

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



N° d'ordre :

UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DES MATHÉMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE

Département d'Informatique

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle

LMD Spécialité : Informatique

Option : Systèmes d'informations avancées.

Par :

BOUNIF Mohamed Elhadi

SUJET

**Optimisation à base de simulation pour le
développement des systèmes décisionnels**

Soutenue publiquement le : 25/06/2015 devant le jury composé de :

Pr. MIHOUBI Daoudi	Université de M'sila	Président
Dr. BOURAHLA Mostapha	Université de M'sila	Rapporteur
Pr. MOUSSAOUI Abdelouahab	Université de Setif	Examineur
Pr. BELOUADEH Hocine	Université de M'sila	Examineur
Dr. BOUBETRA Abdelhak	Université de Bordj Bou Arreridj	Examineur

Promotion : 2014 /2015

A mes très chers parents

A mes Sœurs

A ma fiancée

A mes amies

Merci pour tout, pour votre amour, votre soutien et votre patience.

Sans vous je ne serai rien.

Je vous aime

Remerciements

Je rends grâce, avant tout, à Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il m'a données durant ces années d'études afin que je puisse arriver à cet aboutissement.

Ma reconnaissance la plus profonde et ma gratitude la plus sincère à mon directeur de thèse Monsieur BOURAHLA Mustapha, Maître de conférence A à l'université de Msila, Je le remercie pour ses conseils judicieux, la grande confiance qu'il m'a accordée et pour la vision innovante de la recherche qu'il a toujours su m'inculquer.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent à ceux qui m'ont fait l'honneur de faire partie du jury de ma thèse : Professeur Bouderah Brahim, Professeur Belouadeh Hocine, Professeur Moussaoui Abdelouahab et Professeur Boubetra Abdelhak. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance pour avoir accepté d'examiner cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin je voudrai remercier mon ami BAZA Noureddine ainsi que tous ceux qui ont contribues à la réussite de cette thèse.

Résumé

Dans les milieux industriels comme dans la production, le contexte commercial très concurrentiel oblige les entreprises à diversifier leurs offres pour mieux répondre aux demandes de leurs clients. La gestion de cette diversité est alors une problématique centrale. L'optimisation de la chaîne logistique est devenue un des enjeux majeurs des entreprises ces dernières années. Cette optimisation peut demander des efforts d'organisation ou de réorganisation qui peut passer par un développement d'un alignement stratégique, c'est à dire la recherche de procédures collaboratives de gestion pour mettre à la disposition du client le bon produit au bon moment. Dans ce travail, nous nous sommes intéressé à l'optimisation de la planification des activités de production de chaînes logistiques.

Notre objectif était d'élaborer un outil pour l'analyse de l'efficience de l'organisation structurelle et décisionnelle (en planification) de la chaîne logistique. Nous proposons une méthode pour soutenir des décideurs dans le domaine de la gestion de la chaîne logistique, en se basant sur l'optimisation globale au lieu d'optimiser les sous-systèmes indépendants de la chaîne logistique.

Notre méthodologie est basée sur la combinaison des techniques de simulation et d'optimisation qui inclut un module d'optimisation multi-objectifs et un module de simulation. Le module d'optimisation est basé sur les algorithmes génétiques et le module de simulation utilise des conceptions alternatives efficaces proposées par les décisions stratégiques et tactiques pour trouver la solution optimale globale en utilisant la solution d'ordonnancement optimale proposée par l'algorithme génétique pour les décisions opérationnelles.

Mots clés: la gestion de la chaîne logistique, décisions, ordonnancement, simulation, optimisation.

Abstract

In the industrial environments as in the production, the very competing commercial context obliges the companies to diversify their offers for better answering the requests of their customers. The management of this diversity is then central problems. The supply chain optimization became one of the major issues of the companies in recent years. This optimization can ask for organization or reorganization efforts that can pass through a development of a strategic alignment, i.e. the research for collaborative management procedures to make available to the customer the right product at the right moment. In this work, we were interested in the optimizing planning of production activities of supply chains.

Our objective was to develop a tool for analyzing the efficiency of the organization structural and decisional (in planning) of the supply chain. We propose a method for supporting decision makers in the domain of supply chain management. The objective is the global optimization instead of optimizing independent subsystems of the supply chain.

The method architecture is based on combination of the simulation and optimization techniques which includes a multi-objectives optimization module and a simulation module. The optimization module is based on genetic algorithms and the simulation module uses effective alternative designs proposed by strategic and tactic decisions to find global optimal solution using the optimal scheduling solution proposed by the genetic algorithm for operational decisions. The experimental results show the efficiency and the feasibility of the proposed approach.

Key words: supply chain management, Decision, scheduling, simulation, optimization.

الملخص

في المجالات الصناعية كما هو الحال في الإنتاج، التنافسية الشديدة للمحيط التجاري تلزم الشركات لتنويع عروضها للإجابة على نحو أفضل لطلبات عملائها. إدارة التنوع هو إذا مشكل مركزي. تحسين سلسلة اللوجستية اصبح واحد من القضايا الرئيسية للشركات في السنوات الأخيرة. هذا التحسين يمكن أن يتطلب جهود تنظيم أو إعادة تنظيم، التي يمكن أن تمر من خلال تطوير توافق استراتيجي، أي البحث عن إجراءات إدارية تعاونية لتمكين العميل للحصول على المنتج المناسب في اللحظة المناسبة.

في هذا العمل، نحن مهتمون بالتخطيط الأمثل لأنشطة الإنتاج لسلاسل اللوجستية. هدفنا هو تطوير أداة لتحليل الجيد للتنظيم الهيكلي والقراري (في التخطيط) للسلسلة اللوجستية. لقد اقترحنا طريقة لدعم متخذي القرار في مجال إدارة سلسلة اللوجستية. والهدف هو التحسين الأمثل بدلا من تحسين الأنظمة الفرعية المستقلة لسلسلة اللوجستية.

يستند هيكل الطريقة على الجمع بين تقنيات المحاكاة والتحسين، والذي يتضمن وحدة التحسين متعددة الاهداف و وحدة للمحاكاة. تستند وحدة التحسين على الخوارزميات الوراثة وتستخدم وحدة المحاكاة التصاميم لبدائل فعالة التي تقترحها القرارات الاستراتيجية والتكنيكية لإيجاد الحل الأمثل و ذلك باستخدام الحل الأمثل للجدولة المقترحة من قبل الخوارزمية الجينية لاتخاذ القرارات التشغيلية.

الكلمات الرئيسية: إدارة سلسلة اللوجستية، القرار، الجدولة، المحاكاة، والتحسين.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1: La gestion des chaînes logistiques	
Introduction	5
1. Emergence historique de la chaîne logistique	5
2. La logistique	7
3. Les chaînes logistiques	7
3.1 Structures typiques de chaînes logistiques	9
3.2 Types de chaînes logistiques	10
3.3 Fonctions de la chaîne logistique	10
3.3.1 L'approvisionnement	11
3.3.2 La production	11
3.3.3 Le stockage	11
3.3.4 Distribution et transports	12
3.3.5 Le processus vente	12
3.4 Les flux de la chaîne logistique	12
3.4.1 Le flux d'information(de donnée)	12
3.4.2 Le flux physique	13
3.4.3 Le flux financier	13
3.5 Les décisions dans la chaîne logistique	14
3.5.1 Les décisions stratégiques	14
3.5.2 Les décisions tactiques	15
3.5.3 Les décisions opérationnelles	15
4 La gestion de chaîne logistique	16
4.1 Optimisation de la chaîne logistique	17
4.2 Modélisation de la chaîne logistique	18
4.2.1 Les modèles conceptuels	18
4.2.2 Modèle analytique	18

4.2.3 Modèle par simulation	19
4.3 Planification de la chaîne logistique	19
4.3.1 Décisions fonctionnelle	19
a) Décisions d’approvisionnement	20
b) Décisions de production	20
c) Décisions de Distribution	20
4.3.2 Décisions temporelles	20
4.4 Les mesures de la performance de la chaîne logistique	21
5. Ordonnancement de la production	23
5.1 Définitions	23
5.2 Ordonnancement d’ateliers	26
5.3 Les méthodes de résolution	27
6. Problématique	28
Conclusion	30
Chapitre 2 : Proposition d'une approche combinant la simulation et l'optimisation pour la gestion des chaînes logistiques	
Introduction	31
1. Couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques	31
2. Méthode d'optimisation globale	34
3. Objectifs et architecture de la méthode	36
4. Fonctionnalité de la méthode	41
5. Ordonnancement par l’approche proposée	48
Conclusion	51
Chapitre 3 : Algorithmes génétiques et optimisation multicritères	
Introduction	53
1. Algorithmes génétiques multicritères	53
1.1 Principes de base des algorithmes génétiques	53
1.2. Codage et population initiale	55
1.3 La fonction d’évaluation	56

1.4 Opérateur de sélection	57
1.5 Opérateur de croisement	58
1.6 Mutation	59
1.7 Autres paramètres	60
2. Caractéristiques des algorithmes génétiques	61
3. L'optimisation multicritères	62
Conclusion	71
Chapitre 4 : Conception et développement d'un prototype	
Introduction	72
1. L'utilisation des diagrammes	72
2. Les diagrammes utilisés pour concevoir notre prototype	72
2.1 Diagramme de cas d'utilisation (use case)	72
2.2 Diagramme de classes	73
2.3 Diagramme de séquence	73
2.4 Diagramme d'activité	73
3. La conception de notre système décisionnel	73
3.1 Diagramme de Cas d'utilisation de notre prototype	74
3.2 Diagramme de Classe de notre prototype	74
3.2 Diagrammes de séquence et d'activité de notre prototype	75
4. La description des tables de base de données	80
5. Développement d'un prototype	83
6. Outils et environnement de développement	83
7. Description de l'application	84
8. Les résultats expérimentaux	89
Conclusion	94
Conclusion générale	95

Table des figures

Figure 1.1	Exemple d'une Supply chain	8
Figure 1.2	Structures possibles d'une chaîne logistique	9
Figure 1.3	Flux d'une entreprise	14
Figure 1.4	Système d'indicateurs de performance	21
Figure 2.1	Architecture de la méthode.	37
Figure 3.1	Croisement à un site	58
Figure 3.2	Exemple de croisements à deux points	59
Figure 3.3	Exemple de mutation	59
Figure 3.4	Front de Pareto	64
Figure 3.5	Schéma de l'évolution de l'algorithme NSGA-II	68
Figure 3.6	Distance de crowding	70
Figure 4.1	Cas d'utilisation de notre prototype	74
Figure 4.2	Diagramme de classe de notre prototype	75
Figure 4.3	Séquence de modèle de chaîne logistique	76
Figure 4.4	Activité de modèle de chaîne logistique	76
Figure 4.5	Séquence d'une livraison	77
Figure 4.6	Activité d'une livraison	78
Figure 4.7	Séquence de demande de client	78
Figure 4.8	Activité demandes d'un client	79
Figure 4.9	Séquence de module de décisions	80
Figure 4.10	Activité de module de décisions	80
Figure 4.11	Fenêtre principale de notre prototype	85
Figure 4.12	Fenêtre matière première	86

Figure 4.13	Fenêtre demande client	87
Figure 4.14	Fenêtre ensemble des jobs	87
Figure 4.15	Fenêtre ensemble des ressources	88
Figure 4.16	Fenêtre modules de Décisions	89
Figure 4.17	Resultats de meilleurs modèles	81
Figure 4.18	Comparaison entre les meilleurs modèles	92
Figure 4.19	Les données du meilleur modèle	92

Liste des tableaux

Tab 4.1	La table clients	81
Tab 4.2	La table fournisseurs	81
Tab 4.3	La table jobs	81
Tab 4.4	La table matières premières	81
Tab 4.5	La table produits	81
Tab 4.6	La table demandes clients	82
Tab 4.7	La table livraison des matières	82
Tab 4.8	La table opérations	82
Tab 4.9	La table Machines	83
Tab 4.10	Exemple d'une livraison	93
Tab 4.11	Exemple d'une demande	93
Tab 4.12	Demande client trier	93
Tab 4.13	Résultat de planification tactique	94
Tab 4.14	L'ordonnancement optimal	94

Table des abréviations

<i>JIT</i>	<i>Just-in-time (Juste à temps)</i>
<i>SCM</i>	<i>Supply Chain Management</i>
<i>SCP</i>	<i>supply chain planning</i>
<i>ERP</i>	<i>Entreprise Resource Planning</i>
<i>APS</i>	<i>Advanced Planning and Scheduling</i>
<i>MRP2</i>	<i>Manufacturing Resource Planning</i>
<i>MRP1</i>	<i>Material Resource planning</i>
<i>DRP</i>	<i>Distribution Requirements Planning</i>
<i>MPS</i>	<i>Master Production Scheduling</i>
<i>MRP</i>	<i>Material Requirements Planning</i>
<i>CRP</i>	<i>Capacity Requirements Planning</i>
<i>FIFO</i>	<i>First In First Out</i>
<i>MOGA</i>	<i>Multi Objective Genetic Algorithms</i>
<i>AG</i>	<i>Algorithmes Génétiques</i>
<i>MO</i>	<i>Optimisation Multi objectifs</i>
<i>VEGA</i>	<i>Vector evaluated genetic algorithm</i>
<i>MOGA</i>	<i>Multiple Objective Genetic algorithm</i>
<i>NSGA</i>	<i>Non-dominated sorting genetic algorithm</i>
<i>NSGA II</i>	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
<i>JMetal</i>	<i>Metaheuristic Algorithms in Java</i>

Introduction générale

L'informatique décisionnelle est l'informatique à l'usage des décideurs et des dirigeants d'entreprises. Elle désigne les moyens, les outils et les méthodes qui permettent de collecter, consolider, modéliser et restituer les données d'une entreprise afin d'offrir une aide à la décision et de permettre à un décideur d'avoir une vue d'ensemble de l'activité traitée. Plus simplement, l'informatique décisionnelle c'est la transformation de données brutes en information puis la transformation de l'information en savoir (connaissances), c'est ce savoir qui va fournir une aide à la décision, aux managers d'une entreprise.

Dans beaucoup de secteurs industriels et notamment celui de la gestion de production, les chaînes logistiques sont soumises à des aléas importants qui menacent leurs évolutions et dégradent souvent leurs performances. Dans ce contexte, le domaine de gestion des chaînes logistiques a suscité, ces dernières années, un grand intérêt.

La chaîne logistique englobe l'ensemble des opérations réalisées pour la fabrication d'un produit ou d'un service allant de l'extraction de la matière première à la livraison au client final, en passant par les étapes de transformation, de stockage, et de distribution.

Les chaînes logistiques sont un résultat, ou plutôt une conséquence, de la déferlante mondialisation et de la globalisation des marchés. En effet, dans un environnement de plus en plus concurrentiel, la course vers la réduction des coûts de production tout en gardant une bonne qualité de produits finis et en améliorant la qualité de service aux clients, plus exigeants que jamais, n'en finit plus.

Une chaîne logistique peut à tout moment être victime de retards de livraison, de mauvaises estimations de consommation, de pertes de cargaisons et bien d'autres événements imprévisibles. Tous ces imprévus sont susceptibles d'engendrer des ruptures de stocks à n'importe quel point de la chaîne logistique, ce qui peut avoir des

conséquences dramatiques pouvant entraîner des pertes humaines. Ceci justifie le besoin de créer un outil qui permettrait de simuler des situations logistiques réelles et/ou probables.

