé est codée à l'aide du logiciel d'optimisation *GAMS 22.5/CPLEX 12.2* et toutes les expériences numériques sont résolues à l'aide d'un ordinateur *Core i5 2,20 GHz* avec *4 Go de RAM*.

### 5.1.1. Valeurs numériques des paramètres flous

Dans ce travail, les paramètres flous sont considérés comme des nombres triangulaires flous  $\xi = (\xi^p, \xi^m, \xi^o)$

Avec :

- $\xi^p$  : est la valeur la plus pessimiste.
- $\xi^m$  : est la valeur la plus probable.
- $\xi^o$  : est la valeur la plus optimiste.

Ces valeurs doivent être estimées pour chaque paramètre flou. Pour ce faire, la méthode proposée par l'auteur [140] est utilisée. Premièrement,  $\xi^m$  la valeur la plus probable de chaque paramètre imprécis est spécifiée aléatoirement selon la distribution uniforme (voir Tableau 11). Ensuite,  $\xi^p$  le plus pessimiste et  $\xi^o$  le plus optimiste les valeurs d'un nombre flou  $\xi$  sont obtenues comme (voir équation 89):

$$\xi^p = (1 - r_1)\xi^m, \quad \xi^o = (1 + r_2)\xi^m \quad (89)$$

Avec :

- $(r_1, r_2)$  : Représentent deux nombres générés aléatoirement selon la distribution uniforme [0.1, 0.3].

Le niveau prédéterminé  $\theta$  est fixé à 0,8 et les données utilisées pour tester les solutions proposées sont issues, d'une chaîne logistique en textile. Ainsi, les paramètres conçus sont donnés dans le tableau (voir Tableau 11).

Tableau 11: Les paramètres du modèle

Paramètres déterministes			
Paramètre	Distribution aléatoire associée	Paramètre	Distribution aléatoire associée
$\pi_k$	$\sim U(2,3)$	$PKcap_{p,t}$	$\sim U(40000,60000)$
$\pi_r$	$\sim U(0.8,1.5)$	$DKcap_{p,t}$	$\sim U(3500,4500)$
$PRcap_{r,p,t}$	$\sim U(10000,15000)$	$T_{k,c,t}^{acc}$	$\sim U(600,900)$
$\alpha_{r,k}$	$\sim U(0.1,0.3)$	$\beta_{k,c,t}$	$\sim U(0.10,0.15)$
Imprecise Parameters			

Paramètres déterministes			
Paramètre	Distribution aléatoire associée	Paramètre	Distribution aléatoire associée
Paramètre	Distribution aléatoire associée	Paramètre	Distribution aléatoire associée
$\overline{\text{Scap}}_{r,s,t}$	$\sim U(1200,1200)$	$\overline{\text{st}}_{k,p,t}$	$\sim U(10,15)$
$\overline{\text{DC}}_{k,c,t}$	$\sim U(1000,2000)$	$\overline{\text{TT}}_{p,t}$	$\sim U(3000,4500)$
$\overline{\eta}_{k,d,c,t}$	$\sim U(0.90,0.90)$	$\overline{\text{CKP}}_{k,p,t}$	$\sim U(3,4)$
$\overline{\text{BOC}}_{k,p,t}$	$\sim U(2,3)$	$\overline{\text{CKS}}_{k,p,t}$	$\sim U(1,2)$
$\overline{\text{CIRP}}_{r,p,t}$	$\sim U(1,2)$	$\overline{\text{TCSP}}_{r,s,p,t}$	$\sim U(1,2)$
$\overline{\text{CIKP}}_{k,p,t}$	$\sim U(2,3)$	$\overline{\text{TCPD}}_{r,s,p,t}$	$\sim U(4,5)$
$\overline{\text{CIKD}}_{k,d,t}$	$\sim U(4,5)$	$\overline{\text{TCDC}}_{r,s,p,t}$	$\sim U(2,3)$
$\overline{\text{pt}}_{k,p,t}$	$\sim U(0.1,0.9)$	$\overline{\lambda}_{k,d,c,t}$	$\sim U(0.85,0.98)$

### 5.1.2. Instances considérées

Pour explorer l'influence de différents poids sur les résultats du problème, plusieurs poids d'instance sont générés (voir Tableau 12).

Tableau 12: Problème d'instances

Instance	No. matière première	r	No. fournisseurs	No. usine	No. CD	No. clients	No. produit	No. période
Inst1	4	9	8	12	12	6	11	
Inst2	4	12	5	8	4	5	15	
Inst3	4	12	8	5	9	5	7	
Inst4	5	6	8	8	4	4	7	
Inst5	5	9	12	5	6	6	15	
Inst6	5	15	5	12	6	4	7	
Inst7	5	15	12	8	9	5	11	
Inst8	6	9	5	5	12	4	15	
Inst9	6	9	12	12	6	5	9	
Inst10	6	12	12	12	9	4	11	
Inst11	6	15	8	5	4	6	9	

### 5.1.3. Résultats obtenus par les trois approches

Les résultats obtenus par [116] et les approches [117] et [118] sont présentées dans les tableaux (voir Tableau 14, Tableau 13), avec :

- $\mu_{OF_1}(x)$  : le degré de satisfaction de la fonction objectif du coût total.
- $\mu_{OF_2}(x)$  : le degré de satisfaction de la fonction objectif de la livraison à temps.

#### 5.1.3.1. Résultats obtenus pour les structures décentralisées

Il ressort du tableau (voir Tableau 14) que la méthode de Selim et Ozkarahan (2008) [117] est sensible au coefficient de compensation de sorte qu'elle produit différentes solutions déséquilibrées. En revanche, la méthode de Torabi et Hassini (2008) [118] est peu sensible à ce coefficient, donc il donne de manière appropriée une solution efficace.

#### 5.1.3.2. Résultats obtenus pour les structures centralisées

Le tableau (voir Tableau 13) des résultats obtenus par l'approche de Tiwari proposée par l'article [136], montre que le degré de satisfaction de chaque fonction objectif augmente avec l'augmentation de son poids.

Tableau 13: Les résultats de la solution obtenus pour une structure centralisée.

	1	2	3	4	5
$\omega_{OF_1}$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
$\omega_{OF_2}$	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
$\mu_{OF_1}(x)$	0.79	0.93	0.89	0.94	0.99
$\mu_{OF_2}(x)$	1.00	0.98	0.97	0.95	0.64

Tableau 14: Les Résultats de la solution obtenus pour une structure décentralisée.

		$\gamma$						
		0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
SO	$\mu_{OF_1}(x)$	0.96	0.95	0.93	0.92	0.92	0.91	0.89
	$\mu_{OF_2}(x)$	1.00	0.98	0.97	0.97	0.97	0.95	0.96
TH	$\mu_{OF_1}(x)$	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92
	$\mu_{OF_2}(x)$	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

#### 5.1.3.3. Les solutions optimales relatives aux structures centralisées

Les solutions optimales relatives à l'approche [116] pour les structures centralisées sont présentées dans les tableaux (voir Tableau 15, Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18) avec :

- $\omega_{OF_1}$  : Représente la pondération associée à la fonction objectif des coûts totaux pour chaque instance, est fixé à 0,5.
- $\omega_{OF_2}$  : Représente la pondération associée à la fonction objectif de la livraison à temps pour chaque instance, est fixé à 0,5.

Tableau 15:Quantité produite de produits finis dans les usines

		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
k1	p1	9365,38	-	4961,85	6883,25	1344,35	-	-
	p2	-	-	-	-	-	-	9512,19
	p4	1136,37	-	8317,54	-	-	-	-
k2	p1	1094,35	-	5093,53	1735,12	6481,43	8575,61	7250,55
	p2	-	-	-	3166,06	-	6335,55	-
	p3	-	-	-	-	-	-	-
	p4	5047,12	-	-	1236,22	-	-	-
	p5	-	154,55	-	-	-	-	-
	p7	-	-	2657,79	-	-	5697,79	12137,57
k3	p1	-	-	-	1485,95	-	-	-
	p2	9050,93	-	-	-	-	4931,57	5103,52
	p4	-	-	-	-	-	-	13446,98
	p5	-	109,35	-	8332,47	-	-	6443,22
	p6	-	11213,51	-	-	-	-	-
k4	p1	5515,76	-	-	5374,87	-	-	-
	p2	354,39	-	-	-	6523,54	-	-
	p3	-	-	1119,41	-	-	-	-
	p4	-	-	-	-	2478,87	-	-
	p5	-	1329,03	-	-	-	-	-
	p6	-	2581,02	-	-	-	-	-
	p8	-	-	6112,13	-	-	-	-

Tableau 16:Quantité d'inventaire de matières premières dans l'usine

		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
rm1	p1	2439,28	2439,28	-	5555,31	3521,00	1212,26	8283,28
	p2	6366,30	16682,74	16682,74	18704,67	17610,12	14477,40	22729,87
	p3	-	187,82	-	-	-	-	-
	p4	-	1790,27	-	415,92	-	-	1535,15
	p5	2707,41	2411,17	2411,17	-	-	-	4589,89
	p6	-	-	-	-	-	-	2917,77
	p7	715,54	715,54	-	-	-	-	-
	p8	1025,53	1025,53	-	-	-	-	-
rm2	p1	-	-	14150,60	11642,42	10404,40	9024,39	7857,62
	p2	4530,41	4530,41	5304,28	4794,79	3498,96	1939,05	-
	p3	-	1144,14	921,78	921,78	921,78	921,78	921,78
	p4	1897,87	1897,87	691,34	492,40	-	1473,47	-
	p5	16358,52	16057,67	16057,67	15144,63	15144,63	15144,63	14438,60
	p6	-	-	17046,69	25808,07	25808,07	25808,07	25808,07

		<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t4</b>	<b>t5</b>	<b>t6</b>	<b>t7</b>	
	p7	-	427,70	-	-	830,48	1953,21	-	
<b>rm3</b>	p1	5280,78	5280,78	3738,00	1415,12	-	13288,79	11871,60	
	p2	-	-	5814,77	5195,93	4021,18	1930,77	-	
	p3	-	201,58	-	-	-	-	-	
	p4	16225,33	16225,33	15308,07	15066,44	28901,78	36149,96	33826,65	
	p5	-	2552,88	2552,88	1113,23	1113,23	1113,23	-	
	p6	-	-	-	-	-	5206,74	5206,74	
	p8	-	21452,67	20352,00	20352,00	20352,00	28472,98	31699,54	
		p1	2424,94	2424,94	-	1761,21	-	1569,39	-
<b>rm4</b>	p2	6623,23	6623,23	6623,23	5937,93	4956,30	3069,07	-	
	p3	-	27195,47	27027,02	27027,02	27027,02	46524,77	54795,49	
	p4	2857,40	2857,40	640,59	373,01	-	-	-	
	p5	1116,53	871,65	871,65	-	-	15616,44	14942,42	
	p7	-	-	23021,40	43432,25	52537,81	51304,51	48677,32	
	p8	-	-	-	-	17162,76	17162,76	17162,76	
		p1	3344,70	3344,70	2020,79	2131,61	1111,63	-	-
	<b>rm5</b>	p2	-	-	-	1361,38	-	-	-
p3		-	233,61	-	-	-	-	-	
p4		-	-	-	517,31	-	-	-	
p5		324,53	-	-	-	-	-	-	
p6		3322,43	-	-	-	-	-	-	
p7		-	-	738,59	738,59	738,59	-	411,07	

Tableau 17:Quantité de stock de produits finis dans les usines

		<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t4</b>	<b>t5</b>	<b>t6</b>	<b>t7</b>
<b>k1</b>	p1	3615,786	-	-	-	-	-
	p2	-	-	-	-	-	9512,191
<b>k2</b>	p1	1094,351	-	1735,122	5971,797	14547,404	14706,776
	p2	-	-	2556,559	-	-	-
	p3	1063,525	-	-	-	-	-
	p4	1219,026	-	-	-	-	-
	p7	-	-	-	-	4372,894	16510,461
<b>k3</b>	p2	2315,674	2315,674	-	-	-	-
	p4	-	-	-	-	-	13446,979
	p5	-	-	1286,509	-	-	-
	p6	-	6614,733	-	-	-	-
<b>k4</b>	p2	-	-	-	6523,538	5204,306	5204,306

Tableau 18:Quantité de stock de produits finis dans les centres de distribution

		<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t4</b>	<b>t5</b>	<b>t6</b>	<b>t7</b>
<b>k1</b>	d1	-	-	-	5589,28	4797,51	3571,82	-
	d2	2181,23	1169,45	-	-	-	-	-
	d5	-	-	-	1293,98	-	-	-
	d6	-	-	2261,41	74,28	1186,48	-	-
	d7	-	-	7063,44	4961,34	2427,46	-	-
	d8	-	-	342,84	-	-	-	-
<b>k2</b>	d1	-	-	1500,41	-	-	5033,42	2344,92

	d3	1346,09	-	-	-	-	-	5747,90
	d6	-	-	1314,91	-	-	-	-
<b>k3</b>	d1	-	2280,36	-	-	1286,51	-	5272,05
	d3	2386,62	-	-	-	-	-	1709,60
	d5	-	-	-	8531,92	6235,88	11167,45	12723,19
	d6	-	-	4490,89	2313,71	-	-	522,72
	d7	-	-	1006,17	-	-	-	-
	d8	-	-	1179,05	-	-	-	-
<b>k4</b>	d1	-	-	-	3276,37	-	1319,23	-
	d3	1240,28	-	-	-	-	-	-
	d8	-	-	2475,24	-	2478,87	-	-

## 5.2. Analyse de sensibilité

À partir de l'analyse du graphe (voir Figure 26), il découle que les coûts de stockage y compris (stockage dans les usines et les centres de distributions) sont égaux à zéro. Contrairement aux coûts de la distribution (les coûts de distribution représentent la valeur la plus élevée dans le graphique). Alors que les coûts de stockage et de *backorder* sont plus faibles que les coûts de production ou de distribution. Cela est justifié par le fait, que notre modèle favorise la distribution plutôt que le stockage pour satisfaire la demande, ce qui est vérifié par des couts de *backorder* qui tend vers zéro. De plus, le tableau (voir Tableau 19) représente l'impact simultané du taux de service fourni par le fournisseur et ainsi que la capacité du fournisseur, sur la valeur de la deuxième fonction objectif. Il résulte que les quantités de matières premières livrées à temps augmentent, lorsque les deux paramètres augmentent. Ensuite, le graphe (voir Figure 27) représente l'impact de la capacité du fournisseur, sur la valeur de la première fonction objectif, il l'en découle que le coût total diminue En tant que décision légitime, il convient de considérer un poids plus élevé à ces deux critères lors de la sélection des fournisseurs.