Le travail présenté dans cette thèse, a été effectués dans la perspective d'apporter une solution pour des problèmes de prise de décision rencontrés dans des systèmes d'information pour les chaînes logistiques. La gestion d'une chaîne logistique est un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les manufacturiers, les entrepôts, les distributeurs, les détaillants et les clients de manière à produire et à distribuer les bonnes quantités de produits, aux bons endroits et au bon moment pour réduire les coûts inhérents à l'ensemble du système. Il y a principalement trois tâches importantes de la gestion d'une chaîne logistique :

- 1) La conception et l'optimisation d'une chaîne logistique : déterminer quelle est la façon la plus optimale de fabriquer les produits, de les stocker et de les livrer.
- 2) L'évaluation et la sélection des technologies de gestion d'une chaîne logistique : déterminer rapidement et précisément les exigences auxquelles devront répondre tous les nouveaux systèmes pour une chaîne logistique.
- 3) La mise en œuvre des technologies de gestion d'une chaîne logistique : mise en œuvre et intégration d'applications, et gestion des projets des partenaires visant à mettre en place des technologies de gestion de chaîne logistique.

Afin de mettre en évidence toutes les contraintes qui nous sont posées, nous proposons la conception et le développement d'un système d'aide à la décision, pour la modélisation et l'optimisation de la chaîne logistique. L'objectif de ce projet est de proposer une méthodologie pour l'optimisation et la simulation des chaînes logistiques ainsi que le développement d'un prototype supportant cette méthodologie.

Plus précisément, nous proposons une approche d'optimisation multicritères à base de la simulation pour la conception optimale des chaînes logistiques dans un

contexte dynamique et incertain. Cette approche comprend un module d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques multicritères et un module de simulation permettant l'évaluation de la chaîne étudiée au cours de l'optimisation.

L'optimisation concerne à la fois la configuration de la chaîne logistique et le système de pilotage caractérisé par les règles de pilotage et leurs paramètres de contrôle pour la prise de décision durant la simulation. L'algorithme génétique explore les solutions candidates intéressantes (configuration de la chaîne + règles de pilotage de la chaîne) dont les performances sont évaluées par le simulateur. Dès réception d'une solution candidate, Le simulateur génère automatiquement le modèle de simulation correspondant et évalue un ensemble d'indicateurs de performances tels que les coûts, les délais...

Le manuscrit se décompose selon les chapitres suivants : Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les principaux thèmes liés à cette thèse. Ce chapitre peut être divisé en deux parties. Dans la première, nous commençons par introduire la notion de chaîne logistique et tous les concepts qui y sont liés. Nous définissons la gestion de la chaîne logistique, ainsi que les principaux types ou architectures de chaînes logistiques, décrivons quelques outils et notions tel que : les mesures de performance, les différentes fonctions, et les niveaux de décisions. Dans la deuxième partie nous introduisons les concepts d'ordonnancement. Nous rappelons brièvement les notions d'ordonnancement d'atelier et de production, ainsi que les méthodes de résolution.

Dans le second chapitre, nous présentons une recherche bibliographique sur les travaux scientifiques menés sous le thème de couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques. La description de l'approche d'optimisation à base de la simulation développée dans le cadre de cette thèse pour traiter les problèmes de conception des chaînes logistiques est donnée dans ce chapitre. Nous présentons d'une manière formelle le problème étudié et l'approche d'optimisation proposée dans cette thèse.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les aspects importants relatifs aux algorithmes génétiques et à l'optimisation multicritères sont rappelés. Une description plus détaillée de l'algorithme génétique multicritères implémenté est présentée.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons, les résultats des expériences menées pour valider l'approche de résolution décrite dans le chapitre deux. Enfin, nous terminons par quelques remarques et perspectives pour des travaux de recherche futurs sur le problème de la gestion des chaînes logistiques. Les résultats de nos travaux sont publiés dans la revue *Journal of Computing and Information Technology – CIT* Vol 21(4), PP 255–268 (2013) sous le titre *Decision Support Technique for Supply Chain Management*.

Chapitre 1

La gestion des chaînes logistiques

Introduction

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'optimisation à base de simulation pour la chaîne logistique, notamment à l'optimisation des activités de planification et de pilotage.

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art des différents domaines de recherches qui touchent aux problèmes étudiés dans cette thèse. Nous présentons les chaînes logistiques : leurs définitions, leurs conceptions, leur gestion, et de la prise de décision aux différents niveaux de la chaîne. Nous nous intéressons aussi aux problèmes d'ordonnancement en ateliers, d'une manière générale, nous essayons de donner les notions nécessaires pour comprendre notre problématique.

1. Emergence historique de la chaîne logistique

Entre 1950 et 1970 et à des fins économiques et par soucis de minimiser les coûts de production les entreprises adoptent principalement la politique de production en masse, ce qui s'est répercuté sur la vitesse de développement et la diversification des produits.

La période 1970 — 1975, est caractérisée par le fait que la demande était supérieure à l'offre. Elle voit l'essor d'une économie basée sur la demande où les entreprises produisent à la commande. La production était la préoccupation majeure des sociétés qui n'avait pas de motif pour recourir les délais de livraison ou aller à des nouveaux besoins. Cette période, est justifiée par le fait qu'on avait une suite d'optimisations locales et non une optimisation globale des différentes activités de l'entreprise [47].

Dans les années 1980, la mondialisation des marchés et les exigences de performance financière, combinés aux progrès technologiques ont forcé les grands groupes à proposer des produits de bonne qualité à bas prix. Cette période est une période où l'on parle déjà d'intégration d'activités, le client devient "roi" et toutes les entreprises tentent alors d'améliorer la qualité des produits pour augmenter ses niveaux de satisfaction, tout en gardant des coûts compétitifs. On parle alors d'optimisation globale dans le cadre d'une même entreprise et non d'une suite d'optimisations locales [8].

Vu la concurrence effrénée qui se manifeste sur le marché côté rendement et durée des cycles de production, beaucoup d'entreprises adoptent de nouvelles politiques de management telles que le JIT (*just In Time*) qui consiste à produire proportionnellement à la demande du marché et qui permet de limiter les stocks de composants. L'intégration des activités comme l'approvisionnement et le transport forme la « logistique intégrée », connue aussi sous le nom de gestion de la chaîne logistique ou *Supply Chain Management (SCM)* [23].

À partir des années 90, l'offre de production dépassant la demande, les entreprises pour satisfaire les exigences d'une clientèle à la recherche de perfection, visent plusieurs objectifs en même temps pour pouvoir se maintenir et survivre sur le marché:

- De nouveaux marchés doivent être trouvés.
- La qualité des produits doit sans cesse être améliorée.
- Des coûts encore plus faibles.
- Des temps de réponse et des délais très faibles.

Pour gagner ou conserver des parts d'un marché devenu trop exigeant essentiellement en matière de délais, de prix et de qualité, la coopération entre les entreprises est devenue vitale, et ce en se recentrant sur leurs activités principales et déléguant en sous-traitance les autres tâches à des partenaires. Dans cette période le SCM s'étend à tous les fournisseurs et à toutes les entités de la distribution. De ce fait, le SCM n'est plus propre à une entreprise, du fait que l'intégration consiste à généraliser les bonnes pratiques de gestion à tous les intervenants afin d'améliorer la performance de la chaîne.

2. La logistique

Le terme logistique vient du mot grec « logistike » qui signifie l'art du raisonnement et du calcul. Initialement, la logistique est issue du domaine militaire ou elle définit par « La logistique consiste à apporter ce qu'il faut, là où il faut et quand il le faut. » [38]

Dans leur ouvrage, « La logistique au service de l'entreprise », Colin et al. [17] ont proposé la définition suivante : « *La logistique est le processus stratégique par lequel l'entreprise organise et soutient son activité. À ce titre, on peut déterminer et gérer les flux matériels et informationnels afférents, tant internes qu'externes, en amont qu'en aval.* »

La fonction logistique s'intéresse au flux de produits et à celui des informations qui leur sont attribués. Il existe plusieurs types de logistiques [55]:

- logistique d'approvisionnement qui permet d'approvisionner les stocks des entreprises et usines en matières premières, composants et sous-ensembles nécessaires au processus de production.
- logistique de production qui consiste à rendre disponibles les matériaux et les composants nécessaires à la production au pied des lignes de production.
- logistique de distribution qui consiste à délivrer vers les clients finaux les produits dont ils ont besoin.
- La logistique de soutien : qui sert à maintenir le niveau de disponibilité de systèmes complexes.
- La logistique inverse ou rétro-logistique qui gère les flux qui partent des clients vers le distributeur ou l'industriel. Il peut s'agir de produits rendus par le client car non satisfait, ou encore des produits à traiter en déchets industriels.

3. Les chaînes logistiques

La chaîne logistique est un réseau global d'organisations, des entreprises et les ressources impliquées dans le transfert d'un produit ou service du fournisseur au client. Les activités de la

chaîne logistique transforment les matières premières et les composants en produit fini livré au client final. Il existe énormément de définitions de la chaîne logistique dans la littérature.

« La suite des étapes de production et de distribution d'un produit depuis les fournisseurs des fournisseurs des producteurs, jusqu'aux clients de ses clients » (Supply Chain Council).

Lambert et al, [42] proposent une définition simple : «Une chaîne logistique est l'ensemble des firmes qui amènent des produits ou des services sur le marché »,

Christopher [16] définit la chaîne logistique comme étant «le réseau d'entreprises qui participent, en amont et en aval, aux différents processus et activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services apportés au consommateur final. En d'autres termes, une chaîne logistique est composée de plusieurs entreprises, en amont (fourniture de matières et composants) et en aval (distribution), et du client final ».

Chopra [15] donnent la définition suivante « une chaîne logistique consiste en toutes les étapes impliquées directement ou indirectement dans la satisfaction de la requête d'un client. La chaîne logistique inclut non seulement le fabricant et ses fournisseurs, mais aussi les transporteurs, les centres d'entreposage, les détaillants et les clients eux-mêmes ».

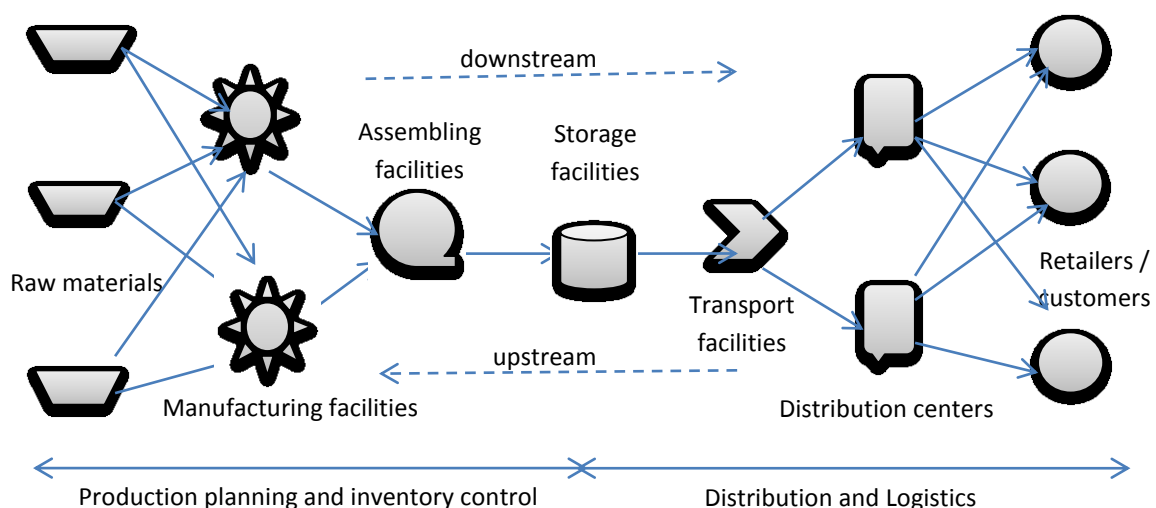


Figure 1.1: Exemple d'une Supply chain [10,11]

3.1 Structures typiques de chaînes logistiques

La structure d'une chaîne logistique dépend évidemment de sa nature et des objectifs souhaités lors de sa conception. Plusieurs architectures existent, elles peuvent être classifiées comme suit *Séquentielle* ; *Divergente* ; *Convergente* et *Réseau* [34]. Ces structures typiques ont pour but d'offrir des cadres de modélisation pour l'étude des chaînes logistiques et sont orientées sur des processus spécifiques.

- Séquentielle ou linéaire : consiste en l'existence d'un pôle ou entité alimentant une seule autre entité. On peut aussi trouver un ensemble de structures dépendant d'autres entités.
- Divergente ou de distribution : est une chaîne alimente plusieurs clients, plusieurs fournisseurs ou réseaux.
- Convergente ou d'assemblage : là où plusieurs fournisseurs alimentent un client ou une entreprise.
- La structure réseau est la composition entre la structure convergente et divergente. (voir Figure 1.2.).

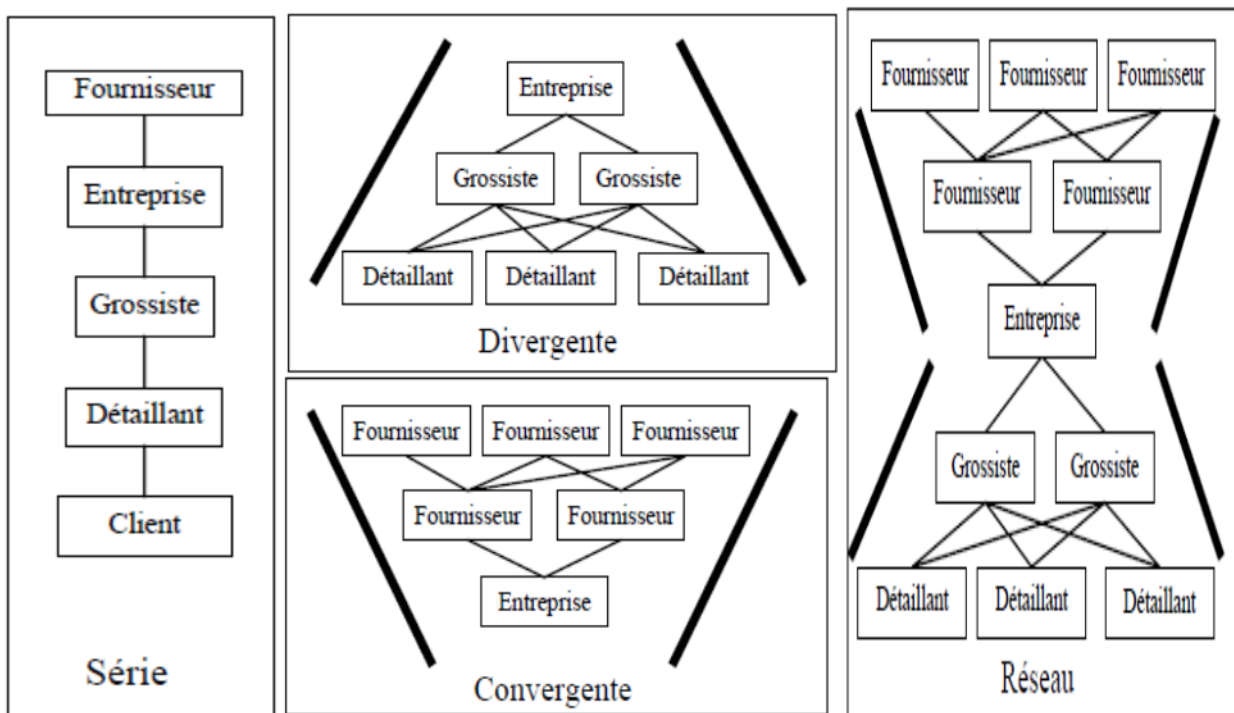


Figure 1.2 : Structures possibles d'une chaîne logistique [24]

Ces différentes structures des chaînes logistiques peuvent être à un seul niveau ou à plusieurs niveaux.