Tableau 19: Sensitivity analysis of supplier capacity and on-time delivery rate impact

Taux de livraison à temps — Capacité du fournisseur	1200	1400	1600	1800
<b>0,4</b>	141606	162466	182501	202354
<b>0,5</b>	177008	203083	228126	252942
<b>0,6</b>	212410	243700	273751	303531
<b>0,7</b>	247811	284317	319377	354120
<b>0,8</b>	283213	324933	365002	404708
<b>0,9</b>	318615	365550	410627	<b>455297</b>



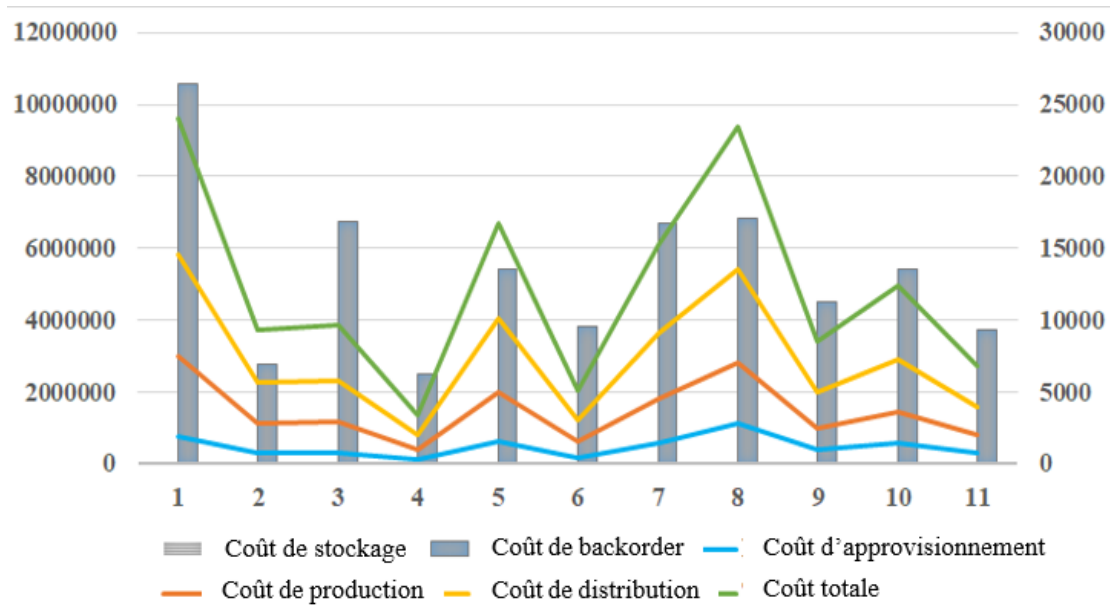


Figure 26: Répartition de tous les coûts pour toutes les instances considérées

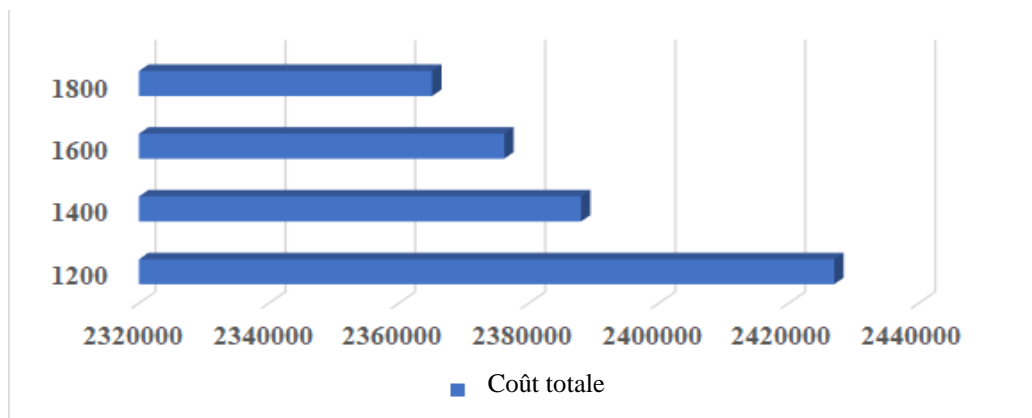


Figure 27: Analyse de l'impact de la capacité du fournisseur sur OF1

## 6. Conclusion

Ce chapitre traite le problème de l'intégration de la chaîne logistique, au niveau tactique dans des conditions industrielles incertaines, par un problème d'optimisation mathématique multi-objectif flou. Ce modèle est traité à l'aide de la programmation mathématique floue et les paramètres flous sont tous considérés comme des nombres flous triangulaires. Ensuite, le modèle flou est transformé à son équivalent net, puis résolu par trois approches qui tiennent en compte des structures à gestion centralisée et les structures à gestion décentralisée. Par la suite, les solutions proposées ont été appliquées sur une étude de cas d'une chaîne logistique en textile. Enfin, l'analyse de sensibilité du modèle et la validité de ses résultats ont été faites.

Néanmoins, la solution exacte, proposée dans ce chapitre, reste infaisable lors de son application sur des grandes instances. En effet, il faut trouver une solution, pour notre problème d'optimisation, valable aussi pour les grandes instances en utilisant les méthodes approchées. Donc pour ce faire, le chapitre IV concerne le développement d'une nouvelle métaheuristique pour trouver la meilleure solution de notre problème d'optimisation.

# Chapitre IV : Le développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS) pour résoudre le problème d'optimisation.

## 1. Introduction

Le monde industriel devient de plus en plus concurrentiel, donc afin d'augmenter leurs parts de marché et réduire leurs coûts, les entreprises essayent de se rapprocher le plus des clients et des ressources. D'autre part, les chaînes logistiques deviennent, de plus en plus, grandes et dispersées géographiquement. En effet, les modèles des chaînes logistiques deviennent complexes vu le nombre élevé des fournisseurs, des producteurs, des distributeurs, des clients ainsi que les organismes juridiques qui interviennent tout au long de la chaîne logistique. De ce fait, les gestionnaires demandent des outils d'aide à la décision capables de gérer cette complexité. Dans cette perspective, la littérature est submergée de différents types de problèmes d'optimisation. Généralement, les problèmes relatifs à l'intégration et la gestion de la chaîne logistique, sont des problèmes NP-difficiles [50] dont la complexité constitue toujours une problématique importante selon de nombreuses recherches, comme le cas de notre modèle d'optimisation incertain proposé dans le chapitre III. Pour cette raison, le présent chapitre propose une nouvelle métaheuristique (CSHGS) basée sur le développement de la métaheuristique *Hunger Game Search (HGS)* par le processus de la recherche. Ensuite, les solutions proposées ont été appliqué sur une étude de cas d'une chaîne logistique en textile. En effet, cette nouvelle métaheuristique donne les meilleurs résultats pour notre problème d'optimisation incertain par rapport à d'autres métaheuristicues connues dans le domaine telles que HGS, GA, PSO. Ainsi la structure globale, du présent chapitre, est représentée sous forme d'un graphe décrivant la succession des idées de recherche (voir Figure 28).

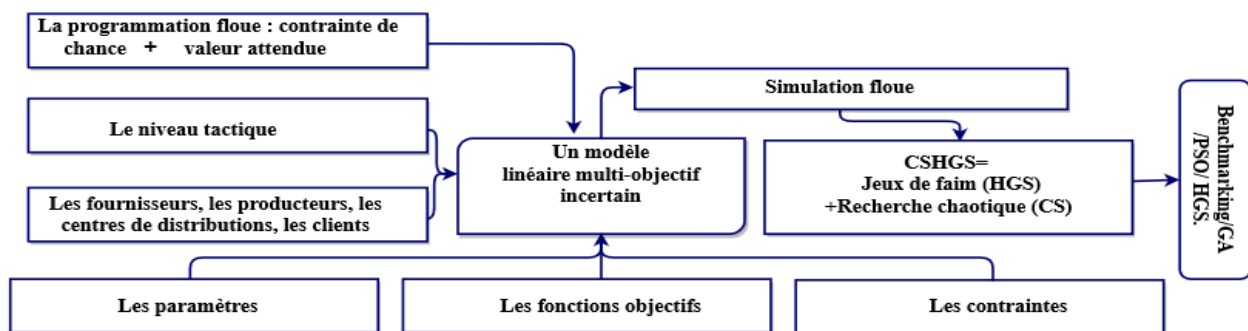


Figure 28: La structure du chapitre IV

## 2. Problématique de complexité des problèmes

Pour comprendre l'intérêt des métaheuristiques, il faut d'abord s'intéresser à la notion de complexité d'un problème. Ainsi, elle est reliée directement, aux ressources nécessaires à un algorithme pour qu'il s'exécute en un temps raisonnable.

### 2.1. Étude de la complexité du problème

#### 2.1.1. Classification de la complexité

L'étude de la complexité d'un problème, permet de donner des indications relatives aux problèmes d'optimisation associés [141]. D'une manière générale, un problème quelconque qu'il soit de décision ou d'optimisation doit appartenir à l'une de ces trois classes suivantes : la classe **P**, la classe **NP**, la classe **NP-Complet** (voir *Figure 29*).

##### 2.1.1.1. Problème de classe P

La classe P est l'ensemble des problèmes qui peuvent être résolus avec des algorithmes déterministes de complexité polynomiale (facile).

Les problèmes de classe P peuvent être résolus par les algorithmes ordinaires ou exacts qui sont inclus dans la famille des heuristiques. Par la suite la classe P est incluse dans la classe NP.

##### 2.1.1.2. Problème de classe NP

La classe NP est l'ensemble de problèmes qui peuvent être résolus avec un algorithme Non-déterministe de complexité polynomiale (facile).

##### 2.1.1.3. Problème de classe NP-Complet

La classe NP-Complet regroupe l'ensemble des problèmes les plus difficiles de la classe NP, tels que les problèmes polynomiaux réductibles. Les problèmes NP-complets sont les problèmes les plus « difficiles » de NP (voir

*Figure 29*). Une propriété générale des problèmes NP-difficile c'est qu'il n'existe pas d'algorithme polynomial le résolvant [48]. NP-difficile en théorie de la complexité de calcul [142], est la propriété définissant une classe de problèmes qui sont informellement « au moins aussi difficiles que les problèmes les plus difficiles dans NP ». Les méthodes de résolution utilisées sont les heuristiques qui permettent de trouver une solution optimale, mais non démontrable.

## 2.2. Complexité du problème d'optimisation étudié

Le domaine industriel est submergé par plusieurs types de problèmes d'optimisation dont l'objectif est de minimiser ou maximiser la valeur de la fonction objectif. Ils nécessitent indirectement la résolution d'un problème de décision, ce revient à étudier l'existence ou non d'une solution admissible optimale. Généralement, les problèmes relatifs à la gestion de la chaîne logistique que ce soient de localisation, de planification, d'ordonnancement, de transport ou autres, sont généralement des problèmes NP-difficiles [50] dont la complexité constitue toujours une problématique importante pour de très nombreux chercheurs. Cependant, dans un contexte industriel de plus en plus concurrentiel, les entreprises sont demandeuses d'outils d'aide à la décision capables de gérer leurs complexités.

Le problème d'optimisation proposé est un modèle linéaire, généralement très difficile, à savoir, NP-difficile, puisque la solution optimale en utilisant les méthodes exactes pour les grandes instances nécessite un temps de calcul exponentiel. Vu que le temps d'exécution limité, le but est de trouver un compromis (une solution n'est pas forcément l'optimale, mais dans un temps raisonnable). Dans cette perspective, les métaheuristiques ont été utilisées dans cette partie de ce travail. Les métaheuristiques généralement ne garantissent pas une solution optimale, mais plutôt une solution dans un temps relativement court.

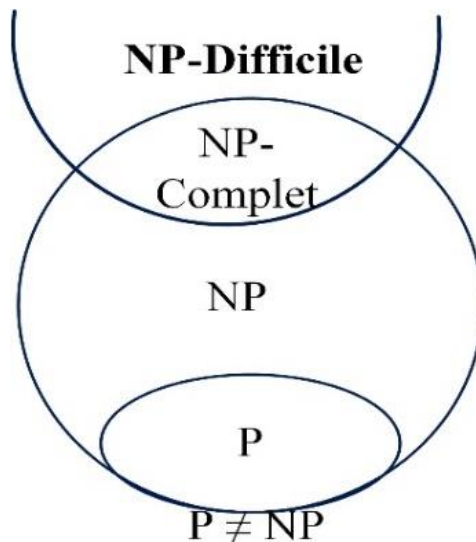


Figure 29 : Classification des types de problèmes

### **3. Méthodes Métaheuristiques**

#### **3.1. Cadre général des métaheuristiques.**

##### **3.1.1. Définition des métaheuristiques**

Les métaheuristiques sont des techniques d'optimisation indépendantes du type de problème. Elles sont efficaces pour résoudre un large éventail de problèmes d'ingénierie. Les algorithmes métaheuristiques sont généralement appliqués pour le calcul des solutions quasi optimales des problèmes qui ne peuvent pas être résolus facilement. Les algorithmes métaheuristiques peuvent être des calculs intensifs pour trouver une solution exacte, ou des fois une solution presque optimale est suffisante. Dans ce cas, les algorithmes métaheuristiques évolutionnaires sont efficaces. En raison de leur nature de recherche aléatoire, les algorithmes évolutionnaires ne garantissent jamais de trouver une solution optimale pour n'importe quel problème, mais ils peuvent souvent trouver une solution quasi optimale si elle existe.