3.2 Types de chaînes logistiques

Plusieurs entreprises même juridiquement indépendantes peuvent composer une chaîne logistique. L'ensemble des intervenants, acteurs et partenaires à tous les niveaux de la production, du stockage, aux transport et vente des biens ou des services, peuvent dégager des marges bénéficiaires revenant à chaque intervenant ou partenaire. Il est possible de dégager les typologies des chaînes logistiques en fonction des objectifs de ces groupements d'entreprises.

Si les entreprises qui composent une même chaîne logistique ont des sites dans plusieurs pays on parle alors de chaîne logistique globale ce qui le cas d'une grande partie de chaînes.

Si les entreprises d'une même chaîne appartiennent à une même entité juridique même dans plusieurs sites, on parle dans ce cas de chaîne logistique interne ou d'*entreprise multi-site*.

On appelle *réseau d'entreprises* plusieurs entreprises qui collaborent pour satisfaire un besoin précis et non produit fini. Ce qui les distingue des chaînes logistiques.

Si dans une même chaîne logistique, plusieurs entreprises collaborent mais que l'une d'elles occupe un rôle dominant et central, on parle alors d'une entreprise étendue, qui correspond au fait à un réseau à différentes vocations mais partageant un système de gestion des entreprises impliquées.

Dans le cas où le pilotage est décentralisé ou semi décentralisé où les décisions sont le fruit de négociations bilatérales entre couples de partenaires, on parle alors d'une entreprise virtuelle qui peut être composée d'unités de production coopérant entre elles, des magasins, et des unités de transport œuvrant pour des objectifs communs, pour faire face à la concurrence.

3.3 Fonctions de la chaîne logistique

Ganeshan et Hrisson [25] définissent une chaîne logistique comme étant: « *le réseau des moyens de production et de distribution qui assurent les tâches d'approvisionnement en matières premières, la transformation de ces matières premières en produits semi finis et en produits finis, et la distribution de ces produits finis aux clients* ». De la définition ci-dessus on distingue

que les fonctions d'une chaîne logistique vont de l'approvisionnement, la production, le stockage, la distribution et la vente.

3.3.1 L'approvisionnement

Les matières et les composants approvisionnés constituent de 60% à 70% des coûts des produits fabriqués dans une majorité d'entreprises. Réduire les coûts d'approvisionnement contribue à réduire les coûts des produits finis [51].

Le processus approvisionnement se concentre sur la fourniture de tous les composants nécessaires à la fabrication. Deux grandes phases sont ici à distinguer. La première phase consiste à sélectionner les fournisseurs de l'entreprise. Le décideur a besoin d'identifier les fournisseurs potentiels à choisir pour alimenter les différentes usines en matières premières, en composants et en produits semi-finis. La seconde phase du processus approvisionnement consiste à passer les commandes des composants à ces fournisseurs en fonction de la production à réaliser. Il s'agit aussi de vérifier que ces composants sont livrés dans de bonnes conditions. Le processus approvisionnement regroupe ainsi toutes les relations avec les fournisseurs pour assurer les niveaux de stocks en composants nécessaires et suffisants pour la fabrication [8].

3.3.2 La production

C'est l'étape principale de la chaîne logistique qui consiste à donner naissance à des produits ou services à partir de matières premières. Le processus de production doit garantir et assurer une productivité pendant la phase de fabrication.

Les méthodes utilisées pour la gestion de la production cherchent à améliorer le flux des produits dans les ateliers de fabrication à travers la planification et l'ordonnancement, la détermination de la taille optimale des lots de production, la détermination des séries économiques [14].

3.3.3 Le stockage

Le stockage inclut toutes les quantités stockées tout au long du cycle d'exploitation de l'entreprise (le stock de matières premières, le stock des composants, les stocks des en-cours et

finalement le stock des produits finis). Ici aussi se pose la question de l'équilibre à trouver entre une meilleure réactivité et la réduction des coûts.

3.3.4 Distribution et transports

Processus qui intervient tout le long de la chaîne, en commençant par le transport des matières premières, à celui des composants entre les différentes usines, aux centres de stockage pour terminer dans des centres de distribution et finir par la livraison aux clients.

La distribution est généralement un élément intermédiaire d'une filière économique chargée du financement, du stockage, de la promotion et de l'acheminement des produits aux commerçants. La distribution englobe toutes les activités prenant en charge les commandes clients et leur livraison. Il inclut la gestion de la commande (entrée de commande et traitement), la gestion du transport et la livraison aux clients et reprend les questions d'optimisation des réseaux de distribution : l'organisation et le choix des moyens de transport, le choix du nombre d'étages (ou d'intermédiaires) dans le réseau de distribution ainsi que le positionnement des entrepôts et leur mode de gestion [64].

3.3.5 Le processus vente

Etape ultime à l'écoulement du produit fini assigné généralement à un service commercial qui se charge essentiellement à développer des relations envers le client (négociation des prix et des délais, enregistrement des commandes, ...) et par extension, recherche une meilleure connaissance du marché.

3.4 Les flux de la chaîne logistique

Les flux correspondent à toute entité, palpable ou non, circulante entre les maillons de la chaîne logistique [14]. Nous détaillons ici les trois flux traversant une chaîne logistique : flux d'information, physique et financier (Voir Figure 1.3).

3.4.1 Le flux d'information(de donnée)

Le flux d'information représente les données qui circulent entre les différents acteurs de la chaîne logistique afin de coordonner leurs activités mais aussi pour planifier et prévoir les demandes futures, de l'approvisionnement jusqu'à la livraison au client final.

Jihène et al. [64]. ont proposé une classification des données en trois grandes catégories :

- *Les données informationnelles* : sont les données de gestion (valeurs, ratios, prix, capacité, etc.) et les données informatiques (statiques, dynamiques ou historiques).
- *Les données décisionnelles* : sont les données qui caractérisent une décision prise par l'ensemble des acteurs de la chaîne à long, moyen et court terme (plan de production, plan d'approvisionnement, etc.)
- *Les métriques* : sont les indicateurs et les mesures qui permettent de piloter la chaîne logistique et de mesurer sa performance à long, moyen et court terme.

Le besoin de confidentialité qui entretiennent les différents acteurs de la chaîne logistique limite et ralentit le développement du flux d'informations au sein de la chaîne logistique à tel point les risques d'erreurs dans le prise de décision sont toujours présents.

3.4.2 Le flux physique

C'est les matières ou les marchandises qui circule au niveau de la chaîne logistique de l'amont vers l'aval (du fournisseur vers le client) afin de fournir de la valeur ajoutée au client final. Ces matières peuvent être des composantes, des produits semi-finis, des produits finis ou des pièces de rechange. Le flux physique est généralement considéré comme étant le plus lent des trois flux [8].

3.4.3 Le flux financier

A l'inverse du flux physique considéré comme le plus lent, le flux financier ou flux monétaire est limité par le fait qu'il est la résultante monétaire d'une fin d'activité et concerne toute la gestion pécuniaire des entreprises et acteurs de la chaîne logistique dans une période comptable.

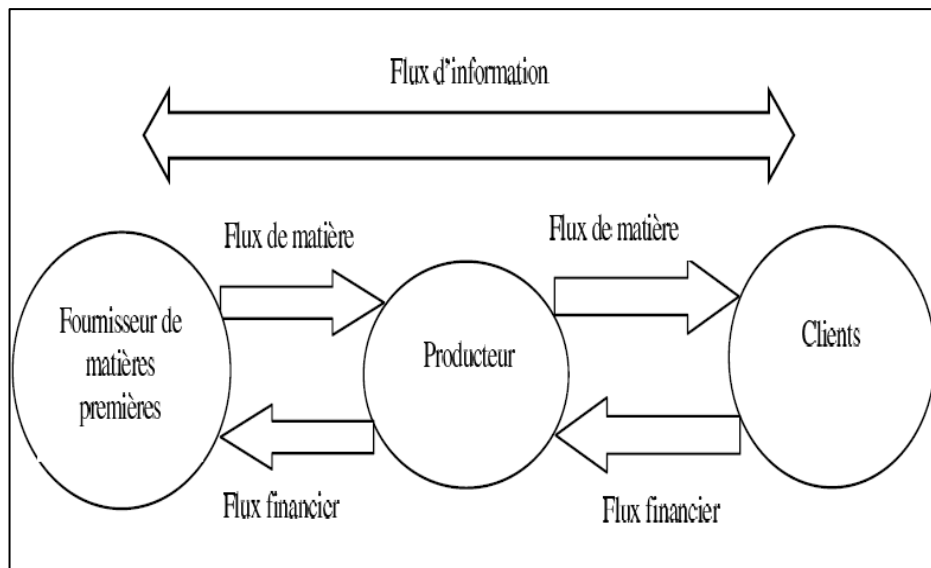


Figure 1.3 : Flux d'une entreprise [8]

3.5 Les décisions dans la chaîne logistique

La décision est un processus qui permet aux décideurs de sortir d'une situation de jugement ou d'incertitude, ce qui permettra la résolution des problèmes. La conception d'une chaîne logistique nécessite de prendre un ensemble de décisions. La prise de décision est divisée en trois niveaux hiérarchiques : décisions stratégiques, décisions tactiques, et décisions opérationnelles.

La différence entre ces trois niveaux de décision concerne la portée temporelle de l'application de la décision (long terme, moyen terme, court terme), le niveau d'agrégation (l'ensemble de l'entreprise, l'usine, et l'atelier) et le niveau de responsabilité des décideurs (la direction générale de l'entreprise, les cadres, et les responsables des ateliers).

3.5.1 Les décisions stratégiques

Ces décisions prises par la direction générale, sont des orientations générales configurer la chaîne sur le long terme, (de 6 mois à plusieurs années) comme par exemple

- Choisir les partenaires de la chaîne logistique,
- Choix et nombre de fournisseurs,
- Choisir les implantations des sites de production et des entrepôts,

- Déterminer le nombre, la capacité et les technologies utilisées dans les sites de production et d'entreposage,
- Choisir les moyens de transport entre les différentes localisations,
- Le développement d'un nouveau produit,
- Ainsi que les objectifs financiers à atteindre.

3.5.2 Les décisions tactiques

Les décisions tactiques sont prises sur un horizon de moins de 18 mois en général, qui devront être mis en application pour déployer la stratégie décidée par l'entreprise. Ces décisions, prises par les cadres de la production comme par exemple

- Avoir les prévisions les plus fiables possible, les quantités à fabriquer pour chaque produit et les quantités des matières premières essentielles.
- Déterminer des délais d'approvisionnement, de production et de distribution.
- Organiser la production à tous les niveaux .
- Adopter les modes d'utilisation des ressources.
- Découvrir une allocation optimale aux fournisseurs aux sites de production.
- Minimiser les coûts de transports et de livraisons en allouant des sites de stockage aux clients.
- Etablir le planning de transport.

3.5.3 Les décisions opérationnelles

Les décisions opérationnelles sont prises pour un horizon à court terme pour assurer le fonctionnement au quotidien de la chaîne. A ce niveau, L'objectif visé est de répondre aux contraintes établies par les configurations et les politiques de planification choisies aux niveaux stratégiques et tactiques, comme par exemple:

- Ordonnancement et pilotage en temps réel des systèmes de production.
- Tournée de véhicules ou programme des livraisons des produits, la destination et les quantités à livrer.
- Allocation des moyens de transport.

- Placement plus précis des activités de maintenance préventive.
- Affectation des ressources aux tâches (matérielles et humaines) de manière dynamique en fonction des aléas [38].

4 La gestion de chaîne logistique

La gestion de chaîne logistique (ou supply chain management) regroupe les approches, les méthodes et les outils indispensables pour la réduction des coûts d'une chaîne logistique et l'augmentation de sa flexibilité en vue d'améliorer sa performance [38]. Il est difficile d'identifier une définition unique pour la gestion de chaîne logistique. la communauté scientifique a proposé plusieurs définitions de la gestion de la chaîne logistique.

Mentzer et al. [46] définissent la gestion de chaîne logistique comme « *la coordination systémique, stratégique des fonctions opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne* ».

Simchi-Levi [59] propose dans son ouvrage la définition suivante « *Le SCM est une stratégie qui vise à la fois la réduction des frais globaux, permettant une position plus concurrentielle à toutes les différentes parties de la chaîne logistique, et l'optimisation de la satisfaction du client final par une plus grande adaptabilité des systèmes de production et de distribution* ».

Hugos [36] donne la définition suivante : « *le supply chain management est la coordination de la production, du stockage, de la localisation, et des transports à travers tous les participants à la chaîne logistique afin d'avoir la meilleure combinaison de réactivité et d'efficacité par rapport au marché desservi* ».

Le principal objectif du SCM est d'améliorer la compétitivité industrielle en : 1) l'amélioration des niveaux de services, 2) la réduction des coûts et de création de profits, 3) la gestion des relations sur les acteurs de production, distribution, transport et d'information, en

veillant à ce que les acteurs ne développent pas de comportements locaux antagonistes venant grever la performance globale [23].

4.1 Optimisation de la chaîne logistique

L'optimisation de la chaîne logistique consiste en la recherche de méthodes permettant un optimum, en maximisant ou minimisant un objectif par exemple du coût. Dès qu'il s'agisse de chaîne logistique, le passage du concept acheteur/vendeur, doit être dépassé et remplacé par l'approche réseau afin de garantir les intérêts de tous les partenaires, en évitant de focaliser l'opération sur l'un des intervenants de la chaîne et savoir minimiser les coûts globaux et maximiser les gains globaux.

Pour pouvoir mettre à la disposition du client, le bon produit au bon moment, l'entreprise peut être amenée à faire des efforts d'organisation ou de réorganisation et passer par un développement d'un alignement stratégique. Cette optimisation rencontre des problèmes dans sa mise en œuvre

- Trop d'informations sont imprécises, incertaines et même inconnues ou imprévisibles.
- Les critères de performance et de qualité sont antagonistes en raison des différents acteurs concernés.
- Il y a une multitude de systèmes de production et de distribution différents.
- Contraintes de production.
- Diversité des systèmes de transport et de distribution.
- Vouloir absolument un optimum global parfait conduit souvent à des calculs exponentiels qui ont des durées tellement grandes que ça devient inimaginable de les prendre comme solutions (problèmes NP-difficiles à résoudre).
- Chaîne logistique incomplète.

Pour faire face à ces problèmes, des nouvelles relations de partenariats entre fournisseurs et clients sont à définir. Ces relations doivent être durables, et permettre aux entreprises de s'intégrer et coordonner la prise de décision au niveau global de la chaîne, ceci dans le souci d'être réactif et efficace face aux mouvements des marchés qui restent très imprévisibles [49].