##### **3.1.2. Types d'algorithme métaheuristique**

###### ***3.1.2.1. Algorithmes inspirés et non inspirés de la nature***

Les algorithmes métaheuristiques sont divisées en deux catégories il y a ceux qui sont inspirés des processus naturels, tels que l'algorithme génétique (AG), l'optimisation des colonies de fourmis [51], et ceux n'ayant rien à voir avec les processus naturels, à savoir la recherche tabou (RT) [143]. Il est parfois difficile d'affecter clairement un algorithme à l'une de ces deux classes (inspiré de la nature et non). De surcroît, il y a aussi de nombreux algorithmes, récemment développés, ne correspondent à aucune des classes ou pouvant comporter des éléments des deux classes. Par conséquent, cette classification n'est pas particulièrement utile. Par exemple, bien que la recherche tabou soit classée comme un algorithme non inspiré par la nature, il tire parti des aspects de l'intelligence artificielle tels que la mémoire. Il est donc pertinent de se demander si l'utilisation de la mémoire dans la recherche tabou le qualifie comme un algorithme inspiré de la nature. Cela signifie que les algorithmes génèrent une solution unique et qu'ils tentent d'améliorer cette solution à chaque itération. Les algorithmes qui fonctionnent sur une seule solution sont appelés méthodes de trajectoire et englobent des métaheuristiques basées sur la recherche locale, telles que la recherche tabou. En revanche, les algorithmes basés sur la population effectuent des processus de

recherche qui décrivent l'évolution d'un ensemble de solutions dans l'espace de recherche. La recherche taboue est un bon exemple des algorithmes basés sur la population.

### ***3.1.2.2. Algorithmes avec et sans mémoire***

Une caractéristique clé de certaines métaheuristiques évolutives est qu'ils ont recours à l'historique de recherche pour guider la future recherche pour trouver une solution optimale. Les algorithmes sans mémoire appliquent le processus de Markov pour guider la recherche d'une solution, car les informations sur lesquelles ils s'appuient pour percevoir la prochaine action ne sont que l'état actuel du processus de recherche. Il existe plusieurs façons d'utiliser la mémoire, qui est aujourd'hui reconnue comme l'une des capacités fondamentales des algorithmes métaheuristiques et évolutifs avancés.

## **3.1.3. Caractéristiques principales des métaheuristiques**

### ***3.1.3.1. Exploration et exploitation***

L'exploration et l'exploitation sont des aspects importants qui caractérisent les algorithmes métaheuristiques. L'exploration est une opération qui se réfère à la propriété de recherche dans l'espace. Tandis que l'exploitation est une opération qui fait référence à la propriété de chercher d'une solution plus précise.

### ***3.1.3.2. Adaptation et diversité***

L'efficacité de ces algorithmes peut être attribuée à deux caractéristiques importantes, l'adaptation et la diversité des algorithmes métaheuristique inspirer de la nature. L'adaptation dans les algorithmes inspirés de la nature peut prendre plusieurs formes. Par exemple, les moyens pour équilibrer l'exploration et l'exploitation sont parmi les moyennes clés de l'adaptation [143]. La diversité des algorithmes métaheuristiques peut également prendre de nombreuses formes. La diversité la plus simple consiste à solliciter les variations de solutions dans la population par les aspects aléatoires. Dans la plupart des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle, de nouvelles solutions sont générées selon un ensemble d'équations déterministes, qui incluent également des variables aléatoires. La diversité est représentée par la variation, souvent en termes de variance de la population. Une fois la variance de la population diminue et s'approche de zéro, la diversité diminue également, conduisant à des ensembles de solutions convergentes. Cependant, si la diversité est réduite trop rapidement, une convergence prématurée peut se produire.

### **3.2. Amélioration des performances métaheuristiques**

Face à la complexité et la multiplication des évènements dans le réseau de la chaîne logistique, plusieurs recherches ont été réalisées pour améliorer la performance globale de la chaîne logistique en contribuant à la création d'une nouvelle métaheuristique. Dans ce sens, la plupart des métaheuristiques mettent en place un compromis modéré entre exploitation et exploration [144]. Mais pour une meilleure performance de l'algorithme, de nombreuses études, prennent la décision de créer des nouveaux algorithmes généralement hybrides en incorporant, par exemple, l'opérateur de la recherche locale, dans la recherche globale originale [145]. En plus de l'optimisation régulière de la fonction à objectif unique [146] [147], certaines d'entre elles fonctionnent remarquablement même pour les problèmes d'optimisation multi-objectifs [148] [149]. C'est dans cette perspective que le présent travail propose une nouvelle métaheuristique pour résoudre le problème d'optimisation proposé.

## **4. Développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS)**

Dans cette étude, une nouvelle métaheuristique CSHGS est proposée. En effet, la carte chaotique logistique est appliquée à l'algorithme *HGS* classique afin d'améliorer davantage le caractère de l'exploration de l'algorithme *HGS*. L'algorithme proposé est appliqué, par la suite, pour résoudre le problème d'optimisation incertain proposée dans le cadre du chapitre III sur des grandes instances.

### **4.1. Métaheuristique Hunger Games Search (HGS)**

#### **4.1.1. Revue de Hunger Games Search (HGS)**

Le *HGS* est conçu en fonction des activités liées à la faim et au choix comportemental des animaux. La caractéristique principale de cette méthode est sa nature dynamique, sa structure simple et ses hautes performances en termes de convergence et qualité des solutions. Elle s'avère plus efficace que les méthodes d'optimisation actuelles. Son efficacité a été vérifiée en la comparant avec un ensemble complet d'algorithmes populaires, en l'appliquant sur 23 fonctions d'optimisation bien connues [150]. De plus, le *HGS* a été appliqué à plusieurs problèmes d'ingénierie pour démontrer son applicabilité. Les résultats valident l'efficacité de l'algorithme *HGS* par rapport à d'autres algorithmes d'optimisation populaires dans le même domaine [150].



#### **4.1.1.1. Inspiration de *Hunger Games Search* (HGS)**

Cette méthode est une recherche dynamique adaptée à la condition physique naturelle, selon un concept simple qui traite la « faim », en tant qu'un besoin naturel et une motivation cruciale derrière les comportements, les décisions et les actions des animaux. *Hunger Games Search* intègre le concept de la faim dans le processus des fonctionnalités, en d'autres termes, un poids adaptatif basé sur le concept de la faim est conçu et utilisé pour simuler l'effet de la faim à chaque étape de recherche. Il suit les règles de la logique informatique (jeux) utilisées par presque tous les animaux dont les activités et les jeux rivaux sont souvent évolutifs et adaptatifs pour garantir les meilleures chances de survivre et de pouvoir à trouver la nourriture. Tout animal suit ses informations sensorielles, mais sur la base de certaines règles de calcul et en interaction avec son environnement dont il fait partie lui-même. Ces règles constituent la base du choix de ses décisions et soutiennent l'évolution de son architecture cognitive. Il est vérifié, par les chercheurs, que ces règles de la logique informatique utilisées par les animaux sont souvent évolutives, adaptatives pour garantir les meilleures chances de pouvoir survivre, se reproduire et se trouver de la nourriture [151]. Malgré la grande variété des stimulus et des demandes concurrentes qui affectent toujours la qualité de vie des animaux, ceux-ci devraient sélectionner et rechercher des sources de nourriture lorsqu'ils sont confrontés à une insuffisance calorique. Pour faire face à ce déséquilibre homéostatique, ils doivent chercher régulièrement la nourriture et se déplacer dans leur environnement d'une manière qui nécessite de basculer entre des activités exploratoires, défensives et concurrentes, indiquant une incroyable douceur dans les stratégies d'alimentation [152].

Le choix comportemental et le choix de l'activité sont universels dans la monarchie animale, et c'est une loi fondamentale des comportements orientés vers un but, observés dans la nature. Divers facteurs, parfois combinés entre eux, affectent le comportement observé des espèces, qui sont soumises à l'état de motivation existant et en l'occurrence d'un stimulus dans leur localité [153]. Pour tout animal, les neuroscientifiques s'accordent à dire que la faim est une forte puissance de motivation qui pousse à l'activité, à l'apprentissage et à la recherche de nourriture. Elle agit comme une force pour changer les conditions de vie vers un état plus stable [154]. Selon les expériences de « *Hunger-Driven Motivational State Competition* » [152], la faim peut surpasser et influencer les états de pulsion concurrents tels que la soif, la nervosité, la peur des chasseurs et les exigences communautaires. Ainsi, les neuroscientifiques affirment que la faim est au sommet de la hiérarchie des motivations [152]. La vie sociale aide les animaux à éviter les prédateurs et à trouver des sources

de nourriture, en travaillant en collaboration naturelle, ce qui augmente leurs chances de survie. C'est la nature de l'évolution, selon laquelle des animaux en meilleure santé peuvent trouver de meilleures sources de nourriture et par conséquent avoir plus de chance de survie que les animaux vulnérables. Ce processus est qualifié comme des jeux de la faim dans la nature. Toute mauvaise décision peut bien changer l'issue du jeu, et entraîne la mort d'un animal ou même l'extinction d'une espèce toute entière. Citons ici , l'histoire des corbeaux et des rats qui après la chasse, disent à leurs compagnons que leur prochain repas réduit l'incertitude de leur prochain repas [155]. Le comportement quotidien des animaux est fortement influencé par certaines situations motivationnelles, telles que la faim et la peur d'être tués, par des chasseurs [156]. La faim est le caractère de « ne pas manger » pendant une longue période [157]. En effet, plus la faim est forte, plus l'envie d'avoir de la nourriture est forte et plus l'organisme est actif à la recherche de la nourriture avant qu'il ne soit trop tard et provoque la famine ou la mort [158]. Sinon, les chances de survie seront trop faibles et l'animal meurt. Par conséquent, lorsque la source de nourriture est limitée, il y a un jeu logique entre les animaux affamés pour trouver la source de nourriture et gagner la situation [159]. Le jeu est ainsi basé sur les décisions logiques et les mouvements des espèces.

#### **4.1.1.2. Hybridation de *Hunger Games Search* (HGS)**

Plusieurs versions de l'algorithme HGS ont été récemment développées. Ainsi, une version améliorée de l'algorithme *HGS* (*DECEHGS*) en utilisant l'algorithme *différentiel* évolution (*DE*) afin de surmonter les limitations de *HGS*, de ce fait, la réduction de possibilité d'une stagnation locale optimale [160]. Un autre travail [161], propose l'utilisation d'un modèle hybride entre *l'Extreme Learning Machine* (*ELM*) et le *Hunger Games Search* afin d'augmenter la fiabilité et la stabilité du modèle. Pour évaluer les performances du modèle proposé, il a été testé sur les images de tomodensitométrie (*CT*) *SARS-CoV-2* et l'ensemble des données *COVID-CT*. De plus, le modèle *HGS* est fusionné avec les techniques *WOA* [162]. Ainsi, la vérification des performances de l'algorithme (*HSWOA*) est effectuée en le comparant à 10 algorithmes de pointe, dont trois algorithmes ont récemment été développés sur 30 fonctions de référence classiques. Ajoutant, qu'il y a un autre algorithme hybride à savoir *DEHGS*, basé sur l'algorithme d'évolution différentielle (*DE*) et l'algorithme *HGS* qui utilise pleinement les caractéristiques des deux algorithmes [163]. Les résultats expérimentaux sur des fonctions de référence indiquent l'efficacité de cet algorithme *DEHGS*, par rapport à d'autres algorithmes. En outre, il y a un autre algorithme *HGS-ANN* [147],

basé sur : l'algorithme *Hunger Games Search (HGS)* et le réseau de neurones artificiels (*ANN*). En effet, trois modèles de référence basés sur trois autres algorithmes métaheuristiques ont également été examinés pour avoir une évaluation complète du modèle *HGS-ANN*. À savoir : essaim de particules (*PSO*), algorithme de luciole (*FFA*) et algorithme d'optimisation de sauterelles (*GOA*) et (*ANN*).

#### 4.1.1.3. Caractéristique de *Hunger Games Search (HGS)*

La recherche jeux de faim (*HGS*) est un nouveau modèle basé sur la population pour résoudre les problèmes d'optimisation, Plus précisément, à chaque itération, l'algorithme recherche autour de l'emplacement optimal, de la même manière, que les animaux recherchent de leurs nourritures. Ainsi les poids, ou les valeurs de la faim, imitent l'impact de la faim sur l'activité individuelle d'un animal. Les mécanismes adaptatifs et variables dans le temps de *HGS* permettent à ce modèle de gérer plus efficacement les problèmes de multimodalité et d'optimum local.

#### 4.1.2. Fondement mathématique de *Hunger Games Search (HGS)*

##### 4.1.2.1. Équation de base de *Hunger Games Search (HGS)*

Pour exprimer les comportements de cette approche (*Approach food*) mathématiquement, les formules suivantes sont proposées pour imiter le mode de contraction (voir équation 107) :

$$\overrightarrow{X_1}(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{X}(t) \cdot (1 + \text{randn}(1)), r_1 < l \\ \overrightarrow{W_1} \cdot \overrightarrow{X_b} + R \cdot \overrightarrow{W_2} \cdot [\overrightarrow{X_b} - \overrightarrow{X}(t)], r_1 > l, r_2 > E \\ \overrightarrow{W_1} \cdot \overrightarrow{X_b} - R \cdot \overrightarrow{W_2} \cdot [\overrightarrow{X_b} - \overrightarrow{X}(t)], r_1 > l, r_2 < E \end{cases} \quad (107)$$

Avec :

- $\vec{R}$  : Représentent la plage de  $[-a, a]$ .
- $r_1$  et  $r_2$  : Représentent respectivement des nombres aléatoires, qui sont de l'ordre de  $[0,1]$ .
- $\text{randn}(1)$  : Représente un nombre aléatoire satisfaisant une distribution normale.
- $t$  : Indique que les itérations en cours.
- $\overrightarrow{W_1}$  et  $\overrightarrow{W_2}$  : Représentent les poids de la faim.
- $\overrightarrow{X_b}$  : Représente l'information de localisation d'un individu aléatoire dans tous les individus optimaux.