4.2 Modélisation de la chaîne logistique

La modélisation de la chaîne logistique est une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement de la chaîne et une meilleure gestion de ce système. Un modèle n'est qu'une schématisation simplifiée d'un système réel, Il est à la base des systèmes d'aide à la décision, qui permet de l'analyse, le contrôle et le pilotage des systèmes.

Il existe différents modèles de chaînes logistiques. Le choix du modèle dépend directement du type de problème et de structure que l'on veut étudier.

4.2.1 Les modèles conceptuels

Ces modèles conceptuels qui sont la description de la chaîne logistique, peuvent s'exprimer sous forme de diagrammes ou d'explications verbales mais leur multitude peut poser problèmes tels que :

- 1) difficultés de définir d'une manière unifiée le fonctionnement du système.
- 2) difficultés dans la mise en œuvre dans le cas d'une organisation complexe
- 3) difficultés d'orientations quant au contrôle et au pilotage de la chaîne.

4.2.2 Modèle analytique

Les modèles analytiques permettent de décrire le système par un ensemble d'équations mathématiques. Les modèles mathématiques sont très utilisés pour la conception des chaînes logistiques et pour la résolution des problèmes d'optimisation à un ou plusieurs critères [56]. Ils requièrent des compétences spéciales dans les mathématiques et la recherche opérationnelle. L'une des techniques les plus utilisées est la programmation linéaire et la programmation dynamique.

Ces modèles trouvent leur limite dans l'application de certaines hypothèses surtout dans des problèmes de grande taille alors que les industriels préfèrent appliquer des solutions approchées qui se feront dans une durée raisonnable.

4.2.3 Modèle par simulation

Dans un système où il est difficile de représenter toutes les hypothèses par équations et ne pouvant donc pas se mettre sous la forme d'un modèle analytique, les industriels préfèrent utiliser le modèle par simulation.

Ces modèles peuvent faire des prévisions et des évaluations de performances en essayant d'imiter le comportement des composants d'un modèle, leur capacité aide à capturer les incertitudes et à traiter l'aspect dynamique des systèmes complexes et des systèmes à grande échelle.

4.3 Planification de la chaîne logistique

La planification des chaînes logistiques (SCP supply chain planning) concerne la coordination et l'intégration des activités métier réalisées par une entreprise, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit final aux clients [29]. Les buts finaux de la planification de la chaînes logistique visent :

- l'utilisation optimale des ressources.
- la minimisation des stocks à tous les niveaux.
- la satisfaction de la demande des clients

La planification d'une chaîne logistique nécessite de prendre un ensemble de décision à des niveaux différents. Les différentes décisions de planification de la chaîne logistique sont donc classées selon les fonctions du réseau logistiques et selon l'horizon temporel (classification fonctionnelle et décisions temporelles) [30].

4.3.1 Décisions fonctionnelle

La classification fonctionnelle est une décision de planification qui regroupe les décisions d'approvisionnement, de production et de distribution.

a) Décisions d'approvisionnement

Les décisions relatives à l'approvisionnement sont celles qui permettent de définir la structure du sous-réseau approvisionnement. Les principales décisions portent sur :

- le choix de Faire ou Faire-Faire,
- le nombre et le choix de fournisseurs,
- l'affectation des fournisseurs aux sites de production
- l'organisation du programme d'approvisionnement.

b) Décisions de production

Les décisions qui concernent la fonction production sont essentiellement :

- Le nombre d'usines et leurs localisations.
- L'allocation des articles aux sites de production.
- La planification de la capacité de production.
- Le choix de ligne de production.
- L'ordonnancement de la production.
- Les décisions sur les produits à stocker et les niveaux des stocks.

c) Décisions de Distribution

Le dimensionnement du réseau de distribution regroupe essentiellement :

- la configuration et la localisation des centres de distribution (types de centres de distribution à utiliser et sites choisis),
- la définition de la politique de transport,
- l'affectation des clients aux centres de distribution
- l'allocation des articles aux centres de distribution et aux clients [8].

4.3.2 Décisions temporelles

Les décisions relatives à la gestion et à la planification de la chaîne logistique sont nombreuses et couvrent les différents horizons de la prise de décision : court, moyen et long terme.

4.4 Les mesures de la performance de la chaîne logistique

Il y a un adage qui dit : « *you can't manage what you don't measure* » dont la traduction en français pourrait être « *vous ne pouvez pas gérer ce que vous ne mesurez pas* ». Une gestion efficace est liée à un système de mesures de la performance bien défini et construit : si l'on ne mesure pas la performance d'un système, on ne peut pas le manager. La question qui est posée est donc: comment mesurer l'efficacité d'une chaîne logistique ?.

La gestion de la chaîne logistique cherche à améliorer le système global de production. Pour atteindre cet objectif, il faut connaître sa performance effective et déterminer une cible ou un objectif à atteindre. La première étape de suivi les performances consiste donc à « mesurer la performance ». Ensuite, il faut prendre des décisions de réingénierie et agir sur le système à travers des variables de décision afin de tendre vers la cible choisie [54].

Nous devons donc définir un ensemble d'indicateurs pour mesurer cette performance. Un indicateur de performance est défini par Neubert, [50] un indicateur est l'association d'une mesure d'efficacité, d'un objectif et de variables d'action. Les indicateurs de performance ont deux raisons d'être :

- Le premier objectif est de fournir de l'information pour certaines décisions courantes de *management* au niveau entreprise ou groupe.
- Le second est de piloter la performance à l'intérieur de certaines limites de contrôle.

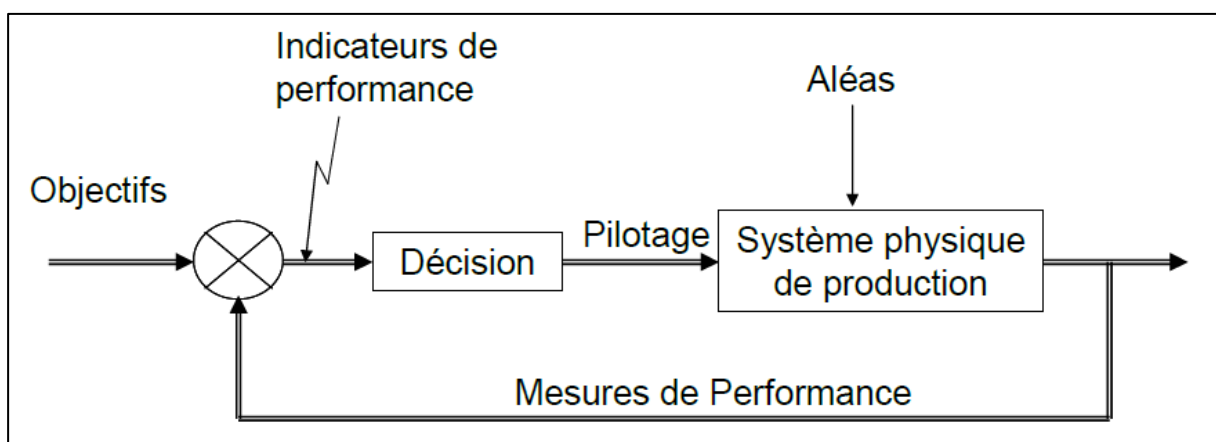


Figure 1.4 : Système d'indicateurs de performance [54]

D'après Courtois et al, [18] un indicateur de performance est défini comme « une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système, par rapport à une norme, un plan ou un objectif qui aura été déterminé et accepté, dans le cadre d'une stratégie d'ensemble ».

Parmi les principaux indicateurs de performance de la chaîne logistique largement utilisés il y en a :

- La coopération pour les flux d'informations.
- Le coût pour le flux financier
- Les délais de livraison en ce qui concerne le flux physique.

Pour Beamon [3] la classification des mesures de performance se fait en deux catégories :

- Qualitatives : satisfaction du client, flexibilité, intégration du flux physique et d'information, gestion du risque financier, etc.
- Quantitatives : retards de livraison, temps de réponse client, etc.

Chopra et Meindil [15] identifient six indicateurs de performance :

- Les infrastructures : ce sont les sites où l'on produit, assemble et stocke les composants. La performance de la chaîne logistique est influée par leur rôle, localisation, flexibilité et capacité.
- Les stocks : la réactivité d'une chaîne logistique peut être influée par tout changement de politique de stockage.
- Les transports : les transports, représentant une lourde charge pour la chaîne logistique, influent sur la performance, la réactivité et l'efficacité de celle-ci.
- L'information : est l'indicateur le plus important car elle influe directement sur l'ensemble des autres indicateurs et sur l'efficacité de la chaîne.
- Le Sourcing : définit le travail que chacun doit effectuer à travers la chaîne. c'est aussi la répartition des activités de l'entreprise mère.

- Les prix: donner une valeur aux biens et services (produits) en fonction de plusieurs paramètres car leurs répercussions influencent le comportement (décisions) des clients et les performances de l'entreprise .

Taylor [62] fait état de quatre catégories d'indicateurs de performances de la chaîne logistique classé comme suit :

- Mesures du temps : aussi bien dans le cycle d'une commande que dans celui du développement d'un produit qu'à la rigueur des livraisons.
- Mesures des coûts : aussi bien au niveau des coûts des matières premières, de la masse salariale, la maintenance, les retours de produits défectueux, les transports, le stockage, et le management des infrastructures.
- Mesures d'efficacité : elle concerne les taux d'utilisation d'un bien de la chaîne comme les entrepôts, la capacité de production et les capitaux utilisés.
- Mesures de qualité de service : comme les taux des livraisons effectuées à temps, des commandes satisfaites, des retours en usine, des plaintes des clients, et des clients qui passent de nouvelles commandes.

En conclusion, de tout ce qui a été dit ci-dessus il apparaît qu'il y a une multitude d'indicateurs de performance dans une chaîne logistique qui diffèrent d'une entreprise à une autre il s'agit alors de choisir les indicateurs qui répondent au mieux à la nature des activités de la chaîne.

5 Ordonnancement de la production

5.1 Définitions

L'ordonnancement de la production est défini par un ensemble de jobs à réaliser sur un ensemble de ressources; de sorte qu'une fonction objective soit optimisée [2]. L'ordonnancement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une suite de tâches (activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [31].

D'après la définition précédente, les composantes du problème d'ordonnement sont: un ensemble de ressources, un ensemble de tâches à réaliser, et une fonction objectif à optimiser. Les tâches sont des entités élémentaires généralement localisées dans le temps par une date de début, une date de fin et par une durée opératoire. Elles utilisent une ou plusieurs ressources. La tâche est dite préemptive si elle peut être interrompue, ou non préemptive si elle ne peut pas être interrompue.

En sortie de la fonction d'ordonnement, on obtient un planning qui détermine l'affectation des jobs fournies en entrée à des dates précises pour des durées déterminées sur différentes ressources. Ce planning a pour but à satisfaire des objectifs, en respectant le plus possible des contraintes que nous allons préciser [31]. La fonction d'ordonnement est une fonction à court terme, même si elle est parfois utilisée à moyen terme.

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables. On peut distinguer quatre grandes catégories de contraintes : temporelles, technologiques, d'enchaînement et de ressources.

Contraintes temporelles : Le premier type concerne les délais de fabrication imposés. Ces contraintes sont issues des impératifs de gestion et relatives aux dates limites des tâches ou du projet entier. On a surtout :

- La date de disponibilité
- La date d'échéance

Contraintes technologiques : Le deuxième type correspond aux contraintes technologiques, en général décrites dans les gammes de fabrication des produits.

Contraintes d'enchaînement : Nous qualifions de contrainte d'enchaînement ou de succession, une contrainte qui lie le début ou la fin de deux activités par une relation linéaire. Ce sont des contraintes imposées généralement par la cohérence technologique (les gammes opératoires dans le cas d'ateliers) qui décrivent des positionnements relatifs devant être respectés entre les tâches.

Contraintes de ressources : Le dernier type de contraintes concerne la limitation de la quantité de ressources de chaque type. Ces contraintes distinguent les différents types de ressources, qui peuvent être disjonctives (exécuter une seule tâche à la fois) ou cumulatives (exécuter plusieurs tâches en parallèle). Les ressources n'ont pas la même disponibilité et la même capacité. Une ressource peut aussi être consommable, lorsque après sa libération, elle n'est pas disponible en même quantité. Dans le cas contraire, elle est dite renouvelable.

On peut aussi distinguer les contraintes suivant qu'elles soient strictes ou pas. Les contraintes strictes sont des exigences à respecter alors que les contraintes dites de «préférences» peuvent éventuellement n'être pas satisfaites. D'autres contraintes plus spécifiques entre deux tâches ou plus, telles que : la synchronisation, la simultanéité, le recouvrement,... sont également imposées dans certains systèmes [43].

Dans la résolution des problèmes on cherche souvent, soit à minimiser, soit à maximiser un critère correspondant à une amélioration suivant au moins l'un des trois facteurs: coût, qualité ou délais [21]. Il existe deux grandes stratégies concernant l'objectif d'un ordonnancement : chercher des solutions admissibles (respectant les contraintes), ou bien viser l'optimalité des solutions. Le plus souvent c'est l'optimalité des solutions qui est visée.

Parmi les critères les plus utilisés :

- Minimisation de la date de fin d'ordonnancement (makespan), $C_{max} = \max(C_j \mid 1 \leq j \leq n)$ tel que n est le nombre de jobs et C_j est la date de fin d'exécution du job j . Ce critère permet de minimiser le temps de séjour total de l'ensemble des produits et donc de maximiser la productivité.
- La somme des dates de fin des jobs $\sum C_j$ qui minimise le temps de séjour moyen.
- Le plus grand retard $L_{max} = \max(C_j - d_j \mid 1 \leq j \leq n)$ tel que d_j désigne la date butoir associée au job j .
- La somme des retards $\sum_j \max(0, C_j - d_j)$.
- Le nombre de travaux en retard $\sum_j U_j$ tel que $U_j = 1$ si $C_j > d_j$ (job j en retard) et $U_j = 0$ sinon.

Chaque entreprise a ses propres objectifs, dépendants de sa politique, de son environnement manufacturier, de son passé, de ses problèmes particuliers. [43].

Il existe une notation introduite par Graham et al, (1979) [49] pour décrire tous les problèmes d'ordonnancement. C'est une notation en trois champs $\alpha/\beta/\gamma$ tel que le champ α décrit la structure du système à ordonnancer, le champ β décrit les contraintes liées à ce système, et le champ γ décrit la fonction objectif.

Dans un problème d'atelier les ressources (les machines) sont des ressources renouvelables disjonctives, c'est-à-dire que les machines ne peuvent réaliser qu'une opération à la fois, et chaque opération nécessite une seule machine pour sa réalisation. Les contraintes de précédences entre les opérations des différents travaux sont données par une gamme linéaire représentant l'ordre de fabrication, qui peut être fixé ou non.

5.2 Ordonnancement d'ateliers

Selon la disposition des machines et leur nombre, on peut distinguer les deux situations suivantes :

- **Une seule machine** : chaque travail comprend une seule opération à laquelle il est assimilé. Dans ce cas, le problème d'ordonnancement se résume au séquençement des opérations.
- **Machines identiques en parallèle** : il y a m machines identiques en parallèle ; Il faut donc décider sur quelle machine effectuer chaque opération et déterminer la séquence d'opérations sur chaque machine. De plus, les machines peuvent être identiques ou non. Dans le cas de machines non identiques, l'ensemble des opérations qu'elles peuvent traiter, ainsi que leurs durées opératoires, peuvent varier d'une machine à une autre. Selon la gamme de fabrication, on distingue trois types d'ateliers.
- **Atelier mono-gamme (Flow shop)** : Chaque ordre de fabrication doit être traité par chacune des m machines en série et ce, dans le même ordre. Tous les produits ont donc le même routage. En temps normal, toutes les files d'attente des machines (le cas échéant) opèrent selon la règle :FIFO First In First Out.