- $\vec{X}(t)$  : Représente l'emplacement de chaque individu, et la valeur de  $l$  a été discutée dans l'expérience de paramétrage.

La formule de  $E$  est la suivante (voir équation 108) :

$$E = \text{sech}(|F(i) - BF|) \quad (108)$$

Avec :

- $i \in 1, 2, \dots, n$ ,  $F(i)$  : Représente la valeur de fitness de chaque individu.
- $BF$  : Représente le meilleur fitness obtenu dans le processus d'itération actuel.
- $Sech$  : Représente une fonction hyperbolique ( $\text{sech}(x) = \frac{2}{e^x + e^{-x}}$ ).

La formule de  $\vec{R}$  est la suivante (voir équation 109) :

$$\vec{R} = 2 \times a \times rand - a \quad (109)$$

Avec :

- $rand$  : Représente un nombre aléatoire dans la plage de  $[0,1]$ .
- $Max\_iter$  : Représente le plus grand nombre d'itérations.

#### 4.1.2.2. Rôle de la faim (Hunger role)

Les caractères des individus dans de la recherche de la nourriture peuvent être simulées mathématiquement.

La formule de  $\vec{W}_1$  est représentée (voir équation 110) :

$$\vec{W}_1(i) = \begin{cases} hungry(i) \cdot \frac{N}{SHungry} \times r_4, & r_3 < l \\ 1 & r_3 > l \end{cases} \quad (110)$$

La formule de  $\vec{W}_2$  est représenté (voir équation 111) :

$$\vec{W}_2(i) = (1 - \exp(-|hungry(i) - SHungry|)) \times r_5 \times 2 \quad (111)$$

Avec :

- $hungry$  : Représente la faim de chaque individu.
- $N$  : Représente le nombre d'individus.
- $SHungry$  : Représente la somme des sensations de faim de tous les individus, c'est-à-dire  $sum(hungry)$ .
- $r_3, r_4$  et  $r_5$  : Représentes des nombres aléatoires dans la plage de  $[0,1]$ .

La formule de la fonction  $hungry(i)$  est représentée (voir équation 112):

$$hungry(i) = \begin{cases} 0, & AllFitness(i) = BF \\ hungry(i) + H, & AllFitness(i) \neq BF \end{cases} \quad (112)$$

Avec :

- $AllFitness(i)$  : Représente un paramètre qui préserve la forme physique de chaque individu dans l'itération en cours.

La forme de  $H$  peut être présentée (voir équation 113,114) :

$$TH = \frac{F(i)-BF}{WF-BF} \times r_6 \times 2 \times (UB - LB) \quad (113)$$

$$H = \begin{cases} LH \times (1 + r), & TH < LH \\ TH, & TH \geq LH \end{cases} \quad (114)$$

Avec :

- $r_6$  : Représente un nombre aléatoire dans la plage de  $[0,1]$ .
- $F(i)$  : Représente la valeur de fitness de chaque individu.
- $BF$  : Représente le meilleur fitness obtenu dans le processus d'itération actuel.
- $WF$  : Représente la pire aptitude obtenue dans le processus d'itération actuel.
- $UB$  et  $LB$  : Représentent respectivement, les limites supérieure et inférieure de l'espace de recherche.
- $LH$  : Représente la borne inférieure qui limite la sensation de *hunger*  $H$ .

## 4.2. Recherche chaotique

### 4.2.1. Revue de la recherche chaotique

Dans la littérature, il existe plusieurs utilisations du processus de la recherche chaotique pour améliorer la performance de certains algorithmes d'optimisation. Ainsi, l'algorithme de recherche chaotique et l'algorithme d'optimisation des baleines (*whale optimization*) sont combinés pour créer un nouveau modèle [164]. Les résultats expérimentaux montrent que cette méthode peut améliorer considérablement la précision moyenne par rapport aux méthodes les plus avancées. De plus, une nouvelle métaheuristique (*CHGSO*) qui intègre les cartes chaotiques dans l'algorithme (HGSO) (la solubilité des gaz de Henry) [165]. Cet algorithme (*CHGSO*) vise à améliorer le taux de convergence de l'optimiseur de solubilité des gaz Henry originaux pour résoudre des problèmes

réels d'optimisation d'ingénierie. La performance de la nouvelle métaheuristique (*CHGSO*) est évaluée à l'aide de divers problèmes d'optimisation sous des contraintes conventionnelles. En outre, afin d'améliorer la méthode (*Slime Mould Algorithm SMA*), l'article [166] utilise 10 cartes chaotiques différentes pour générer des valeurs chaotiques au lieu des valeurs aléatoires dans SMA. À l'aide de la carte chaotique, l'hybridation vise à augmenter la vitesse de convergence globale de SMA et l'empêcher de rester bloqué dans ses solutions locales. Le *Chaotic SMA (CSMA)* proposé a été appliqué à 62 fonctions de références différentes. Dans l'article [167], un nouvel algorithme hybride appelé (*chaotic-based hybrid whale and PSO*) a été proposé en hybridant le *whale optimization algorithm (WOA)*, avec *particle swarm optimization (PSO)* en utilisant les cartes chaotiques. L'algorithme hybride a des mouvements beaucoup plus diversifiés que les deux algorithmes mentionnés. Par conséquent, il explore plus précisément les différentes régions de l'espace de recherche et évite les optimums locaux. L'algorithme proposé dans l'article [168], est un nouvel algorithme hybride entre le (*chaotic cuckoo optimization algorithm*), (*levy flight, disruption operator*) et (*opposition-based learning*) (*CCOALFDO*). Cet algorithme est appliqué pour sélectionner le sous-espace de caractéristiques optimales pour la classification. Les résultats ont fait preuve de la supériorité de la nouvelle méthode par rapport à d'autres méthodes.

#### **4.2.2. Mécanisme de la recherche chaotique**

Le chaos est un concept qui fait référence au mouvement imprévisible en raison de sa sensibilité aux valeurs initiales dans le système dynamique déterministe. Le chaos est un modèle de mouvement apparemment irrégulier et complexe dans le monde réel [169]. Il est à signaler que le modèle de mouvement ordonné d'origine suivant des lois physiques simples s'écarte de la régularité attendue et se transforme en une forme désordonnée dans certaines conditions. La théorie du chaos a été appliquée avec succès à de nombreux domaines qui incluent les algorithmes évolutionnaires [170][171]. Étant donné que la plupart des algorithmes d'optimisation basés sur la population contiennent les opérateurs aléatoires, le chaos peut être utilisé pour remplacer l'opérateur aléatoire afin d'optimiser l'algorithme de recherche global.

##### **4.2.2.1. Carte chaotique.**

Les cartes chaotiques sont principalement adoptées pour générer des séquences chaotiques afin d'ajuster les paramètres lors de l'initialisation de la population et du processus itératif. Il a un bon effet dans de nombreux algorithmes d'optimisation évolutifs, tels que l'algorithme génétique [172],

l'algorithme du système immunitaire artificiel [173] et l'algorithme d'évolution différentielle. Les cartes chaotiques sont principalement utilisées dans l'ajustement des opérations de croisement, de mutation et de sélection.

#### 4.2.2.2. Brève description de la recherche chaotique

Le chaos est un processus déterministe, quasi-aléatoire, sensible à la condition initiale [174]. La nature du chaos est aléatoire et imprévisible. Mathématiquement, le chaos est le hasard d'un simple système dynamique déterministe qui peut être considéré comme une source d'aléatoire. Une carte chaotique est un système dynamique en temps discret fonctionnant dans un environnement chaotique [175] (voir équation 115).

$$x_{k+1} = f(x_k), 0 < x_k < 1, k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (115)$$

Avec :

$\{x_k : 1, k=0, 1, 2, \dots, N\}$  : Représente la séquence chaotique, qui est utilisée comme séquence à spectre étalé de nombre aléatoire. Les séquences chaotiques sont simples et rapides pour produire et stocker ; en fait, elle ne nécessite pas de longues séquences pour stockage [194]. À vrai dire que quelques fonctions (cartes chaotiques) et paramètres (conditions initiales) seront toujours nécessaires pour traiter des séquences très longues [175]. Dans ce travail, les  $r$  variables chaotiques sont générés par la technique de cartographie logistique exprimée (voir équation 116). Dans le présent travail, la carte logistique est utilisée pour les quatre raisons suivantes.

- a. Premièrement, la vitesse de convergence est relativement accélérée.
- b. Deuxièmement, la carte logistique est simple et facile à mettre en œuvre.
- c. Troisièmement, la carte logistique est facile à intégrer dans chaque partie de l'algorithme *HSG*.
- d. Quatrièmement, étant donné que chaque dimension nécessite une carte chaotique, l'utilisation d'autres cartes chaotiques augmentera la complexité de l'algorithme *HSG*.

$$z_i^{j+1} = \mu_i * z_i^j * (1 - z_i^j), i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (116)$$

Avec :

- $i$  : Représente le numéro de la série des variables chaotiques.
- $\mu_i = 4$ .
- $r$  : Représente un variable chaotique.

- $z_i^0 (i = 1, 2, \dots, r)$  : Représente les différentes valeurs initiales.
- $z_i^1 (i = 1, 2, \dots, r)$  : Représente les valeurs des variables chaotiques.
- $j = 1, 2, \dots, N - 1$  : Représentent les ( $N-1$  solutions) produites par la même méthode.

### 4.3. Développement d'une nouvelle métaheuristique (CSHGS)

#### 4.3.1. Étapes de développement

##### 4.3.1.1. Structure d'agent

Lors de l'utilisation de l'algorithme *hunger games*, une tâche d'importation consiste à convertir la solution du problème en code d'agent. Dans la littérature, de nombreux schémas de codage sont proposés [177]. Dans ce travail, la structure de l'agent du problème comprend des variables binaires et entières qui se composent de six parties (voir

Figure 30).

- La première partie de l'agent indique la quantité d'approvisionnement entre le fournisseur et l'usine au cours de la période  $t$ .
- La deuxième partie est un binaire qui indique si la production de produit a eu lieu dans l'usine ou non durant la période  $t$ .
- La troisième partie indique la quantité produite durant la période  $t$ .
- La quatrième et la cinquième parties indiquent respectivement, la quantité transportée entre les usines et les centres de distribution et entre les centres de distribution et les clients durant la période  $t$ .
- La sixième partie concerne le *backorder* du produit par le client pendant la période  $t$ .

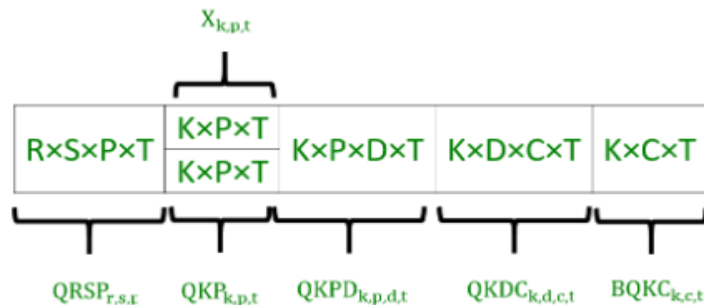


Figure 30: Structure d'agent proposée.



#### 4.3.1.2. La simulation floue (Monte Carlo)

Étant donné que les coûts totaux  $TC(Q; \xi)$  sont une variable floue, il sera difficile de calculer la valeur attendue en utilisant des méthodes analytiques. Alors, la méthode de Monte Carlo, dite aussi la simulation floue [117] fournit une approximation efficace. Les principales étapes de la simulation floue sont bien expliquées par Lui [132].

---

#### Le pseudo-code de méthode Monte Carlo

---

**Step 1.** Set  $e = 0$ .

**Step 2.** Randomly generate  $\theta_k$  from the credibility space space  $(\theta; P; Cr)$ , write  $v_k = (2Cr\{\theta_k\}) \wedge 1$  and produce  $\xi(\theta_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , respectively. Equivalently,  $w$  randomly generates  $\xi(\theta_k)$  and write  $v_k = \mu(\xi(\theta_k))$  for  $k = 1, 2, \dots, N$ , where  $\mu$  is the membership function of  $\xi$ .

**Step 3.** Set two numbers:

$a = TC(Q, \xi(\theta_1)) \wedge TC(Q, \xi(\theta_2)) \wedge \dots \wedge TC(Q, \xi(\theta_N))$ ;

$b = TC(Q, \xi(\theta_1)) \vee TC(Q, \xi(\theta_2)) \vee \dots \vee TC(Q, \xi(\theta_N))$

**Step 4.** Randomly generate  $r$  from  $[a, b]$ .

**Step 5.** If  $r \geq 0$ , then  $e = e + Cr\{TC(Q, \xi) \geq r\}$ .

**Step 6.** If  $r < 0$ , then  $e = e - Cr\{TC(Q, \xi) \leq r\}$ .

**Step 7.** Repeat the fourth to sixth steps for  $N$  times.

**Step 8.**  $TC = a \wedge 0 + b \vee 0 + e(b - a)/N$

---

#### 4.3.1.3. Le test de la fin d'exécution

La résiliation est déterminée par l'algèbre maximale *maxgen*.

- Si  $iter < Maxgen$  : incrémenter la position.
- Si  $Ifiter > Maxgen$  : arrêter l'algorithme. La valeur de fitness maximale et son individu correspondant de la population dans le processus itératif total sont enregistrés.

#### 4.3.1.4. Transformer un problème multi-objectifs en mono-objectif

Généralement, les métaheuristiques multi-objectif offrent un compromis entre des fonctions objectifs conflictuelles, qui aboutissent à un ensemble de solutions optimales non dominées appelées solutions Pareto-optimales. Tandis que les métaheuristiques pour les problèmes mono-objectifs, lors de l'obtention d'une seule solution optimale demeurent efficaces. Tout objectif ne peut être modifié qu'au prix de ruiner un ou plusieurs autres objectifs en fonction de chaque solution optimale de Pareto. Alors, les décideurs doivent se positionner vis-à-vis de préférence à postériori ou à priori par rapport aux objectifs basés sur des techniques multi-objectif. Par conséquent, transformer les problèmes multi-objectifs en scalaire pour les convertir en un problème mono-objectif serait une procédure générale pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs.

Dans ce travail, la méthode de programmation de compromis (CP) est prise en considération. Le but de cette méthode est de trouver une solution qui se rapproche le plus possible des valeurs optimales (idéales) de chaque fonction objectif. La proximité est définie par la métrique de distance L-p comme suit (voir équation 106) :

$$\min Z(x) = \left( \sum_{i=1}^k \left( \frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right)^r \right)^{\frac{1}{r}} \quad (106)$$

Avec  $f_1, f_2, \dots, f_k$  sont des fonctions objectifs différentes et conflictuelles et  $f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*$  sont les valeurs idéales pour le  $i^{\text{ème}}$  objectif. Dans ce travail,  $r$  est choisi 1.

#### 4.4. Nouvelle métaheuristique (CSHGS)

L'algorithme (CSHGS) est une nouvelle métaheuristique développée dans le cadre de ce travail, afin de trouver une meilleure solution au problème d'optimisation multi-objectif incertaine proposée. Cet algorithme se base principalement sur l'algorithme HGS dont on a amélioré le processus de l'exploration en utilisant le processus de la recherche chaotique. La logique de cette nouvelle métaheuristique est clarifiée dans le logigramme (voir Figure 31) et aussi dans le pseudo-code.

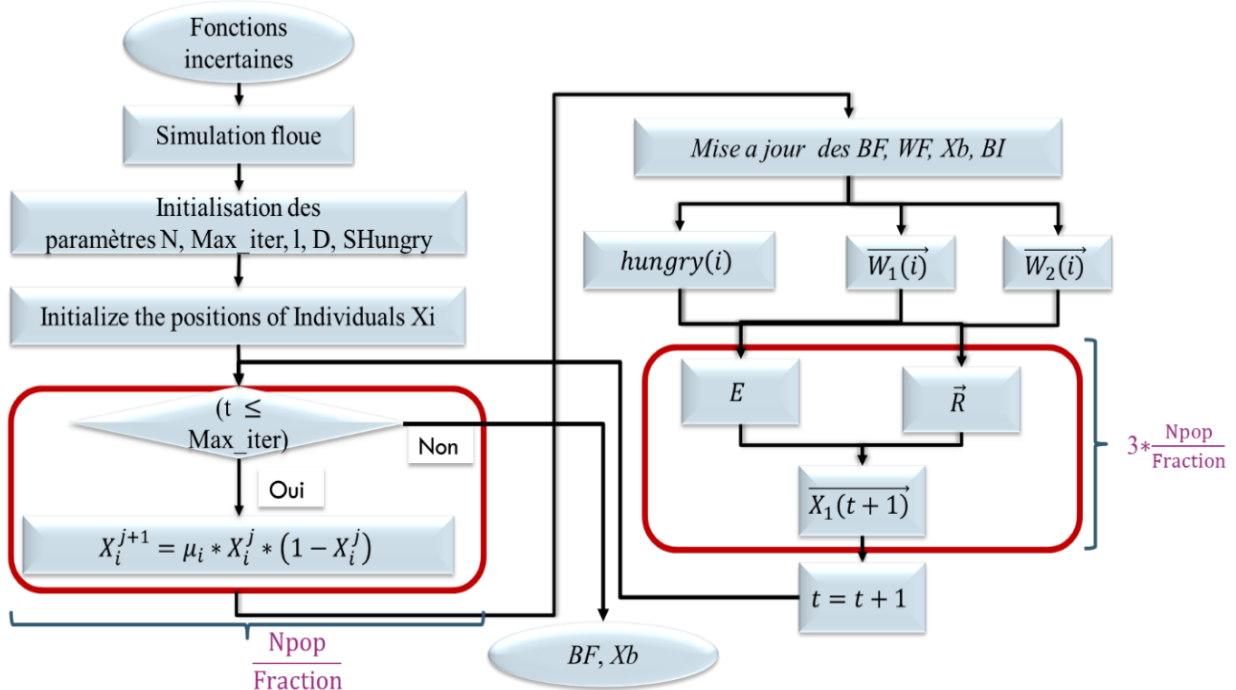


Figure 31: Le logigramme de l'algorithme CSHGS

```
Initialize the parameters  $N, Max\_iter, l, D, SHungry$   
Initialize the positions of Individuals  $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$   
While ( $t \leq Max\_iter$ ) do  
  Calculate the fitness of all Individuals  
  for (each portion  $\frac{N_{pop}}{Fraction}$  of worst of solutions)  
    do Perform chaotic search for  $X_i$  to generate a  
    new agent  $X'_i$  using (equation 116)  
     $X_i \leftarrow X'_i$   
     $f_i \leftarrow f'_i$   
  End for  
  Update  $BF, WF, X_b, BI$   
  Calculate the Hungry by (equation 112)  
  Calculate the  $W_1$  by (equation 110)  
  Calculate the  $W_2$  by (equation 111)  
  For (each portion  $3 * \frac{N_{pop}}{Fraction}$  of rest of solutions) do  
    Calculate  $E$  by (equation 108)  
    Update  $R$  by (equation 109)  
    Update positions by (equation 107)  
  End For  
   $t = t + 1$   
End While  
Return  $BF, X_b$ 
```

## 5. Résultats et analyse

### 5.1. Benchmarking des résultats (CSHGS/ (HGS, GA, PSO))

Pour faire un benchmarking, la moyenne (*AVE*) et écart type (*STD*) sont utilisés pour comparer tous les algorithmes, dans le cas d'une chaîne logistique en textile. Le but de l'emploi de ces deux mesures est d'indiquer la capacité des algorithmes à éviter les minima locaux. D'après le tableau (voir Tableau 20, Tableau 21), les valeurs objectives moyennes trouvées par *HGS* et *CSHGS* sont meilleures que celles obtenues par le *GA* et le *PSO* dans tous les cas.

Tableau 20: Résultats de calcul

	<b>GAMS</b>	<b>GA</b>	<b>PSO</b>	<b>HGS</b>	<b>CSHGS</b>
<b>Instance 1</b>	<b>0,204</b>	0,208	0,210	0,207	<b>0,205</b>
<b>Instance 2</b>	<b>0,224</b>	0,235	0,232	0,228	<b>0,225</b>
<b>Instance 3</b>	*	0,479	0,476	0,469	<b>0,466</b>
<b>Instance 4</b>	*	0,423	0,435	0,421	<b>0,422</b>
<b>Instance 5</b>	*	0,612	0,611	0,608	<b>0,603</b>
<b>Instance 6</b>	*	0,567	0,578	0,551	<b>0,552</b>

Tableau 21: Résultats de calcul de OF1 et OF2

	<b>GA</b>		<b>PSO</b>		<b>HGS</b>		<b>CSHGS</b>	
	<b>OF1</b>	<b>OF2</b>	<b>OF1</b>	<b>OF2</b>	<b>OF1</b>	<b>OF2</b>	<b>OF1</b>	<b>OF2</b>
<b>Inst 1</b>	565982	78278	566919	78408	565513	78214	<b>564576</b>	<b>78084</b>
<b>Inst 2</b>	1171544	227401	1168699	226848	1164904	226112	<b>1162058</b>	<b>225559</b>
<b>Inst 3</b>	2106043	525543	2101771	524477	2091803	521990	<b>2087531</b>	<b>520924</b>
<b>Inst 4</b>	5749098	988275	5797579	996609	5741018	986886	<b>5745058</b>	<b>987580</b>
<b>Inst 5</b>	8450995	1412779	8445753	1411903	8430025	1409274	<b>8403812</b>	<b>1404892</b>
<b>Inst 6</b>	9944379	1966750	10014187	1980556	9842841	1946668	<b>9849188</b>	<b>1947923</b>

## 5.2. Comportement de convergence (CSHGS/ HGS, GA, PSO)

Le comportement de convergence des différentes métaheuristiques, lors de la résolution de problème sur les instances 1, 2 et 3, est donné par les graphes (voir

Figure 32 et Figure 34). Donc, le *GA* et le *PSO* sont respectivement piégés dans des solutions optimales locales après une certaine itération. Cependant, la *CSHGS* a continué d'explorer de l'espace de recherche pour atteindre la convergence dans les itérations ultérieures avec la meilleure solution identifiée **0,208**. Par conséquent, par rapport aux autres algorithmes, les performances du *CSHGS* sont plus uniformes au fil des itérations et leur qualité de recherche est toujours supérieure.

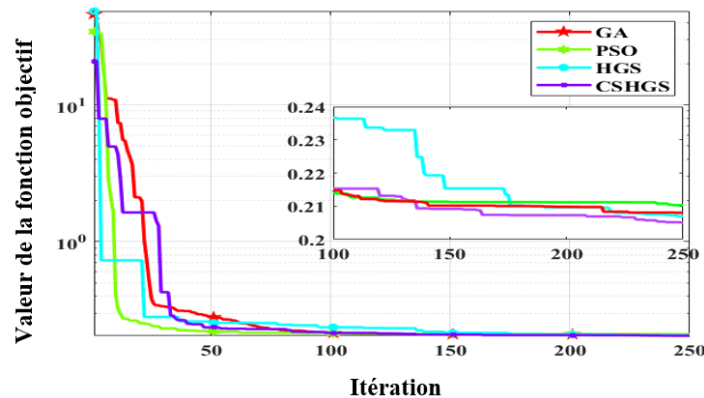


Figure 32: Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'1

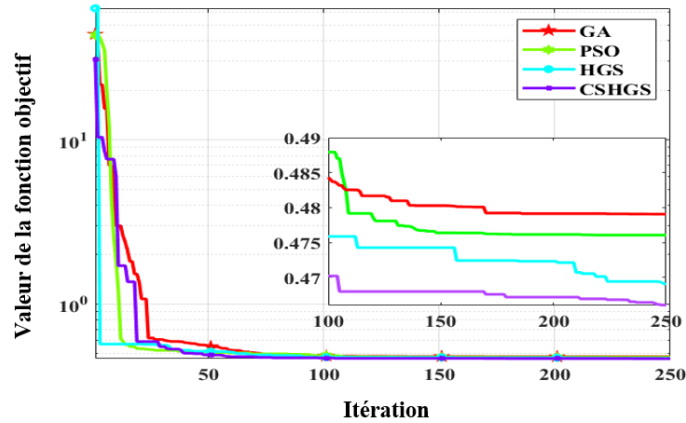


Figure 33: Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'2

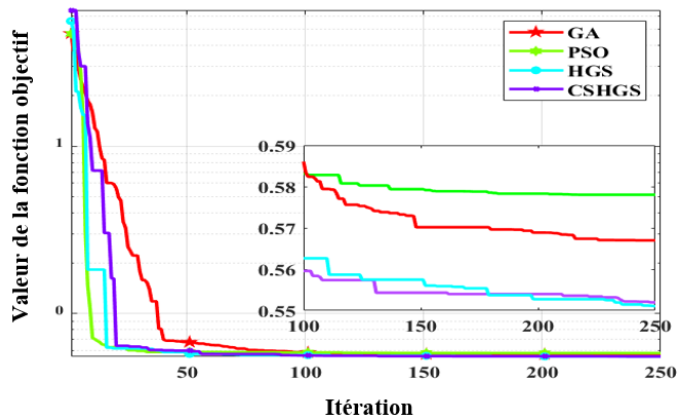


Figure 34: Courbes de convergence des algorithmes par 'instance'3

## 6. Conclusion

Ce dernier chapitre de ce travail traite le défi de la complexité de la chaîne logistique, à travers la résolution du problème d'optimisation multi-objectifs. Ce problème d'optimisation vise à intégrer de la chaîne logistique, au niveau tactique, sur des grandes instances qui représentent des chaînes logistiques très complexes. Donc afin d'obtenir la meilleure résolution, ce problème est résolu par une nouvelle métaheuristique (CSHGS). Cette nouvelle métaheuristique était développée, dans le cadre de ce travail, par l'amélioration des éléments responsables de l'exploration, dans la métaheuristique HGS, par le processus de recherche chaotique. En utilisant les données d'une chaîne logistique en textile, la performance de cette nouvelle métaheuristique est vérifiée par un benchmarking par rapport à d'autres métaheuristices à savoir GA, PSO, HGS.

# CONCLUSION GENERALE

## 1. Rappel de la problématique

Plusieurs organisations considèrent, l'utilisation optimale de toutes les capacités, un but primordial afin de pouvoir atteindre les cibles visées et les objectifs principaux prévus. Les décisions relatives à la production et à la logistique au sein d'une entreprise, sont des décisions décisives pour les entreprises, d'où l'importance de la chaîne logistique en tant qu'un processus qui stipule beaucoup de réflexions anticipatives. Ces réflexions tiennent en compte les contraintes de différents acteurs, ainsi que les comparaisons et les calculs pour pouvoir rester plus flexibles et surtout plus compétitif. L'amélioration de la chaîne logistique, implique toujours sa contextualisation pour pouvoir relever les défis qui s'imposent et qui deviennent de plus en plus redoutables dans un contexte mondial marqué par la globalisation, la libéralisation du commerce et aussi par des perturbations causant l'instabilité permanente du marché international.

En effet, les recherches existantes dans ce domaine restent insuffisantes. Etant donné qu'ils ne rapprochent pas leurs solutions à des cas réels, de ce fait beaucoup de modèles proposés demeurent limités en termes de gestion des différentes structures logistiques ou de gestion des événements incertains ou même de gestion des structures logistiques larges et complexes.