- **Atelier mono-gamme flexible (Flow shop hybride) :** C'est une généralisation de l'atelier mono-gamme et des machines parallèles en ce sens qu'au lieu de m machines en série, il y a s étages ou stations en série contenant des machines en parallèle. Chaque ordre de fabrication traverse les étages dans le même ordre, en utilisant une seule machine par étage. Les files d'attente fonctionnent généralement selon la règle FIFO.
- **Atelier multi-gammes (job shop) :** Chaque produit possède ici son propre routage, bien que certains puissent avoir à visiter une même machine plus d'une fois. C'est le phénomène de recirculation.
- **Atelier ouvert (open shop) :** Chaque ordre de fabrication doit être traité par les m machines. Cependant, il n'y a aucune restriction quant au routage emprunté par les produits, même que certains peuvent avoir des temps de traitement nuls à des machines en particulier.

5.3 Les méthodes de résolution

Il existe deux grandes familles de méthodes de résolution :

a) Méthodes exactes

Sous des conditions bien particulières , les méthodes exactes peuvent fournir des solutions exacte et optimale en se basant sur des lois bien déterminées

L'approche intuitive simpliste pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire est de lister toutes les solutions faisables, évaluer leurs fonctions objectives et choisir la meilleure solution. Par contre plus le problème est grand plus le recoure à ces méthodes est limité, ceci est à cause de l'accroissement du temps du calcul (on suppose que l'on considère des problèmes NP-difficiles). Les méthodes exactes les plus utilisées pour les problèmes d'ordonnancement sont: la méthode par séparation et évaluation (branch and bound) , la programmation linéaire et la programmation dynamique.

b) Les méthodes approchées ou méta-heuristiques

Les méta-heuristiques sont des stratégies de recherche itératives de haut niveau, destinées à l'exploitation de l'espace de solutions par l'utilisation de différentes techniques. Ces méthodes n'essayent pas d'examiner toutes les solutions possibles, mais de trouver dans un temps raisonnable une solution satisfaisante par investigation intelligente de l'espace en s'appuyant sur deux principes : la diversification de la recherche dans tous les endroits de l'espace ; et l'intensification, en exploitant chaque point de l'espace d'état [5]. Les méthodes approchées les plus utilisées sont : les algorithmes génétiques et les méthodes par voisinage.

6 Problématique

La chaîne logistique est considérée comme un réseau d'unités organisationnelles connectée et interdépendants, qui fonctionnent de manière coordonnée afin de gérer, de contrôler et d'améliorer le flux des matériaux et d'informations provenant des fournisseurs et atteindre les clients finaux, à l'issue de la passation de l'approvisionnement, de la transformation et de la distribution des sous-systèmes d'une entreprise.

Le but est de combiner et d'évaluer dans une perspective systémique les décisions prises et les actions menées dans les différents sous-processus qui composent le système logistique d'une entreprise. Ce processus intègre les opérations de la chaîne logistique, allant même jusqu'à l'incorporation des parties de la chaîne logistique qui sont en dehors de l'entreprise, à la fois en amont et en aval.

Le processus logistique intégré est utilisé pour atteindre une chaîne logistique optimale, en minimisant une fonction exprimant le coût total de la production, de la distribution, des stocks et des coûts des ressources. Notez que l'optimisation des coûts pour chaque phase unique n'implique pas généralement que le coût minimum total de l'ensemble des processus logistiques a été atteint.

L'objectif principal de cette optimisation globale est d'avoir des modèles et des outils informatiques pour la planification et l'analyse pour faire face à la grande complexité des systèmes logistiques actuels (qui fonctionnent dans un environnement dynamique et véritablement concurrentiel). Ces systèmes logistiques appartiennent aux entreprises manufacturières qui produisent une vaste gamme de produits, et qui s'appuient généralement sur

un système logistique multicentrique, répartis sur plusieurs unités de fabrication et plusieurs marchés.

La perspective est donc de concevoir un plan optimal de production, afin de minimiser le coût total, qui est la somme des achats, de traitement, de stockage, des coûts de distribution en plus des frais de pénalité associés à l'incapacité de réaliser certains niveaux des services prédéfinis. Toutefois, pratiquement, un plan optimal de la production logistique devrait être en mesure de satisfaire aux contraintes logiques et physiques imposées par les limites de la capacité de production disponible, des conditions technologiques, du coût des matériaux, de la configuration du réseau logistique, de lots de production minimum, ainsi que toute autre condition imposée par les décideurs en charge du processus de planification.

En raison de la complexité inhérente aux processus de prise de décision dans les chaînes logistiques, il y a un besoin croissant pour les méthodologies de modélisation qui peuvent aider à identifier et mettre en œuvre des stratégies pour la conception de réseaux de la chaîne logistique de haute performance.

L'objectif de notre travail est de donner un environnement d'optimisation basé sur une combinaison des méthodes mathématiques (pour l'optimisation) et la simulation (pour évaluation), pour optimiser globalement la conception des chaînes logistiques. Un modèle est un ensemble d'hypothèses sur le comportement d'un système. Ces hypothèses prennent la forme de relations mathématique ou logique.

Si les relations qui composent le modèle sont assez simples, il peut être possible d'utiliser des méthodes mathématiques pour obtenir des informations précises sur les questions d'intérêt; c'est ce qu'on appelle une solution analytique. Cependant, la plupart des systèmes du monde réel sont trop complexes pour être évaluées analytiquement, ces modèles doivent être étudiés au moyen de la simulation.

Les modèles de simulation par ordinateur sont largement utilisés comme des modèles de systèmes complexes réels pour évaluer leurs réponses à certains stimulants. L'un des inconvénients de simulation est que ce n'est pas une technique d'optimisation. Dans la plupart des études, plusieurs algorithmes de recherche ont été liés aux simulations, les algorithmes

génétiques ont montré la capacité de résoudre les grands problèmes de façon robuste, c'est pour cela nous proposons une approche qui utilise la simulation à base d'optimisation.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de résumer les différents concepts liés à la chaîne logistique en faisant un tour d'horizon sur les différentes composantes qui par leur conjugaison et le bon choix permettent d'aboutir à des meilleures mesures de performances, et une meilleure gestion de chaîne logistique les méthodes proposées pour leur modélisation, et la gestion de chaîne logistique et faire valoir l'importance du problème d'ordonnement au niveau opérationnel pour enfin terminer par aborder la problématique de cette thèse. Dans le chapitre suivant, nous présentons le problème et l'approche de résolution adoptée.

Chapitre 2

Proposition d'une approche combinant la simulation et l'optimisation pour la gestion des chaînes logistiques

Introduction

Le présent chapitre est dédié à la description de l'approche d'optimisation à base de la simulation, développée dans le cadre de cette thèse, pour traiter les problèmes de conception des chaînes logistiques. Nous commençons ce chapitre par l'introduction de l'approche d'optimisation à base de la simulation, avec quelques modèles proposés dans la littérature. Nous présentons le problème à étudier, par la suite nous présenterons une vue de l'ensemble de l'approche proposée, sa structure générale ainsi que ses objectifs. Nous terminons ce chapitre par la fonctionnalité de la méthode pour l'optimisation globale.

1. Couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques

Sur le terrain de la chaîne logistique globale, les outils de modélisation et de résolution (l'optimisation en particulier) se développent difficilement. Des difficultés sont accentuées par les aspects multicritères et multidimensionnels. Certains problèmes monocritères et multicritères monodimensionnels s'adaptent aux outils d'optimisation classiques.

Par contre, les outils de simulation fortement en décisions opérationnelles à l'échelle de l'atelier ou de l'usine sont des outils puissants afin qu'il puisse combler des défaillances possibles (prise en compte des effets stochastiques simplifiés, fonctionnement intrinsèquement dynamique...).

Le couplage de la simulation des chaînes logistiques avec l'optimisation aide à la construction d'un outil de diagnostic et d'aide à la décision de haut niveau. Ce qui permettra de modéliser au mieux la complexité des chaînes logistiques avec les enjeux de demain.

Pour Ingalls [37], une solution parfaite est obtenue par l'optimisation à base de la simulation. En effet, celle-ci peut aider, lors de l'optimisation, à l'évaluation de l'impact d'utilisation des différentes politiques de pilotage.

La performance de la chaîne peut être influencée par de nombreux événements tels que les variations de temps, de transport et les fluctuations des demandes clients dont les décideurs doivent en tenir compte pour une meilleure évaluation.

Une approche d'optimisation à base de la simulation comprend deux modules:

- Module d'optimisation: guider la direction de recherche des solutions.
- Module de simulation : évaluer des performances des solutions candidates suggérées par le module d'optimisation [20].

Par rapport aux méthodes de programmation mathématiques, les méthodes d'optimisation basées sur la simulation remplacent la fonction d'objectif analytique par un ou plusieurs modèles de simulation. Les variables de décisions répondent aux exigences sous lesquelles les modèles de simulation sont exécutés.

Pour des applications industrielles, le module d'optimisation s'appuie principalement sur des algorithmes de recherche tels que la recherche de motifs (pattern search), la méthode simplexe, la méthode de recuit-simulé et les algorithmes génétiques.

Lacksonen [41] a fait une comparaison entre ces quatre types d'algorithmes et en a déduit que les algorithmes génétiques sont les plus performants car ils ont prouvé leurs efficacité et robustesse pour la résolution des problèmes complexes.

Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour le développement et l'utilisation des méthodes d'optimisation à base de la simulation.

Hicks [33] propose, pour la planification des chaînes logistiques aux niveaux stratégiques, une méthodologie sur quatre principales étapes. A chaque étape, une partie du

problème de planification est résolue en utilisant soit l'optimisation, soit la simulation, soit d'optimisation à base de la simulation. Plus précisément les étapes sont :

- La détermination de la structure optimale de la chaîne en utilisant la programmation linéaire en variables mixtes.
- L'évaluation plus réaliste des indicateurs de performance par la simulation.
- La détermination des règles de pilotage de la chaîne par l'optimisation et la simulation.
- La combinaison de l'optimisation, la simulation et l'expérience du décideur pour les décisions finales.

Tompkins et al. [63] développent une méthodologie utilisant l'algorithme génétique connecté à un générateur de modèles de simulation pour la conception des systèmes manufacturiers flexibles. Les résultats efficaces obtenus sur trois exemples de systèmes manufacturiers ont validé la méthodologie proposée.

Azadivar et al. [1] développent une méthodologie d'optimisation à base de la simulation utilisant un algorithme génétique pour l'optimisation des variables de décision qualitatives et structurelles dans une chaîne logistique.

Azadivar et al. [20] conçoivent une méthodologie combinant un algorithme génétique avec un simulateur, pour optimiser l'agencement des lignes de production. Des expériences numériques sont réalisées et l'efficacité de la méthode proposée est comparée aux différentes méthodes classiques.

Truong [65] propose une méthode d'optimisation basée sur la simulation pour la conception des chaînes logistiques. Dans la détermination des politiques de gestion de production et le choix des modes de transport. Un algorithme génétique est utilisé dans le module d'optimisation. Dans ce même module, la programmation linéaire en variables mixtes est utilisée pour l'optimisation des variables quantitatives liées à la détermination de la localisation des usines et centres de distribution, leur capacité et les sites à servir. Dans cette approche, la simulation est utilisée pour l'évaluation des performances des solutions proposées par le module d'optimisation.

Dans Boesel et al. [6] un algorithme génétique est utilisé pour piloter les processus d'optimisation basé sur la simulation incluant une procédure pour contrôler l'erreur statistique des résultats obtenus par l'algorithme génétique. Cette méthodologie est dédiée principalement aux développeurs d'outils logiciels.

Dans Ding et al. [20], les auteurs proposent un cadre de méthodes d'optimisation à base de la simulation pour résoudre le problème de choix de fournisseurs. Cette approche comprend un module d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques multi-critères et un module de simulation permettant l'évaluation de la chaîne étudiée au cours de l'optimisation.

Pour optimiser l'ordonnancement de production, Li et al. [44], combinent un algorithme génétique avec un simulateur. Des expériences numériques sont réalisées et l'efficacité de la méthode proposée est comparée aux différentes méthodes classiques.

Enfin, il est important de souligner le manque important d'études sur les méthodes de résolution du problème de conception des chaînes logistiques au vu de:

- L'interaction entre les différents niveaux décisionnels.
- L'incertitude et la dynamique tout au long de la chaîne.
- La nécessité de passer d'une optimisation mono-critère à une réelle optimisation multi-critères.

2. Méthode d'optimisation globale

Nous allons proposer une méthode pour optimiser les performances des chaînes logistiques. Notre objectif est de se concentrer sur la performance globale au lieu d'optimiser la performance des activités séparées comme l'approvisionnement en matières premières, la production, la distribution...etc.

L'optimisation des performances des activités séparément ne fera qu'améliorer celle de chaque établissement, mais les interactions complexes entre les établissements de la chaîne logistique sont ignorées. L'intégration et la coordination sont les clés pour améliorer la performance globale.

Intégrer les activités de la chaîne logistique signifie que chaque partenaire aura l'accès à l'information concernant sa tâche et comprendra comment ses actions auront un impact sur les autres composants, ce qui lui permettra de choisir des alternatives d'efficacité a mené d'optimiser les objectifs de la chaîne logistique. Les composants intégrés devraient coordonner pour gérer les dépendances entre les activités afin de réaliser un fonctionnement cohérent de l'ensemble de la chaîne logistique.

Récemment, il y a un intérêt croissant pour l'intégration des différentes activités de la chaîne logistique, c'est l'exemple de l'intégration et la coordination des fonctions de production et de distribution. Mais notre intérêt est sur la coordination générale où l'intégration de différentes fonctions peut être réalisée, par exemple le stock et la planification de la production, les ventes et la distribution.

Nous envisageons un autre niveau de coordination c'est celui de la production, où les décisions sont coordonnées entre les usines (coordination multi-sites) d'une chaîne logistique interne. L'objectif de la coordination multi-sites est de combiner les plans de plusieurs usines de production dans une entreprise de fabrication intégrée de sorte que la performance globale de l'entreprise soit améliorée. Pour qu'une telle coordination soit efficace, les effets de l'incertitude d'une demande finale, du processus de production de chaque usine et les contraintes de la capacité de chaque usine doivent être prises en considération.

Avant de présenter notre approche en détail, il est important de présenter des concepts utiles. Un job est le traitement d'une demande de client pour produire une quantité spécifique, d'un produit avec des dates spécifiques de début et/ou des échéances. Une opération est une étape ou une tâche discrète, un d'un nombre d'éléments requis pour réaliser un produit. Un poste de travail peut être une machine ou un espace employés. Un centre de travail est un groupement de machines ou un groupement d'employés chargés de la planification et la gestion des coûts. Un routage est une liste séquentielle d'opérations, avec les centres de travail associés.

L'ordonnancement est l'attribution des jobs aux centres de travail. Les mesures de performance sont basées essentiellement sur : le « makespan » (minimisation de la date de fin d'ordonnancement), la somme des dates de fin des jobs ΣC_j , le plus grand retard L_{max} et la somme des retards ΣT_j .

Notre problème est d'optimiser la performance en satisfaisant les clients, avec le coût le plus bas. Nous cherchons à développer une solution à ce problème par la satisfaction des

contraintes sur les dates d'arrivées des matières premières et les dates de livraisons des produits finis tout en maximisant les profits de la production.

L'objectif étant de coordonner les organisations structurelles au niveau stratégique, les quantités de produits au niveau tactique et l'ordonnancement au niveau opérationnel dans le système global de la production pour accomplir les demandes des clients et minimiser les coûts associés à des dates fixes.

Au niveau opérationnel, il est possible d'utiliser la planification juste à temps, où les dates de disponibilité et les dates d'échéance sont respectivement négociées avec les fournisseurs et les clients externes. Toutes ces dates sont contrôlées par les décisions prises au niveau de la planification. Les dates de disponibilités et d'échéances sont liées l'une à la première opération d'un job et l'autre à la dernière .

En d'autres termes, nous essayons de rechercher une optimisation globale, en optimisant les ressources et leur organisation au niveau stratégique (conceptuel), et l'ordonnancement à l'aide de la planification tactique (comme la modification des quantités de produits).

3. Objectifs et architecture de la méthode

L'objectif global de notre travail est de donner une conception optimale de la chaîne logistique. Un modèle est un ensemble d'hypothèses sur le comportement d'un système. Ces hypothèses prennent la forme de relations mathématiques ou logiques. Si les relations qui composent le modèle sont assez simples, il est peut être possible d'utiliser les méthodes mathématiques (telles que l'algèbre, le calculus, ou la théorie des probabilités) pour obtenir des informations précises sur les questions d'intérêt : c'est ce qu'on appelle une solution analytique.

Cependant, la plupart des systèmes réels sont trop complexes pour permettre aux modèles réalistes d'être évalués analytiquement. Ces modèles doivent être étudiés au moyen de la simulation. Aujourd'hui, l'incertitude et le dynamisme de l'environnement commercial créent des opportunités et des risques.

L'optimisation de la chaîne logistique est la plus utile dans les situations où une société ou un produit ont une base d'approvisionnement, un processus de fabrication et un système de distribution complexe avec une demande volatile. Essentiellement, chaque fois qu'il y a une

incertitude sur le comportement des opérations de la chaîne logistique ou sur la demande dans le marché, l'optimisation de la chaîne logistique pourrait être bénéfique à la société.

Cependant, le vrai défi de la gestion de la chaîne logistique provient de l'incertitude inhérente aux événements quotidiens de chaque point de la chaîne, par exemple

- Demandes des clients sont rarement précises et souvent trompeuses.
- Problèmes techniques liées à la fabrication.
- Les retards liés à la distribution.

Il est primordial pour développer des modèles pour la chaîne logistique qui prennent en considération l'incertitude et la complexité.

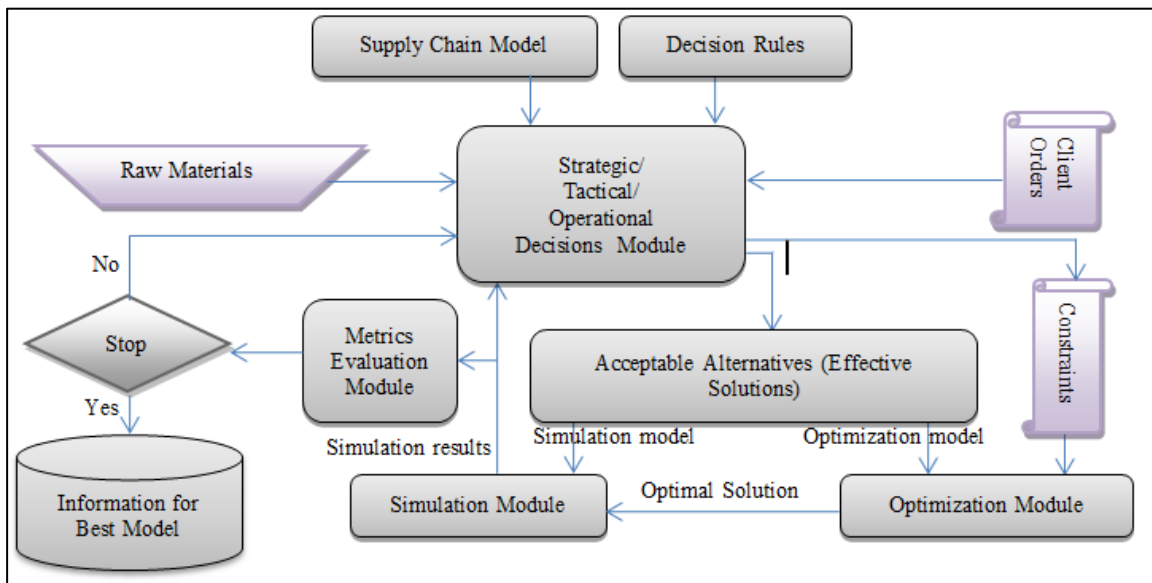


Figure 2.1: Architecture de la méthode [10,11].

La solution suggérée est basée sur l'architecture représentée sur la figure 2.1. L'architecture globale contient un modèle de chaîne logistique pour décrire la structure d'un réseau composé d'équipements utilisés dans la chaîne logistique. Ce modèle passera cette information structurelle au module de décisions stratégiques, tactiques et/ou opérationnelles.

Ce dernier a accès à d'autres informations, fournies par les fournisseurs externes de matières premières (comme les délais de livraison) et par les clients externes (tel que les demandes et leurs échéances). Ce module, basé sur des règles de décision, proposera des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles incertaines pour l'architecture de la chaîne

logistique en prenant en considération sa structure décrite dans le modèle de celle-ci, ainsi que sa restructuration en réduisant par exemple, le nombre de ressources nécessaires.

Ainsi, le module de décision filtrera toutes les solutions alternatives, en solutions effectives et ineffectives, basées sur des règles de connaissance (économique, technique, etc.) et toute autre information de la part des fournisseurs de matières premières et des clients.

Les sorties du module de décisions sont des solutions efficaces avec les contraintes opérationnelles. Les solutions alternatives sont décrites par les modèles incertains (utilisant les valeurs des paramètres incertains). Ces paramètres incertains sont liés aux décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles.

Au niveau stratégique, ces paramètres incertains représentent l'emplacement, la production, les stocks et le transport. Les paramètres incertains d'emplacement sont la taille, le nombre et la situation géographique des entités de la chaîne logistique, tel que les usines, les stocks ou les centres de distribution.

Les paramètres incertains de production sont censés déterminer :

- Quels sont les produits à réaliser ?
- La quantité des produits.
- Quels usines et fournisseurs sont employés ?

Les paramètres incertains de stock sont concernés par la façon de contrôler les stocks tout au long de la chaîne logistique.

Les paramètres incertains de transport sont faits sur les modes de transport à utiliser.

Au niveau tactique, les paramètres incertains tournent autour :

- Des prévisions mensuelles de la demande.
- La planification de la distribution et du transport.
- La planification de la production.
- La planification des besoins en matières.

Ainsi, Au niveau tactique les informations comme les décisions sur les quantités des produits, l'utilisation des ressources, etc. sont prises en compte.

Au niveau opérationnel, les paramètres incertains sont, la conception d'atelier, les tâches, les quantités des matériaux et les contraintes temporelles/ressources.

La description des alternatives acceptables est divisée en deux modèles incertains (le modèle d'optimisation et le modèle de simulation), qui sont des entrées aux deux modules. Le premier module est le module d'optimisation et le second est le module de simulation.

Grâce à un ensemble de contraintes, le module d'optimisation va générer une solution d'ordonnancement optimal pour la décision opérationnelle. La solution d'ordonnancement optimal avec le modèle de simulation fera l'entrée dans le deuxième module, le module de simulation. La raison derrière l'utilisation de la combinaison de deux modules (optimisation et simulation) est due au comportement complexe de la chaîne logistique. Ainsi, le processus de la séparation du comportement du modèle de la chaîne logistique à deux sous-modèles est nécessaire, pour gagner les avantages des méthodes analytiques et des méthodes de simulation.

Au début, les valeurs initiales pour les paramètres incertains sont indiquées par l'utilisateur via le module de décision. Ce module vérifiera ces valeurs en utilisant les règles de décision et les informations des contraintes des fournisseurs de matières premières et les demandes des clients. Puis, le module d'optimisation produira l'ordonnancement optimal à l'aide de son modèle (décrit avec les valeurs de paramètres incertains), et les contraintes temporelles/ressources.

Après ceci, le module de simulation simulera le modèle incertain de la simulation en utilisant l'ordonnancement optimal. Les résultats de simulation seront employés pour évaluer la performance globale de la décision alternative proposée par les différentes métriques de mesures.

Si la performance globale représente moins d'un critère de satisfaction, les résultats de simulation seront passés au module de décision pour proposer d'autres valeurs pour les paramètres incertains du modèle de la chaîne logistique.

Ce processus continuera jusqu'à atteindre un état stable ou un nombre maximum fixe d'itérations est réalisé. Un décideur peut être satisfait par la meilleure solution trouvée et par conséquent il va arrêter le processus de recherche d'autres solutions.

Nous emploierons la modélisation pour décrire les relations entre les décisions, les contraintes et les objectifs. Les modèles devraient capturer l'essentiel afin d'obtenir le résultat maximum de la chaîne logistique. Ces modèles peuvent devenir aussi bien très complexes que

détaillés. Par conséquent, on doit faire attention en sélectionnant le modèle qui convient aux besoins de l'entreprise. Pour la modélisation, afin de prendre des décisions un décideur dans une chaîne logistique doit répondre aux questions comme: quand et quelle quantité de matières premières à commander de la part d'un fournisseur ? quand et comment réaliser une demande ? quelle quantité de produit à transporter à un client ou à un centre de distribution ?.

Les contraintes de décision sont des limitations placées sur le plan de la chaîne logistique telles que :

- La capacité d'un fournisseur à fournir les matières premières ou les composants.
- Le centre de production qui peut seulement fonctionner pour un nombre spécifique d'heures par jour.
- La capacité d'un centre de distribution ou d'un client de manipuler et traiter les produits reçus.

Les contraintes peuvent être impératives ou souhaitées. Les contraintes impératives pourraient être par exemple le nombre d'heures de travail d'une équipe ou la capacité maximale d'un moyen de transport. Elles doivent être satisfaisantes. Les contraintes souhaitées peuvent plutôt être détendu ou violés.

Des exemples des contraintes souhaitées incluent les dates d'échéance des clients ou les limitations d'espace d'entrepôt. Dans les situations pratiques, des pénalités sont appliquées si une contrainte souhaitée n'est pas satisfaite. Les pénalités permettent aux contraintes d'être pondérées par l'ordre d'importance. Par exemple, manquer une échéance pour un client est un souci plus important que dépasser la taille de l'entrepôt. L'objectif d'un décideur peut être l'un ou la combinaison de ce qui suit : maximiser les profits ou les marges, minimiser les coûts de la chaîne logistique ou les temps de cycle ,maximiser le service du client, minimiser les retards, maximiser le débit de production et satisfaire toutes les demandes du client.

4. Fonctionnalité de la méthode

Nous présenterons en détail la fonctionnalité de cette approche et quelques résultats expérimentaux. Pour examiner notre approche, un prototype est développé. Pour produire un modèle optimal d'une chaîne logistique à un problème particulier, notre système d'optimisation à base de simulation utilise une configuration initiale de la chaîne logistique avec un ensemble de règles pour régir la sélection des modèles possibles (les solutions possibles de la configuration de la chaîne logistique).

Ces configurations et l'ensemble des règles sont introduites en remplissant différents modèles définis. Pour une meilleure compréhension, nous proposons des concepts formels (classes) pour représenter ces modèles. Ainsi, un modèle de chaîne logistique est une configuration composée d'un ensemble de concepts définis. Sa description formelle est comme suit :

$$\left\langle \text{SCM} \left| \begin{array}{l} \text{jobSet}, \\ \text{resSet}, \\ \text{prodCenterSet}, \\ \text{distCenterSet}, \\ \text{retailerSet} \end{array} \right. \right\rangle$$

Le premier composant (concept) dans la configuration est l'ensemble des tâches (*jobSet*). Les éléments de cet ensemble sont les jobs(*J*), où le concept est défini par un ensemble d'opérations qui devraient toutes être exécutées dans un ordre par les ressources (au moins une ressource) pour réaliser ce job (tâche).

Ce job va utiliser un ensemble de matières premières ou de produits semi-finis (produits bruts) pour produire un ensemble de produits finis. Sa représentation formelle est la suivante : $\langle \text{Job} | \text{opSet}, \text{iPSet}, \text{oPSet} \rangle$, où *opSet* est l'ensemble d'opérations définies d'un job (un job peut être composé d'une seule opération), *iPSet* est l'ensemble des produits non finis\matières employées par le job pour fabriquer les produits *oPSet*.

Le deuxième élément dans la configuration du modèle de la chaîne logistique est l'ensemble de ressources (*resSet*). Une ressource est caractérisée par les opérations qui peuvent s'exécuter avec des durées de traitement spécifiques et son coût d'une unité de durée de

traitement. Formellement, elle est décrite par $\langle Res|opSet, cuPt \rangle$, où $opSet$ est l'ensemble d'opérations qui peuvent être exécutées par cette ressource, il peut être spécifié comme $\{op_1(pt_1), \dots, op_n(pt_n)\} : opSet, n \in N, n \geq 1$ où $cuPt$ est le coût d'une unité de temps d'exécution sur cette ressource. Ainsi, le coût de l'exécution d'une opération $op_i(pt_i)$ est $pt_i * cuPt$.

Une ressource peut être une ressource de fabrication comme les machines qui peuvent réaliser les différentes opérations avec des durées de traitement pour réaliser des produits variés à partir des matières premières ou des produits non finis.

Une ressource peut être aussi une ressource de stockage comme les entrepôts ; ses opérations dans ce cas sont seulement le stockage et l'alimentation. Ces ressources stockent le produit sans changement (opération d'entreposage) pendant une période de temps.