## 2. Apports de la recherche

Ce travail commence par une analyse détaillée de la chaîne logistique, ainsi que les révolutions de la chaîne logistique et les défis des chaînes logistiques actuelles. Cette étude a conduit à développer un nouveau modèle de la chaîne logistique visant à optimiser les coûts en tenant compte des contraintes de production, du transport et de logistique. Au premier lieu, les paramètres du modèle proposé étaient déterministes, par contre, la chaîne logistique subie des événements incertains. Donc, en deuxième lieu, pour rapprocher le modèle proposé à la réalité industrielle incertaine, le modèle déterministe est devenu incertain capable de traiter des paramètres de la chaîne logistique sous incertitude. De plus la validité du modèle a été testée, par la résolution d'une étude de cas réelle d'une chaîne logistique de grandes structures en réseau, dans le domaine de textile. En revanche, lors de la résolution était valable seulement lorsqu'il s'agit des petites instances de la chaîne logistique, mais restait irréalisable dans le cas d'une grande instance. En effet, cela est justifiée par le fait que ce problème de modélisation de chaîne logistique est un problème de NP-

Difficile. Donc pour résoudre ce problème de complexité, l'utilisation des métaheuristiques était primordial. Dans ce sens, une nouvelle métaheuristique nommée (*HGSCS*) était développée dans le cadre de ce travail. Ainsi, ce nouvel algorithme se base sur le développement de la performance de l'algorithme (HGS), connu sous le nom (*Hunger Games Search HGS*), par l'utilisation du processus de la recherche chaotique (*Chaotic Search*). Par la suite, les résultats obtenus, à l'aide de l'algorithme *HGSCS*, montrent une performance élevée par rapport à des algorithmes connus dans le domaine, notamment l'algorithme génétique (GA), l'optimisation de l'essaim de particules (*PSO*) et l'algorithme (*HGS*) original.

### 3. Perspectives

Une chaîne logistique optimisée est fondamentale à la réussite et à la compétitivité de toute entreprise. De ce fait, l'amélioration continue de la gestion de la chaîne logistique, constitue toujours un souci majeur pour toutes ses parties prenantes. Dans ce sens, les perspectives liées au développement de la chaîne logistique pour des éventuels travaux futurs sont les suivantes :

- L'intégration des métaheuristiques et l'apprentissage automatique : étant une approche flexible et relativement simple, les métaheuristiques peuvent être intégrées aux approches d'apprentissage automatique, où celui-ci pourrait être utilisé pour sélectionner les meilleurs paramètres du modèle afin d'obtenir une solution plus performante.
- Selon le théorème *no free lunch (NFL)*, l'application des nouvelles métaheuristiques, proposer des variantes améliorées, ou proposer des hybridations reste toujours une motivation afin de trouver la meilleure solution adaptée au problème soulevé.
- La prise en compte de l'environnement, du bien-être social et de l'économie d'énergie dans la chaîne logistique sont devenus des enjeux mondiaux au cours du siècle précédent. Aujourd'hui les lois et la législation gouvernementale et les attentes des clients et des bénéficiaires, s'accordent tous pour prendre en compte cet enjeu dans la gestion de la chaîne logistique, qui s'avère un facteur concurrentiel et décisif dans le sort de toute entreprise.
- L'absence d'une structure générique de la chaîne logistique pourrait donner naissance au développement de nouveaux modèles de management de la chaîne logistique pour représenter différentes structures logistiques. La hiérarchie des choix serait toujours basée sur le critère de la priorité vue par les managers. Par exemple, parmi les craintes liées à la gestion des stocks,

celles de la fiscalité et de la satisfaction des actionnaires, il faut choisir selon ce qui est considéré comme prioritaire. Ainsi il faut penser à développer des modèles, multi-objectifs pour répondre aux multiples besoins des managers en intégrant d'autres objectifs d'ordre financier relatifs aux capitaux propres et aux dettes totales. Il s'agit d'un accès vers le rapprochement des solutions aux cas réels.

- Dans le paramètre incertain, différents types d'incertitude peuvent être envisagés. En outre, les impacts environnementaux et sociaux des décisions de conception du réseau logistique seraient des paramètres incertains. L'approche réfléchie pourrait être intégrée dans des méthodes de programmation stochastique pour pouvoir simultanément le caractère aléatoire et l'incertitude épistémique.
- La possibilité d'utiliser la programmation des objectifs (*Goal programming*). Cette philosophie de décision permettra mieux de
  - iv. Déterminer les ressources nécessaires pour atteindre un ensemble d'objectifs souhaité.  
Déterminer le degré d'atteinte des objectifs avec seulement les ressources disponibles.
  - v. Fournir la meilleure solution satisfaisante sous forme d'une quantité variable des ressources et des priorités des objectifs.
- Le modèle proposé considère le flou comme une source d'incertitude. Cependant, les futures recherches pourraient aborder la question des incertitudes hybrides, telles que la rencontre en même temps du flou et de la rugosité.



## Références

- [1] C. Herzlich, *Réussir sa thèse en sciences sociales*. Armand Colin, 2005.
- [2] H. L. Lee et C. Billington, « Material Management in Decentralized Supply Chains », *Operations Research*, vol. 41, n° 5, p. 835-847, oct. 1993, doi: 10.1287/opre.41.5.835.
- [3] B. J. La Londe et J. M. Masters, « Emerging Logistics Strategies: Blueprints for the Next Century », *Int Jnl Phys Dist & Log Manage*, vol. 24, n° 7, p. 35-47, sept. 1994, doi: 10.1108/09600039410070975.
- [4] M. Christopher, « *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service* (Second Edition): Financial Times : Pitman Publishing. London, 1998 ISBN 0 273 63049 0 (hardback) 294 + 1 × pp. », *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 2, n° 1, p. 103-104, avr. 1999, doi: 10.1080/13675569908901575.
- [5] S. Tayur, R. Ganeshan, et M. Magazine, Éd., *Quantitative Models for Supply Chain Management*, vol. 17. Boston, MA: Springer US, 1999. doi: 10.1007/978-1-4615-4949-9.
- [6] M. Govil et J.-M. Proth, « SUPPLY CHAIN AT THE TACTICAL LEVEL », in *Supply Chain Design and Management*, Elsevier, 2002, p. 61-96. doi: 10.1016/B978-012294151-1/50004-7.
- [7] D. J. Ketchen, T. R. Crook, et C. W. Craighead, « From Supply Chains to Supply Ecosystems: Implications for Strategic Sourcing Research and Practice », *J Bus Logist*, vol. 35, n° 3, p. 165-171, sept. 2014, doi: 10.1111/jbl.12057.
- [8] H. J. Stolze, D. A. Mollenkopf, et D. J. Flint, « What is the Right Supply Chain for Your Shopper? Exploring the Shopper Service Ecosystem », *J Bus Logist*, vol. 37, n° 2, p. 185-197, juin 2016, doi: 10.1111/jbl.12122.
- [9] D. A. Mollenkopf, L. K. Ozanne, et H. J. Stolze, « A transformative supply chain response to COVID-19 », *JOSM*, vol. 32, n° 2, p. 190-202, août 2020, doi: 10.1108/JOSM-05-2020-0143.
- [10] R. Ganeshan, E. Jack, M. J. Magazine, et P. Stephens, « A taxonomic review of supply chain management research », *Quantitative models for supply chain management*, p. 839-879, 1999.
- [11] K. Alicke, D. Rexhausen, et A. Seyfert, « Supply Chain 4.0 in consumer goods », p. 11.
- [12] R. Croson et K. Donohue, « IMPACT OF POS DATA SHARING ON SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: AN EXPERIMENTAL STUDY », *Production and Operations Management*, vol. 12, n° 1, p. 1-11, janv. 2009, doi: 10.1111/j.1937-5956.2003.tb00194.x.
- [13] B. M. Beamon et V. C. P. Chen, « Performance analysis of conjoined supply chains », *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 14, p. 3195-3218, janv. 2001, doi: 10.1080/00207540110053156.
- [14] T. C. Pamulety et V. M. Pillai, « Impact of Information Sharing in Supply Chain Performance », in *Technology Systems and Management*, vol. 145, K. Shah, V. R. Lakshmi Gorty, et A. Phirke, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 327-332. doi: 10.1007/978-3-642-20209-4\_47.
- [15] D. M. Lambert et M. C. Cooper, « Issues in supply chain management », *Industrial marketing management*, vol. 29, n° 1, p. 65-83, 2000.

- [16] H. Min et G. Zhou, « Supply chain modeling: past, present and future », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 43, n° 1-2, p. 231-249, juill. 2002, doi: 10.1016/S0360-8352(02)00066-9.
- [17] Z. Jia, *Planification décentralisée des activités de production et de transport: coordination par négociation*,. Université de Bordeaux 1, France, 2012.
- [18] A. Baboli, J. Fondrevelle, R. Tavakkoli-Moghaddam, et A. Mehrabi, « A replenishment policy based on joint optimization in a downstream pharmaceutical supply chain: centralized vs. decentralized replenishment », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 57, n° 1-4, p. 367-378, nov. 2011, doi: 10.1007/s00170-011-3290-x.
- [19] Z. Jemai, « Modèles stochastiques pour l'aide au pilotage des chaînes logistiques : L'impact de la décentralisation, ». Centrale Paris, 2003.
- [20] J.-M. Chen et H.-L. Cheng, « Effect of the price-dependent revenue-sharing mechanism in a decentralized supply chain », *Cent Eur J Oper Res*, vol. 20, n° 2, p. 299-317, juin 2012, doi: 10.1007/s10100-010-0182-3.
- [21] A. J. Schmitt, L. V. Snyder, et Z.-J. M. Shen, « Centralization versus Decentralization: Risk Pooling, Risk Diversification, and Supply Chain Disruptions », *SSRN Journal*, 2012, doi: 10.2139/ssrn.1115392.
- [22] P. P. Datta et M. G. Christopher, « Information sharing and coordination mechanisms for managing uncertainty in supply chains: a simulation study », *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 3, p. 765-803, févr. 2011, doi: 10.1080/00207540903460216.
- [23] Q. Duan et T. Warren Liao, « Optimization of replenishment policies for decentralized and centralized capacitated supply chains under various demands », *International Journal of Production Economics*, vol. 142, n° 1, p. 194-204, mars 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.11.004.
- [24] T. Xiao et T. Xu, « Coordinating price and service level decisions for a supply chain with deteriorating item under vendor managed inventory », *International Journal of Production Economics*, vol. 145, n° 2, p. 743-752, oct. 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.06.004.
- [25] T. Lecompte-Alix, « Un cadre formel de décision pour la planification multi-niveau des systèmes de production réticulaires », PhD Thesis, Bordeaux 1, 2001.
- [26] G. Hetreux, « Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions », phdthesis, INSA de Toulouse, 1996. Consulté le: 28 août 2021.[En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00139724>
- [27] A. Hatchuel, D. Saidi-Kabeche, et J. C. Sardas, « Towards a new planning and scheduling approach for multistage production systems », *International Journal of Production Research*, vol. 35, n° 3, p. 867-886, 1997.
- [28] G. Fontan, C. Merce, J.-C. Hennet, et J. Lasserre, « Hierarchical scheduling for decision support », *J Intell Manuf*, vol. 16, n° 2, p. 235-242, avr. 2005, doi: 10.1007/s10845-004-5891-9.
- [29] H. Stadtler et C. Kilger, Éd., *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. doi: 10.1007/978-3-662-04215-1.
- [30] J. T. Mentzer *et al.*, « Defining supply chain management », *Journal of Business logistics*, vol. 22, n° 2, p. 1-25, 2001.
- [31] D. J. Thomas et P. M. Griffin, « Coordinated supply chain management », *European journal of operational research*, vol. 94, n° 1, p. 1-15, 1996.

- [32] T. Bauernhansl, M. Ten Hompel, et B. Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in produktion, automatisierung und logistik: Anwendung-Technologien-Migration*. Springer, 2014.
- [33] A. Baumgrass, C. Cabanillas, et C. D. Ciccio, « A conceptual architecture for an event-based information aggregation engine in smart logitics », *Enterprise modelling and information systems architectures*, 2015.
- [34] M. Yli-Ojanperä, S. Sierla, N. Papakonstantinou, et V. Vyatkin, « Adapting an agile manufacturing concept to the reference architecture model industry 4.0: A survey and case study », *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 15, p. 147-160, sept. 2019, doi: 10.1016/j.jii.2018.12.002.
- [35] T. Bertonce, I. Erenda, M. P. Bach, V. Roblek, et M. Meško, « A Managerial Early Warning System at a Smart Factory: An Intuitive Decision-making Perspective: Managerial Early Warning System at a Smart Factory », *Syst. Res.*, vol. 35, n° 4, p. 406-416, juill. 2018, doi: 10.1002/sres.2542.
- [36] M. Peruzzini et J. Stjepandić, « Editorial to the special issue “Enterprise modelling and system integration for smart manufacturing” », *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 7, p. 1-3, sept. 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.05.001.
- [37] M. Peruzzini et J. Stjepandić, « Editorial to the special issue “Transdisciplinary analytics in supply chain management” », *Journal of Management Analytics*, vol. 5, n° 2, p. 75-80, avr. 2018, doi: 10.1080/23270012.2018.1443405.
- [38] S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer, et D. Gorecky, « Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 3, p. 579-584, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.143.
- [39] L. D. Xu, E. L. Xu, et L. Li, « Industry 4.0: state of the art and future trends », *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 8, p. 2941-2962, avr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [40] J. C. de Man et J. O. Strandhagen, « An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models », *Procedia CIRP*, vol. 63, p. 721-726, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.315.
- [41] N. Jabeur, T. Al-Belushi, M. Mbarki, et H. Gharrad, « Toward leveraging smart logistics collaboration with a multi-agent system based solution », *Procedia Computer Science*, vol. 109, p. 672-679, 2017.
- [42] D. McFarlane, V. Giannikas, et W. Lu, « Intelligent logistics: Involving the customer », *Computers in Industry*, vol. 81, p. 105-115, 2016.
- [43] R. Schmidt, M. Möhring, R.-C. Härting, C. Reichstein, P. Neumaier, et P. Jozinović, « Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results », in *International Conference on Business Information Systems*, 2015, p. 16-27.
- [44] Z. Chen, X. Ming, T. Zhou, et Y. Chang, « Sustainable supplier selection for smart supply chain considering internal and external uncertainty: An integrated rough-fuzzy approach », *Applied Soft Computing*, vol. 87, p. 106004, 2020.
- [45] D. Uckelmann, « A definition approach to smart logistics », in *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*, 2008, p. 273-284.
- [46] Y. Levy et T. J. Ellis, « Towards a Framework of Literature Review Process in Support of Information Systems Research », présenté à InSITE 2006: Informing Science + IT Education Conference, 2006. doi: 10.28945/2980.