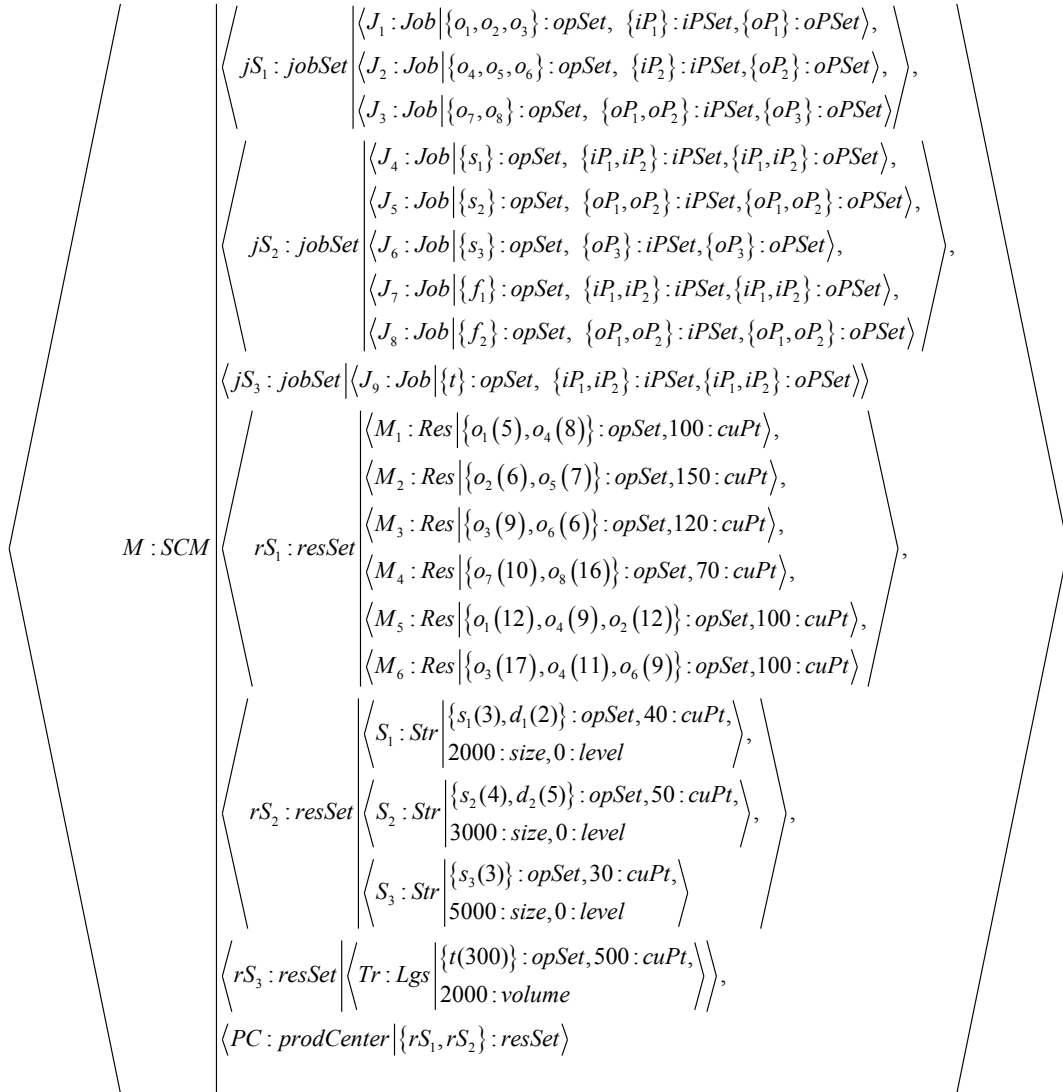
Une ressource de stockage a également d'autres caractéristiques supplémentaires qui sont utilisées pour mesurer la métrique de niveau d'inventaire et elles peuvent être employées comme des contraintes de ressource. Leurs caractéristiques sont la taille (capacité) et le niveau actuel. Donc, une ressource de stockage sera décrite comme $\langle Str|[Res], size, level \rangle$. Cette notation signifie que la ressource de stockage est une ressource avec les membres de données supplémentaires (*size* et *level*).

Il y a également des ressources logistiques comme les camions, dont sa fonction est le transport d'un site à d'autres sites de la chaîne logistique. Ce transport a également un temps d'exécution et un coût, mais sans changer le produit brut. Ses spécifications formelles sont $\langle Lgs|[Res], volume \rangle$.

Si le temps de transport est T , le coût unitaire est C et le volume transporté est V alors le coût total est $T * C * V$. Il y a également des ressources humaines comme les ressources scientifiques et techniques et des ressources financières comme le fonds de roulement. Les ressources précédentes peuvent réaliser différentes opérations.

Certaines ressources peuvent être situées dans les différents centres de production, centres de distribution et/ou centres des détaillants. D'autres ressources (par exemple, les ressources de transport) sont indépendantes, elles sont employées pour établir des connexions entre ces centres à d'autres sites de la chaîne logistique comme les fournisseurs.

Les centres de production, de distribution, et de détaillant sont décrits respectivement par les concepts $\langle prodCenter | resSet \rangle$, $\langle distCenter | resSet \rangle$, $\langle retailer | resSet \rangle$. Ce qui suit est une configuration d'un exemple d'un modèle d'une chaîne logistique.



Cette configuration d'un modèle simple d'une chaîne logistique peut être présentée à notre système, qui contient trois ensembles de jobs, trois ensembles de ressources et un centre de production.

Les trois premiers jobs (J_1, J_2, J_3) sont pour la production à partir des produits bruts. iP_1 et iP_2 sont les produits bruts externes, oP_1 et oP_2 des produits bruts internes et oP_3 le produit manufacturé.

Les trois jobs suivants (J_4, J_5, J_6) pour le stockage dans les entrepôts, suivi par deux jobs (J_7, J_8) pour alimenter les entrepôts et le dernier job (J_9) pour le transport. Il y a des ressources

pour la production, pour le stockage et une ressource pour le transport. Un centre de production se compose des ressources de production et de stockage.

Une matière première peut être obtenue auprès d'un fournisseur externe pour être livrée à un autre fournisseur ou à un centre de production. Une configuration des matières premières $\langle rawProducts | \rangle$ est représentée par un ensemble de concepts, représentant chacun un produit brut comme suit.

$$\langle rProduct | Srce, Tg, Qt, uCost, qDegree, delDate \rangle$$

Ces spécifications formelles décrivent l'approvisionnement d'une matière première.

- *Srce* identifie un fournisseur du produit brut.
- *Tg* destination du produit brut qui est soit un autre fournisseur ou un centre de production, d'ici nous avons un réseau de fournisseurs de matières premières.
- *Qt* quantité (nombre d'unités) du produit brut exigé.
- *uCost* est le coût unitaire de la matière première.
- *qDegree* degré de qualité du produit brut obtenu à trois valeurs : *good*, *middle* et *poor*.

Chaque matière première à une date de livraison (*delDate*) fixée après négociation. Ce qui suit est la description de l'approvisionnement des produits bruts iP_1 et iP_2 avec trois degrés de qualité et différents coûts unitaires.

$$\left\langle rP : rawProducts \left| \begin{array}{l} \langle iP_1 : rProd | S_1 : Srce, PC : Tg, 2000 : Qt, 800 : uCost, good : qDegree, 20 days : delDate \rangle, \\ \langle iP_1 : rProd | S_2 : Srce, PC : Tg, 2000 : Qt, 700 : uCost, middle : qDegree, 15 days : delDate \rangle, \\ \langle iP_1 : rProd | S_3 : Srce, PC : Tg, 2000 : Qt, 500 : uCost, poor : qDegree, 10 days : delDate \rangle, \\ \langle iP_2 : rProd | S_1 : Srce, PC : Tg, 3000 : Qt, 900 : uCost, good : qDegree, 25 days : delDate \rangle, \\ \langle iP_2 : rProd | S_2 : Srce, PC : Tg, 3000 : Qt, 700 : uCost, middle : qDegree, 20 days : delDate \rangle, \\ \langle iP_2 : rProd | S_3 : Srce, PC : Tg, 3000 : Qt, 600 : uCost, poor : qDegree, 15 days : delDate \rangle \end{array} \right. \right\rangle$$

Le modèle d'une chaîne logistique est conduit par la demande d'où le point de départ de la structuration du modèle de la chaîne logistique (planification) est la demande disponible et prévue des clients.

L'étape entre les prévisions pures de la demande et leur planification est faite en ajoutant aux prévisions formelles de la demande leurs influences exceptionnelles et leur impact sur les ventes.

Ces événements peuvent être commandés par les membres de la chaîne logistique elle-même (comme des promotions) ou faire l'objet d'actions de concurrent (comme l'introduction d'un nouveau produit en tant qu'exigences prévues).

Une configuration $\langle clientOrders | \rangle$ des demandes de client pour acheter un ensemble de produits est décrite par un ensemble de concepts, représentant chacun une demande de client comme suit.

$$\langle clientOrder | Item, Quantity, wdelDate \rangle$$

Ces spécifications formelles décrivent la demande du client pour acheter un produit, décrit par le concept *Item* avec une quantité spécifique *Quantity* et un intervalle de temps de livraison *wdelDate*, sa première valeur est la contrainte temporelle souhaitée et sa deuxième valeur est la contrainte temporelle impérative. Ce qui suit est un exemple simple pour une demande.

$$\left\langle orders : clientOrders \left| \begin{array}{l} \langle order_1 : clientOrder | oP_3 : Item, 1000 : Quantity, 30 : 45 days : wdelDate \rangle, \\ \langle order_2 : clientOrder | oP_3 : Item, 500 : Quantity, 45 : 60 days : wdelDate \rangle \end{array} \right. \right\rangle$$

Après l'introduction d'information sur le modèle de la chaîne logistique, les produits bruts et les demandes du client, le module de décision construira des alternatives génériques initiales (solutions) pour la simulation et l'optimisation de l'ordonnancement pour rechercher la solution globale optimale au niveau opérationnel en utilisant les décisions stratégiques et tactiques.

Les décisions stratégiques et tactiques peuvent être prises sur des règles de décision définies, qui peuvent être guidées par l'information optimale d'un modèle d'optimisation décrivant le problème avec les contraintes au niveau tactique. Une règle de décision à la forme :

$$Condition_1(a_1) \wedge Condition_2(a_2) \wedge \dots \quad 'ition_n(a_n) \Rightarrow Decision .$$

Une condition est un prédicat qui sera vrai si les arguments/métriques sont évalués à vrai. Un intervalle de modèle stratégique de plusieurs années peut être prévu lors de la conception de la structure d'une chaîne logistique. Ici l'emplacement des centres de production, les entrepôts, et les zones géographiques de client à servir sont déjà choisis. En outre, la capacité des équipements ainsi que les moyens de transport (bateaux, camions. etc.) sont décidés au moment.

Les règles de décision peuvent aider à concevoir la structure de la chaîne logistique par exemple, quand les métriques concernant les décisions stratégiques sont évaluées pendant la simulation pour réorganiser la structure de la chaîne logistique.

Le modèle d'optimisation tactique sera produit pour prendre des décisions de la même nature et il peut être formulé comme suit.

A partir des informations présentées sur la chaîne logistique, tel que l'ensemble de produits (des produits bruts ou des produits manufacturés), l'ensemble de ressources (fabrication, entreposage et transport) et d'un horizon de planification qui est subdivisé à des intervalles de temps (jours, semaines, mois, etc.).

La planification tactique emploie la structure stratégique du modèle de la chaîne logistique pour rechercher la manière la plus efficace (optimale) pour satisfaire les demandes pendant un intervalle de planification à moyen terme, qui couvre souvent un cycle saisonnier complet. La planification tactique non seulement équilibre les prévisions de la demande avec les capacités disponibles mais affecte également les demandes (quantités de production) aux centres de production afin d'éviter les goulots d'étranglement.

Dans sa forme la plus simple, l'objectif de la planification tactique est de déterminer les volumes de production pour chaque produit au cours d'un ensemble de périodes $T = \{1, \dots, \dots\}$ (dans notre exemple, chaque période égalant un jour selon les demandes de client) inclus dans l'horizon de planification à moyen terme de façon à satisfaire les limites des données des demandes et la capacité pour différentes ressources et minimiser le coût total, défini comme la somme des coûts de production et des coûts de stockage. Pour plus de détails, si la structure proposée de la chaîne logistique définie comme ci-dessus de N_p produits (dans notre exemple, 3 produits), de N_r ressources (5 ressources), N_{pc} centres de production (un centre de production) et N_w centres d'entrepôt (une entrepôt). Nous considérons donc les variables de décision comme suit.

- P_{it} est le nombre d'unités du produit $i \in \{1, \dots, \dots\}$ qui sera fabriqué en période $t \in T$
- I_{it} est le nombre d'unités de produit i en stock à la fin de la période t .

- d_{it} est la demande du produit i dans la période t tel qu'indiquée dans les demandes de client.
- c_{it} est le coût de fabrication d'unité pour le produit i dans la période t .
- h_{it} est le coût d'unité d'inventaire pour le produit i dans la période t .
- b_{rt} est la quantité de ressource r disponible dans la période t .
- e_{ir} est la quantité de ressource r absorbée pour fabriquer une unité de produit i ,
- B_{it} les unités de demande du produit i retardé dans la période t .
- g_{it} est le coût unitaire de retard d'une demande du produit i dans la période t .
- a_{ij} les unités du produit i directement requis par une unité de produit j ,
- x_{mn} est l'unité du produit à transporter de m à n ,
- c_{mn} est le coût de transport encourue par l'envoi d'une unité de produit du centre de production $m \in \{1, \dots, N_p\}$ à l'entrepôt $n \in \{1, \dots, N_e\}$.
- S_m est la disponibilité maximum de produit destiné au centre de production m .
- d_n chaque entrepôt n à une demande d_n .

Le rôle du modèle mathématique dans le problème d'optimisation tactique tel que formulé ci-dessous est de décider des quantités optimales de produits à fabriquer ou de l'approvisionnement des matières premières et les niveaux de stocks, en plus de la quantité optimale de ressources et de logistique déployées. Ces valeurs des variables de décision incertaines seront employées pour formuler le problème d'optimisation d'ordonnancement et le modèle de simulation pour les décisions opérationnelles.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in \{1, \dots, N_p\}} (c_{it} \times P_{it} + h_{it} \times I_{it} + g_{it} B_{it}) \quad (1)$$

$$\min \sum_{m \in \{1, \dots, N_p\}} c_{mn} \times x_{mn} \quad (2)$$

$$P_{it} + I_{i,t-1} - I_{it} + B_{it} - B_{i,t-1} = d_{it} + \sum_{j \in I, j \neq i} a_{ij} P_{jt}, \quad i \in \{1, \dots, N_p\}, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \{1, \dots, N_p\}} e_{ir} P_{it} \leq b_{rt}, \quad r \in R, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{n \in \{1, \dots, N_e\}} x_{mn} \leq S_m, \quad m \in \{1, \dots, N_p\} \quad (5)$$

$$\sum_{m \in \{1, \dots, M\}} x_{mn} \geq d_n, \quad n \in \{1, \dots, N\} \quad (6)$$

$$P_{it}, I_{it}, B_{it}, x_{mn} \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, I\}, \quad \dots \quad (7)$$

La contrainte (3) exprime les conditions d'équilibrage entre la production, l'inventaire, les demandes précédente retardée, courante et interne générée, en établissant une connexion entre les périodes successives le long de l'horizon de planification. L'inégalité de (4) limite la capacité absorbée pour ne pas dépasser la capacité disponible de chaque ressource pour chaque période.

La contrainte (5) s'assure que la disponibilité à chaque centre de production ne soit dépassée, tandis que la contrainte (6) établit que la demande de chaque entrepôt soit satisfaite.

Tandis que la planification tactique coordonne les flux entre les fournisseurs, les centres de production, de distribution et les détaillants/clients, la planification opérationnelle et l'ordonnancement détaillé sont exécutés au sein de chaque centre en fonction des directives de la planification tactique.

Au niveau opérationnel, les décisions comme le job design devraient être prises après la désagrégation des types de produit ou des familles de produits dans des items en utilisant aussi bien les demandes de client, que la planification tactique, la planification opérationnelle à court terme (de production) et l'ordonnancement détaillé pour fournir des directives sur les quantités d'approvisionnement et prévoir les matières premières nécessaires.