- [47] M. Y. Jaber et S. K. Goyal, « Coordinating a three-level supply chain with multiple suppliers, a vendor and multiple buyers », *International Journal of Production Economics*, vol. 116, n° 1, p. 95-103, nov. 2008, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.08.001.
- [48] K. Govindan et M. Fattahi, « Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain », *International Journal of Production Economics*, vol. 183, p. 680-699, janv. 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.09.033.
- [49] A. Charnes et W. W. Cooper, « Chance-constrained programming », *Management science*, vol. 6, n° 1, p. 73-79, 1959.
- [50] L. Deroussi, N. Grangeon, et S. Norre, « Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques ». 2014.
- [51] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. 2010.
- [52] S. Jabbar, H. Lloyd, M. Hammoudeh, B. Adebisi, et U. Raza, « Blockchain-enabled supply chain: analysis, challenges, and future directions », *Multimedia Systems*, vol. 27, n° 4, p. 787-806, août 2021, doi: 10.1007/s00530-020-00687-0.
- [53] X.-F. Shao, W. Liu, Y. Li, H. R. Chaudhry, et X.-G. Yue, « Multistage implementation framework for smart supply chain management under industry 4.0 », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 162, p. 120354, janv. 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120354.
- [54] A. Raj, G. Dwivedi, A. Sharma, A. B. Lopes de Sousa Jabbour, et S. Rajak, « Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective », *International Journal of Production Economics*, vol. 224, p. 107546, juin 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107546.
- [55] K. Grzybowska, A. Awasthi, et R. Sawhney, Éd., *Sustainable Logistics and Production in Industry 4.0: New Opportunities and Challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-33369-0.
- [56] S. Gupta, V. A. Drave, S. Bag, et Z. Luo, « Leveraging Smart Supply Chain and Information System Agility for Supply Chain Flexibility », *Inf Syst Front*, vol. 21, n° 3, p. 547-564, juin 2019, doi: 10.1007/s10796-019-09901-5.
- [57] E. Manavalan et K. Jayakrishna, « A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 127, p. 925-953, janv. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.11.030.
- [58] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, K. Sallam, et M. Elhoseny, « A novel decision-making model for sustainable supply chain finance under uncertainty environment », *Journal of Cleaner Production*, p. 122324, 2020.
- [59] K. Pal et A.-U.-H. Yasar, « Internet of Things and Blockchain Technology in Apparel Manufacturing Supply Chain Data Management », *Procedia Computer Science*, vol. 170, p. 450-457, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.088.
- [60] V. G. Venkatesh, K. Kang, B. Wang, R. Y. Zhong, et A. Zhang, « System architecture for blockchain based transparency of supply chain social sustainability », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, p. 101896, juin 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101896.
- [61] S. Luthra et S. K. Mangla, « Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies », *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, p. 168-179, juill. 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.04.018.

- [62] C. Garrido-Hidalgo, T. Olivares, F. J. Ramirez, et L. Roda-Sanchez, « An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0 », *Computers in Industry*, vol. 112, p. 103127, nov. 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.103127.
- [63] I. D. L. Bogle, « A Perspective on Smart Process Manufacturing Research Challenges for Process Systems Engineers », *Engineering*, vol. 3, n° 2, p. 161-165, avr. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.02.003.
- [64] D. Dujak et D. Sajter, « Blockchain Applications in Supply Chain », in *SMART Supply Network*, A. Kawa et A. Maryniak, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 21-46. doi: 10.1007/978-3-319-91668-2\_2.
- [65] M. V. Pereira Pessôa et J. M. Jauregui Becker, « Smart design engineering: a literature review of the impact of the 4th industrial revolution on product design and development », *Res Eng Design*, vol. 31, n° 2, p. 175-195, avr. 2020, doi: 10.1007/s00163-020-00330-z.
- [66] P. De Giovanni, « Blockchain and smart contracts in supply chain management: A game theoretic model », *International Journal of Production Economics*, vol. 228, p. 107855, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107855.
- [67] J. Oh et B. Jeong, « Tactical supply planning in smart manufacturing supply chain », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 55, p. 217-233, févr. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2018.04.003.
- [68] M. Kouhizadeh, S. Saberi, et J. Sarkis, « Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers », *International Journal of Production Economics*, vol. 231, p. 107831, janv. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107831.
- [69] G. Büyüközkan et F. Göçer, « Digital Supply Chain: Literature review and a proposed framework for future research », *Computers in Industry*, vol. 97, p. 157-177, 2018.
- [70] D. Ivanov, A. Dolgui, A. Das, et B. Sokolov, « Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility », in *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain*, vol. 276, D. Ivanov, A. Dolgui, et B. Sokolov, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 309-332. doi: 10.1007/978-3-030-14302-2\_15.
- [71] R. Azzi, R. K. Chamoun, et M. Sokhn, « The power of a blockchain-based supply chain », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 135, p. 582-592, sept. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.06.042.
- [72] P. Dutta, T.-M. Choi, S. Somani, et R. Butala, « Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities », *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 142, p. 102067, oct. 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.102067.
- [73] B. Esmaeilian, J. Sarkis, K. Lewis, et S. Behdad, « Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0 », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 163, p. 105064, déc. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105064.
- [74] A. Banerjee, « Blockchain Technology: Supply Chain Insights from ERP », in *Advances in Computers*, vol. 111, Elsevier, 2018, p. 69-98. doi: 10.1016/bs.adcom.2018.03.007.
- [75] T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, et S. Cavalieri, Éd., *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2018*, vol. 803. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-03003-2.

- [76] C. G. Schmidt et S. M. Wagner, « Blockchain and supply chain relations: A transaction cost theory perspective », *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 25, n° 4, p. 100552, oct. 2019, doi: 10.1016/j.pursup.2019.100552.
- [77] T. E. Evtodieva, D. V. Chernova, N. V. Ivanova, et J. Wirth, « The Internet of Things: Possibilities of Application in Intelligent Supply Chain Management », in *Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities*, vol. 908, S. Ashmarina, A. Mesquita, et M. Vochozka, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 395-403. doi: 10.1007/978-3-030-11367-4\_38.
- [78] T. Omitola et G. Wills, « Towards Mapping the Security Challenges of the Internet of Things (IoT) Supply Chain », *Procedia Computer Science*, vol. 126, p. 441-450, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.278.
- [79] Y. Baghdadi, A. Harfouche, et M. Musso, Éd., *ICT for an Inclusive World: Industry 4.0—Towards the Smart Enterprise*, vol. 35. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-34269-2.
- [80] F. Casino, V. Kanakaris, T. K. Dasaklis, S. Moschuris, et N. P. Rachaniotis, « Modeling food supply chain traceability based on blockchain technology », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, n° 13, p. 2728-2733, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.620.
- [81] R. G. G. Caiado, L. F. Scavarda, L. O. Gavião, P. Ivson, D. L. de M. Nascimento, et J. A. Garza-Reyes, « A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management », *International Journal of Production Economics*, vol. 231, p. 107883, janv. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107883.
- [82] S. R. Chhetri, S. Faezi, N. Rashid, et M. A. Al Faruque, « Manufacturing Supply Chain and Product Lifecycle Security in the Era of Industry 4.0 », *J Hardw Syst Secur*, vol. 2, n° 1, p. 51-68, mars 2018, doi: 10.1007/s41635-017-0031-0.
- [83] D. Böckin, S. Willskytt, H. André, A.-M. Tillman, et M. Ljunggren Söderman, « How product characteristics can guide measures for resource efficiency — A synthesis of assessment studies », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 154, p. 104582, mars 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104582.
- [84] Y. Wang, M. Singgih, J. Wang, et M. Rit, « Making sense of blockchain technology: How will it transform supply chains? », *International Journal of Production Economics*, vol. 211, p. 221-236, mai 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.02.002.
- [85] M. Ramirez-Peña, A. J. Sánchez Sotano, V. Pérez-Fernandez, F. J. Abad, et M. Batista, « Achieving a sustainable shipbuilding supply chain under I4.0 perspective », *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, p. 118789, janv. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118789.
- [86] N. Rožman, R. Vrabič, M. Corn, T. Požrl, et J. Diaci, « Distributed logistics platform based on Blockchain and IoT », *Procedia CIRP*, vol. 81, p. 826-831, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.207.
- [87] I. Konovalenko et A. Ludwig, « Event processing in supply chain management – The status quo and research outlook », *Computers in Industry*, vol. 105, p. 229-249, févr. 2019, doi: 10.1016/j.compind.2018.12.009.
- [88] G. G. Siciliano et B. Gaudenzi, « The Role of Supply Chain Resilience on IT and cyber Disruptions », in *Network, Smart and Open*, vol. 24, R. Lamboglia, A. Cardoni, R. P. Dameri, et D. Mancini, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 57-69. doi: 10.1007/978-3-319-62636-9\_4.

- [89] L. Novais, J. M. Maqueira, et Á. Ortiz-Bas, « A systematic literature review of cloud computing use in supply chain integration », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 129, p. 296-314, mars 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.01.056.
- [90] Y. Hao, H. Liu, H. Chen, Y. Sha, H. Ji, et J. Fan, « What affect consumers' willingness to pay for green packaging? Evidence from China », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 141, p. 21-29, févr. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.001.
- [91] A. Litke, D. Anagnostopoulos, et T. Varvarigou, « Blockchains for Supply Chain Management: Architectural Elements and Challenges Towards a Global Scale Deployment », *Logistics*, vol. 3, n° 1, p. 5, janv. 2019, doi: 10.3390/logistics3010005.
- [92] M. M. Queiroz et S. Fosso Wamba, « Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation of the main drivers in India and the USA », *International Journal of Information Management*, vol. 46, p. 70-82, juin 2019, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.11.021.
- [93] A. P. Barbosa-Póvoa, C. da Silva, et A. Carvalho, « Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective », *European Journal of Operational Research*, vol. 268, n° 2, p. 399-431, juill. 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.036.
- [94] B. Ageron, O. Bentahar, et A. Gunasekaran, « Digital supply chain: challenges and future directions », *Supply Chain Forum: An International Journal*, vol. 21, n° 3, p. 133-138, juill. 2020, doi: 10.1080/16258312.2020.1816361.
- [95] W. Klibi, A. Martel, et A. Guitouni, « The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review », *European Journal of Operational Research*, vol. 203, n° 2, p. 283-293, juin 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.06.011.
- [96] D.-Y. Kim, « Relationship between supply chain integration and performance », *Operations Management Research*, vol. 6, n° 1-2, p. 74-90, 2013.
- [97] C. Gimenez et E. Ventura, « Logistics-production, logistics-marketing and external integration: Their impact on performance », *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 25, n° 1, p. 20-38, janv. 2005, doi: 10.1108/01443570510572222.
- [98] N. R. Sanders, « An empirical study of the impact of e-business technologies on organizational collaboration and performance », *Journal of operations management*, vol. 25, n° 6, p. 1332-1347, 2007.
- [99] S. Seuring, « Integrated chain management and supply chain management comparative analysis and illustrative cases », *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, n° 8-10, p. 1059-1071, 2004.
- [100] D. Kim, « An Integrated Supply Chain Management System: A Case Study in Healthcare Sector », in *E-Commerce and Web Technologies*, vol. 3590, K. Bauknecht, B. Pröll, et H. Werthner, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 218-227. doi: 10.1007/11545163\_22.
- [101] N. Susarla et I. A. Karimi, « Integrated supply chain planning for multinational pharmaceutical enterprises », *Computers & Chemical Engineering*, vol. 42, p. 168-177, 2012.
- [102] J. Zhang, A. Osmani, I. Awudu, et V. Gonela, « An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain », *Applied Energy*, vol. 102, p. 1205-1217, 2013.
- [103] M. Khan, M. Y. Jaber, et A.-R. Ahmad, « An integrated supply chain model with errors in quality inspection and learning in production », *Omega*, vol. 42, n° 1, p. 16-24, 2014.

- [104] R. Alfalla-Luque, J. A. Marin-Garcia, et C. Medina-Lopez, « An analysis of the direct and mediated effects of employee commitment and supply chain integration on organisational performance », *International Journal of Production Economics*, vol. 162, p. 242-257, 2015.
- [105] M. A. Miranda-Ackerman, C. Azzaro-Pantel, et A. A. Aguilar-Lasserre, « A green supply chain network design framework for the processed food industry: Application to the orange juice agrofood cluster », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 109, p. 369-389, juill. 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.04.031.
- [106] B. L. Dietrich, « A Taxonomy of Discrete Manufacturing Systems », *Operations Research*, vol. 39, n° 6, p. 886-902, déc. 1991, doi: 10.1287/opre.39.6.886.
- [107] M. Badell, J. Romero, et L. Puigjaner, « Optimal budget and cash flows during retrofitting periods in batch chemical process industries », *International Journal of Production Economics*, vol. 95, n° 3, p. 359-372, mars 2005, doi: 10.1016/j.ijpe.2003.06.002.
- [108] B. J. Angerhofer et M. C. Angelides, « System dynamics modelling in supply chain management: research review », in *2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No.00CH37165)*, Orlando, FL, USA, 2000, vol. 1, p. 342-351. doi: 10.1109/WSC.2000.899737.
- [109] N. Gunantara, « A review of multi-objective optimization: Methods and its applications », *Cogent Engineering*, vol. 5, n° 1, p. 1502242, janv. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1502242.
- [110] M. Ejday et L. Fourment, « Optimisation multi-objectifs à base de métamodèle pour des applications en mise en forme des métaux », *Mécanique & Industries*, vol. 11, n° 3-4, p. 223-233, mai 2010, doi: 10.1051/meca/2010040.
- [111] C. A. Coello Coello, « Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field », *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 1, n° 1, p. 28-36, févr. 2006, doi: 10.1109/MCI.2006.1597059.
- [112] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- [113] A. Liefooghe, L. Jourdan, et E.-G. Talbi, « Metaheuristics and cooperative approaches for the Bi-objective Ring Star Problem », *Computers & Operations Research*, vol. 37, n° 6, p. 1033-1044, juin 2010, doi: 10.1016/j.cor.2009.09.004.
- [114] E. Lessard, « Development and clinical introduction of an inverse planning dose optimization by simulated annealing (IPSA) for high dose rate brachytherapy: Ph.D. Theses Abstracts », *Med. Phys.*, vol. 31, n° 10, p. 2935-2935, oct. 2004, doi: 10.1118/1.1796111.
- [115] C.-L. Hwang et A. S. Md. Masud, « Methods for Multiple Objective Decision Making », in *Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications*, vol. 164, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979, p. 21-283. doi: 10.1007/978-3-642-45511-7\_3.
- [116] R. N. Tiwari, S. Dharmar, et J. Rao, « Fuzzy goal programming—an additive model », *Fuzzy sets and systems*, vol. 24, n° 1, p. 27-34, 1987.
- [117] H. Selim et I. Ozkarahan, « A supply chain distribution network design model: An interactive fuzzy goal programming-based solution approach », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 36, n° 3-4, p. 401-418, mars 2008, doi: 10.1007/s00170-006-0842-6.
- [118] S. A. Torabi et E. Hassini, « An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, n° 2, p. 193-214, janv. 2008, doi: 10.1016/j.fss.2007.08.010.



- [119] B. M. Werners, « Aggregation models in mathematical programming », in *Mathematical models for decision support*, Springer, 1988, p. 295-305.
- [120] M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase, R. Macchiaroli, et S. Miranda, « The role of uncertainty in supply chains under dynamic modeling », *10.5267/j.ijiec*, p. 119-140, 2017, doi: 10.5267/j.ijiec.2016.6.003.
- [121] B. Bouchon-Meunier, « La logique floue et ses applications », 1995.
- [122] D. Dubois, L. Foulloy, G. Mauris, et H. Prade, « Probability-Possibility Transformations, Triangular Fuzzy Sets, and Probabilistic Inequalities », *Reliable Computing*, vol. 10, n° 4, p. 273-297, août 2004, doi: 10.1023/b:reom.0000032115.22510.b5.
- [123] B. Liu, *Uncertain programming*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [124] Z. Pawlak, « Rough sets », *International journal of computer & information sciences*, vol. 11, n° 5, p. 341-356, 1982.
- [125] H. Kwakernaak, « Fuzzy random variables—I. Definitions and theorems », *Information sciences*, vol. 15, n° 1, p. 1-29, 1978.
- [126] H. Kwakernaak, « Fuzzy random variables—II. Algorithms and examples for the discrete case », *Information sciences*, vol. 17, n° 3, p. 253-278, 1979.
- [127] R. de Matta, « Product costing in the strategic formation of a supply chain », *Ann Oper Res*, vol. 272, n° 1-2, p. 389-427, janv. 2019, doi: 10.1007/s10479-017-2463-x.
- [128] P. C. Bell et J. Chen, « Close integration of pricing and supply chain decisions has strategic as well as operations level benefits », *Ann Oper Res*, vol. 257, n° 1-2, p. 77-93, oct. 2017, doi: 10.1007/s10479-014-1784-2.
- [129] A. Jindal et K. S. Sangwan, « Multi-objective fuzzy mathematical modelling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors », *Ann Oper Res*, vol. 257, n° 1-2, p. 95-120, oct. 2017, doi: 10.1007/s10479-016-2219-z.
- [130] B. Liu, « Random fuzzy variables and random fuzzy programming », *Fuzzy Sets and Systems*, 2001.
- [131] B. Liu, *Theory and Practice of Uncertain Programming*, vol. 102. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2002. doi: 10.1007/978-3-7908-1781-2.
- [132] B. Liu et Y.-K. Liu, « Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models », *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, n° 4, p. 445-450, août 2002, doi: 10.1109/tfuzz.2002.800692.
- [133] X. Huang, « Credibility-based chance-constrained integer programming models for capital budgeting with fuzzy parameters », *Information Sciences*, vol. 176, n° 18, p. 2698-2712, sept. 2006, doi: 10.1016/j.ins.2005.11.012.
- [134] M. S. Pishvae, S. A. Torabi, et J. Razmi, « Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, n° 2, p. 624-632, mars 2012, doi: 10.1016/j.cie.2011.11.028.
- [135] B. Liu et K. Iwamura, « A note on chance constrained programming with fuzzy coefficients », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 100, n° 1-3, p. 229-233, nov. 1998, doi: 10.1016/s0165-0114(97)00291-1.
- [136] B. Liu, « Dependent-chance programming with fuzzy decisions », *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, n° 3, p. 354-360, juin 1999, doi: 10.1109/91.771090.
- [137] S.-T. Liu et C. Kao, « Solving fuzzy transportation problems based on extension principle », *European Journal of Operational Research*, vol. 153, n° 3, p. 661-674, mars 2004, doi: 10.1016/s0377-2217(02)00731-2.

- [138] H. Zhu et J. Zhang, « A Credibility-Based Fuzzy Programming Model for APP Problem », 2009. doi: 10.1109/aici.2009.204.
- [139] S.-T. Liu et C. Kao, « Solving fuzzy transportation problems based on extension principle », *European Journal of Operational Research*, vol. 153, n° 3, p. 661-674, mars 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(02)00731-2.
- [140] Y.-J. Lai et C.-L. Hwang, « Possibilistic linear programming for managing interest rate risk », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 54, n° 2, p. 135-146, mars 1993, doi: 10.1016/0165-0114(93)90271-I.
- [141] A. Giallanza et G. L. Puma, « Fuzzy green vehicle routing problem for designing a three echelons supply chain », *Journal of Cleaner Production*, p. 120774, 2020.
- [142] H. Zenil, « Une approche expérimentale à la théorie de la complexité algorithmique », 2011.
- [143] X.-S. Yang et Suash Deb, « Cuckoo Search via Lévy flights », in *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, Coimbatore, India, 2009, p. 210-214. doi: 10.1109/NABIC.2009.5393690.
- [144] B. Morales-Castañeda, D. Zaldivar, E. Cuevas, F. Fausto, et A. Rodríguez, « A better balance in metaheuristic algorithms: Does it exist? », *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 54, p. 100671, 2020.
- [145] S. Gao, C. Vairappan, Y. Wang, Q. Cao, et Z. Tang, « Gravitational search algorithm combined with chaos for unconstrained numerical optimization », *Applied Mathematics and Computation*, vol. 231, p. 48-62, 2014.
- [146] J. Brest, M. S. Maučec, et B. Bošković, « Single objective real-parameter optimization: Algorithm jSO », in *2017 IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*, 2017, p. 1311-1318.
- [147] T. T. Nguyen, « A high performance social spider optimization algorithm for optimal power flow solution with single objective optimization », *Energy*, vol. 171, p. 218-240, 2019.
- [148] Z. Cui *et al.*, « A pigeon-inspired optimization algorithm for many-objective optimization problems. », *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 62, n° 7, p. 70212-1, 2019.
- [149] Z.-M. Gu et G.-G. Wang, « Improving NSGA-III algorithms with information feedback models for large-scale many-objective optimization », *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, p. 49-69, 2020.
- [150] Y. Yang, H. Chen, A. A. Heidari, et A. H. Gandomi, « Hunger games search: Visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts », *Expert Systems with Applications*, vol. 177, p. 114864, sept. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.114864.
- [151] L. A. Real, « Animal choice behavior and the evolution of cognitive architecture », *Science*, vol. 253, n° 5023, p. 980-986, 1991.
- [152] C. J. Burnett *et al.*, « Hunger-Driven Motivational State Competition », *Neuron*, vol. 92, n° 1, p. 187-201, oct. 2016, doi: 10.1016/j.neuron.2016.08.032.
- [153] C. J. Reppucci et A. H. Veenema, « The social versus food preference test: A behavioral paradigm for studying competing motivated behaviors in rodents », *MethodsX*, vol. 7, p. 101119, 2020.
- [154] A. K. Sutton et M. J. Krashes, « Integrating hunger with rival motivations », *Trends in Endocrinology & Metabolism*, vol. 31, n° 7, p. 495-507, 2020.
- [155] S. Jarvandi, D. A. Booth, et L. Thibault, « Hyper-homeostatic learning of anticipatory hunger in rats », *Physiology & behavior*, vol. 92, n° 4, p. 541-547, 2007.

- [156] V. Gotceitas et J.-G. J. Godin, « Foraging under the risk of predation in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): effects of social status and hunger », *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 29, n° 4, p. 255-261, 1991.
- [157] N. E. Miller, C. J. Bailey, et J. A. Stevenson, « Decreased "hunger" but increased food intake resulting from hypothalamic lesions », *Science*, vol. 112, n° 2905, p. 256-259, 1950.
- [158] M. I. Friedman et E. M. Stricker, « The physiological psychology of hunger: a physiological perspective. », *Psychological review*, vol. 83, n° 6, p. 409, 1976.
- [159] W. J. O'brien, H. I. Browman, et B. I. Evans, « Search strategies of foraging animals », *American Scientist*, vol. 78, n° 2, p. 152-160, 1990.
- [160] S. Li, X. Li, H. Chen, Y. Zhao, et J. Dong, « A novel hybrid hunger games search algorithm with differential evolution for improving the behaviors of non-cooperative animals », *IEEE Access*, 2021.
- [161] X. Wang, D. Chang, T. Shi, G. Fan, et B. Zhang, « Diagnosis from CT scan images in complex biological media using deep learning and wave application: a Hunger Games search-based approach », *Waves in Random and Complex Media*, p. 1-25, nov. 2021, doi: 10.1080/17455030.2021.1998729.
- [162] S. Chakraborty, A. K. Saha, R. Chakraborty, M. Saha, et S. Nama, « HSWOA: An ensemble of hunger games search and whale optimization algorithm for global optimization », *Int J Intell Syst*, vol. 37, n° 1, p. 52-104, janv. 2022, doi: 10.1002/int.22617.
- [163] S. Li, J. Li, J. Yi, H. Yu, S. Wang, et S. Gao, « Incorporation of Improved Differential Evolution into Hunger Games Search Algorithm », in *2021 13th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China, août 2021, p. 39-43. doi: 10.1109/IHMSC52134.2021.00017.
- [164] G. Wu et Y. Li, « Non-maximum suppression for object detection based on the chaotic whale optimization algorithm », *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 74, p. 102985, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jvcir.2020.102985.
- [165] B. S. Yıldız, N. Pholdee, N. Panagant, S. Bureerat, A. R. Yildiz, et S. M. Sait, « A novel chaotic Henry gas solubility optimization algorithm for solving real-world engineering problems », *Engineering with Computers*, févr. 2021, doi: 10.1007/s00366-020-01268-5.
- [166] O. Altay, « Chaotic slime mould optimization algorithm for global optimization », *Artif Intell Rev*, nov. 2021, doi: 10.1007/s10462-021-10100-5.
- [167] K. Asghari, M. Masdari, F. S. Gharehchopogh, et R. Saneifard, « Multi-swarm and chaotic whale-particle swarm optimization algorithm with a selection method based on roulette wheel », *Expert Systems*, vol. 38, n° 8, déc. 2021, doi: 10.1111/exsy.12779.
- [168] M. kelidari et J. Hamidzadeh, « Feature selection by using chaotic cuckoo optimization algorithm with levy flight, opposition-based learning and disruption operator », *Soft Comput*, vol. 25, n° 4, p. 2911-2933, févr. 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05349-x.
- [169] D. Levy, « Chaos theory and strategy: Theory, application, and managerial implications », *Strategic management journal*, vol. 15, n° S2, p. 167-178, 1994.
- [170] L. M. Pecora, T. L. Carroll, G. A. Johnson, D. J. Mar, et J. F. Heagy, « Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications », *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 7, n° 4, p. 520-543, 1997.
- [171] S. Q. Liu, Y. Zhou, et W. P. Yan, « Research on Chaos Theory Improved Evolutionary Algorithm », in *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 926, p. 3463-3466.

- [172] A. R. Jordehi, « A chaotic artificial immune system optimisation algorithm for solving global continuous optimisation problems », *Neural Computing and Applications*, vol. 26, n° 4, p. 827-833, 2015.
- [173] Ş. Doğan, « A new data hiding method based on chaos embedded genetic algorithm for color image », *Artificial Intelligence Review*, vol. 46, n° 1, p. 129-143, 2016.
- [174] « Piecewise Linear Maps and Deterministic Chaos », in *Deterministic Chaos*, Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, p. 19-31. doi: 10.1002/3527604804.ch3.
- [175] B. Alatas, « Chaotic bee colony algorithms for global numerical optimization », *Expert Systems with Applications*, vol. 37, n° 8, p. 5682-5687, août 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.02.042.
- [176] G. Heidari-Bateni et C. D. McGillem, « A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system », *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, n° 2/3/4, p. 1524-1527, févr. 1994, doi: 10.1109/tcomm.1994.582834.
- [177] Y. Yu, Y. Liu, et G. Yan, « Encoding theory and application of genetic algorithm », *Computer Engineering and Applications*, vol. 3, p. 86-89, 2006.