Ainsi, au niveau opérationnel, le modèle de simulation décrit le comportement de ressources sélectionnées pour exécuter les différents jobs appropriés en utilisant l'ordonnancement optimal proposé par le modèle d'optimisation d'ordonnancement opérationnel. L'objectif de la simulation est de montrer la performance globale comme tout le temps d'inactivité de chaque ressource décidée pour être employé dans la production, les niveaux d'inventaire, etc. La chaîne logistique au niveau opérationnel est expliquée en détail dans la prochaine section.

5. Ordonnement par l'approche proposée

L'objectif de notre travail est de rechercher à une optimisation globale, en optimisant les ressources et leur organisation au niveau stratégique, déterminer les volumes de production pour chaque produit au niveau tactique et de l'optimisation et le contrôle de l'ordonnement au niveau opérationnel.

A l'intérieur de chaque centre de production on a donc un problème d'ordonnement avec comme des fonctions d'objectif de minimiser la somme des retards par rapport aux délais négociés et de minimiser la date de fin d'ordonnement (makespan) donc de maximiser la productivité.

Pratiquement, le rôle de la planification au niveau tactique est de déterminer le nombre d'unités pour chaque produit à fabriquer pour chaque moment de production (liée au demande de client). Ces informations représentent l'entrée pour la planification au niveau opérationnel (Ordonnement des ateliers). L'ordonnement consiste donc à affecter n tâches sur un ensemble de m machines disponibles. Chaque machine exécute au maximum une tâche simultanément et chaque tâche ne peut pas être exécutée par plus d'une machine à un instant donné.

On considère que le centre de production est organisé en atelier de type m machines identiques en parallèle, les dates de disponibilité sont parvenues par les fournisseurs, les dates de livraison sont données par les demandes des clients et le temps d'exécution pour chaque tâche est donné de la planification au niveau tactique. Dans notre problème, la préemption n'est pas autorisée, c'est-à-dire que chaque tâche j s'exécute durant p_j unités de temps consécutives sur la même machine. Après les études des modèles mathématiques, les données du problème et le modèle qui s'expriment de la manière suivante :

- n : le nombre de tâches
- m : le nombre de machines
- j : l'indice de la tâche, où $j=1, \dots, n$
- k : l'indice de la machine, où $k=1, \dots, m$
- r : la position de la tâche dans une machine, où $r=1, \dots, nk$
- rjk : date de début au plus (dans notre travail égal à zéro)

- d_{jk} : date de fin au plus tard de la tâche j (selon les demandes de clients)
- s_{ij} : temps de préparation de la tâche j effectuée immédiatement après la tâche i sur une machine
- p_{jk} : temps opératoire de la tâche j (les unités doit fabriquer * temps opératoire de tache sur la machine)
- C_{jk} : date de fin d'exécution de la tâche j
- T_{jk} : retard réel de la tâche j
- C_{max} : makespan
- nk : nombre de tâches affectées à la machine k

$$\text{Minimiser}(C_{max}, \sum T) \quad (1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^n X_{jkr} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^{nk} X_{jkr} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$P_{[kr]} = \sum_{j=1}^n X_{jkr} p_{jk} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (4)$$

$$S_{[kr]} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{jkr} Y_{ij} s_{ij} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (5)$$

$$r_{[kr]} = \sum_{j=1}^n X_{jkr} r_{jk} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (6)$$

$$d_{[kr]} = \sum_{j=1}^n X_{jkr} d_{jk} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (7)$$

$$C_{[kr]} = \max(C_{[k,r-1]} + S_{[kr]}, r_{[kr]}) + P_{[kr]} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (8)$$

$$T_{[kr]} = \max(C_{[kr]} - d_{[kr]}, 0) \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (9)$$

$$C_{max} = \max_{k=1,2,\dots,m} \max_{r=1,2,\dots,nk} C_{[kr]} \quad (10)$$

$$\sum T_{jk} = \sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^{nk} T_{[kr]} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad (11)$$

$$X_{jkr} = 0 \text{ or } 1 \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,nk \quad j=1,2,\dots,n \quad (12)$$

$$Y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,n \quad (13)$$

La fonction (1) exprime directement les objectifs de notre problème, i.e., la minimisation du makespan et la minimisation de la somme des retards.

Les contraintes (2) et (3) sont des contraintes d'unicité des tâches sur la machine k et à la position r . Elles assurent qu'il y a seulement une tâche sur la machine k et à la position r , et que chaque tâche est affectée seulement une fois sur ces machines.

La contrainte (4) calcule la durée d'opération de la tâche qui est en position r sur la machine k . La contrainte (5) définit le temps de préparation de la tâche qui est en position r sur la machine k .

Les contraintes (6) - (9) concernent respectivement la date de début au plus tôt, la date de fin au plus tard, la date de fin d'exécution et le retard réel de la tâche qui est en position r sur la machine k .

Les contraintes (10) et (11) représentent le calcul du makespan et de la somme des retards. La variable binaire X_{jkr} est égale à 1, si la tâche j est ordonnée en position r sur la machine k et 0 sinon. La variable binaire Y_{ij} contrôle la position relative de deux tâches i et j . Si la tâche i précède immédiatement la tâche j , alors Y_{ij} est égale à 1, sinon elle est égale à 0. Par contre, si j est la première tâche ($j=1$), alors Y_{ij} est égale à 1, car aucune tâche ne précède j .

Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au problème d'optimisation sur les chaînes logistiques. Nous avons présenté quelques travaux de recherche utilisant l'approche d'optimisation basée sur la simulation pour l'étude des systèmes complexes et plus particulièrement les chaînes logistiques.

Nous avons présenté dans ce chapitre la méthode de résolution que nous avons développée pour le problème de notre travail. Nous avons combiné l'utilisation de méthode d'optimisation et méthode de simulation. Nous avons décrit le schéma global de la solution et sa

fonctionnalité. Dans ce qui suit nous proposons les outils nécessaires à la mise en œuvre de notre approche dont les résultats sont publiés dans [10].

Chapitre 3

Algorithmes génétiques et optimisation multicritères

Introduction

Le présent chapitre est dédié à la description de l'approche d'optimisation basée sur la simulation, développée dans le cadre de cette thèse. En particulier, nous avons présenté en détail l'algorithme d'optimisation. Les principes de base de l'optimisation multicritères, les principaux algorithmes génétiques multicritères et une description plus détaillée de l'algorithme génétique implémenté est donnée dans ce chapitre.

1. Algorithmes génétiques multicritères

Cette section rappelle les principes de base des algorithmes génétiques multicritères (MOGA) qui constituent le moteur d'optimisation de l'approche développée dans cette thèse.

1.1 Principes de base des algorithmes génétiques

Les Algorithmes Génétiques (AG) ont connu un succès grandissant dans les domaines de la recherche opérationnelle ces dernières années. Ils sont utilisés dans la résolution des problèmes d'optimisation complexes.

A travers une transposition artificielle des concepts de base de la génétique et des lois de survie énoncés par Darwin, les AGs tentent de simuler le processus d'évolution des espèces dans leur milieu naturel. Ces AGs furent développés par J.Holland [35], puis leurs fondements furent exposés par Goldberg.

La génétique représente un individu identifié par un ensemble de données (chromosomes). La naissance d'un individu enfant, est obtenue à partir d'un mélange aléatoire de chromosomes de deux individus, lui conférant une empreinte génétique héritée des parents.

L'évolution normale d'une espèce, d'une génération à l'autre, est alors une simple recombinaison obtenue par croisement aléatoire des chromosomes d'individus appariés. La mutation génétique est caractérisée dans le code génétique de l'enfant par l'apparition de nouveaux gènes inexistants chez les parents. Les changements dans la morphologie des espèces sont expliqués par l'apparition de " mutants " ce qui est un phénomène exceptionnel et ceci pour être mieux adapter au milieu naturel.

Les individus les mieux adaptés auront une longévité suffisante pour générer une descendance, d'après " les lois de survie " et une sélection naturelle se fait. Ce qui peut conduire à la disparition des espèces les moins adaptés et à la survie des espèces les plus fortes et les plus résistantes.

Un algorithme génétique idem que le phénomène génétique. Une population de taille N , constituée de N individus (marquées correctement par un code les identifiant) donne N solutions pour un problème d'optimisation. La force de chaque individu est déterminée par une procédure d'évaluation. Viennent ensuite une phase de sélection (en sélectionnant les meilleurs individus qui ont plus de chance de demeurer dans la nouvelle population), une phase de recombinaison (opérateurs artificiels de croisement) et enfin une phase de mutation . Ces trois phases permettent de générer une nouvelle population d'individus, qui ont de bonnes chances d'être plus forts que ceux de la génération précédente.

La qualité des individus de la population augmente de génération en génération et après un certain nombre d'itérations. Ces individus constituent une population forte et représentent des solutions quasi - optimales à tout problème posé.

Les concepts de bases d'un AG sont alors comme suit :

- Individu: Une structure fondamentale permettant le codage d'une solution candidate du problème.
- Population: Un ensemble d'individus d'une même génération.
- Fitness: Un indicateur qui calcule la valeur de la fonction de cout pour chaque individu.

- Sélection: le choix des éléments les plus adaptés pour la formation de la nouvelle génération.
- Croisement et mutation: phase de reproduction, dans laquelle une nouvelle population est construite à partir des individus sélectionnés, via des opérateurs de croisement et de mutation.

Les phases suivantes représentent le fonctionnement d'un A.G.

1. **Initialisation** : une population initiale de taille N chromosomes est tirée aléatoirement.
2. **Evaluation** : chaque chromosome est décodé puis évalué.
3. **Reproduction**: création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.
4. **Opérateurs génétiques**: croisement et mutation de certains chromosomes au sein de la nouvelle population.
5. **Retour** à la phase 2 tant que la condition d'arrêt du problème n'est pas satisfaite.

Afin d'obtenir des solutions de qualité, les opérations AG sont exécutées plusieurs fois. La description de ces opérations est présentée dans les sous-sections suivantes :

1.2 Codage et population initiale

En premier lieu, le codage est la représentation des différents états possibles de la variable pour obtenir une forme utilisable de l'AG permettant une connexion entre la valeur obtenue et les individus de la population, imitant ainsi la transcription génotype –phénotype de la biologie.

Il existe principalement trois types de codage :

- Le codage binaire.
- Le codage réel.
- Le codage en base n.

1.2.a Le Codage binaire :

Longtemps, les algorithmes génétiques ont utilisé un codage binaire. Dans ce cas, les éléments de l'ensemble des individus, sur lesquels est menée l'optimisation, sont codés par des chaînes de bits [67].

Quelques avantages de ce codage :

- Nombre minimum d'alphabet $\{0,1\}$..
Simplification de l'utilisation des opérateurs de croisement et de mutation.
- Existence de fondements théoriques (théorie sur les schémas).

Quelques inconvénients de ce codage :

- Pour les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique, les AG basés sur les chaînes binaires ont démontré leurs faibles performances.
- Le codage binaire peut comprendre une grande distance de Hamming entre deux nombres voisins ce qui crée bien souvent une convergence et non pas l'obtention de la valeur optimale.

1.2.b Codage réel

Il est simple, chaque chromosome est composé par les paramètres du processus d'optimisation qui forment un vecteur. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables. Evitant l'étape de transcodage (du binaire vers le réel), le processus d'évaluation dans ce contexte est plus rapide.

1.3 La fonction d'évaluation

La fitness (fonction d'évaluation) évaluera l'efficacité des individus et permettra la sélection des candidats aptes à la reproduction. Trois opérateurs primaires feront évoluer la population

- La sélection.
- Le croisement.
- La mutation.

Employés dans cet ordre, ils créeront une nouvelle population d'individus.

1.4 Opérateur de sélection

Cet opérateur permet la survie, la reproduction ou la mort aux individus d'une population et sélectionne les parents reproducteurs parmi tous les individus. Les individus sélectionnés répondent au mieux au problème étudié et ayant une fitness au-dessus de la moyenne, le reste des individus sera pénalisé par cette sélection. La sélection par roulette biaisée (roulette wheel selection) de Goldberg est la plus utilisée des méthodes de reproduction connues.

A partir de cette méthode, chaque chromosome sera copié dans une nouvelle population proportionnellement à sa fitness. On effectue en quelque sorte, autant de tirages avec remise que d'éléments existant dans la population. Ainsi pour un chromosome particulier chi de fitness $f(chi)$, la probabilité de sa sélection dans la nouvelle population de taille N est :

$$p(chi) = \frac{f(chi)}{\sum_{j=1}^N f(chj)}$$

Une grande fitness des individus leur offre une chance d'être sélectionné. On parle alors de sélection proportionnelle. Cette reproduction a des inconvénients, comme :

- Favoriser la dominance d'un individu qui n'est pas forcément le meilleur.
- Perte de diversité par la dominance d'un super-individu.

Le tournoi (*tournament selection*) est l'une des méthodes les plus connues. Il choisit entre deux individus sélectionnés au hasard l'individu le plus important et le reproduit dans une

nouvelle population. La même opération sera répétée jusqu'à avoir une population complète. On obtient de bons résultats avec cette méthode.

Aussi importante soit elle la phase de sélection ne produit pas de nouveaux individus car ce rôle appartient aux opérateurs de croisement et de mutation.

1.5 Opérateur de croisement

La création de nouveaux individus est faite par l'opérateur de croisement, selon un processus fort simple. Un échange d'information se fait par le biais d'une combinaison entre les chromosomes après avoir été sélectionnés.

D'abord, un couple d'individus est tiré de la nouvelle population elle-même issue de la reproduction. Ensuite un ou plusieurs sites de croisement sont choisis au hasard. (chiffre entre 1 et $l - 1$ ou l est la longueur de la chaîne binaire).

Enfin, le croisement se fait selon une probabilité pc (entre 0,5 et 0,9). On garde, sans changement, les sous-chaînes contenant les bits compris entre 1 et p , et on échange les sous-chaînes contenant les bits compris entre $p + 1$ et l .

Le croisement à un site est illustré par la figure suivante

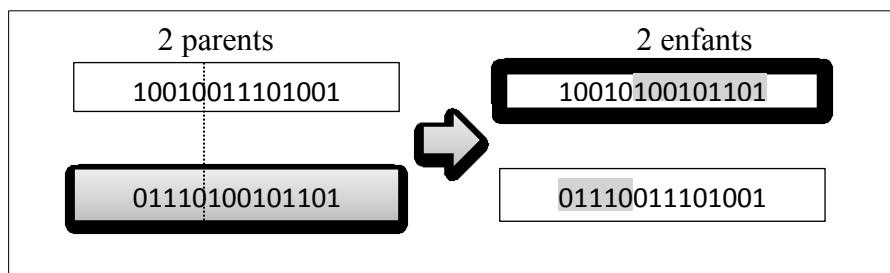


Figure 3.1 : Croisement à un site [48].

Parmi les méthodes de croisement les plus utilisées on peut souligner deux opérateurs: le croisement à un point et le croisement multipoints

Croisement à un point : Pour chaque couple de chromosomes, on choisit aléatoirement un point de croisement et à partir duquel, on échange les ensembles d'allèles entre les deux parents.(comme indiqué dans la figure 3.1)

Croisement multipoints : Dans ce cas, on sélectionne plusieurs points de croisement et on échange les différentes parties d'allèles entourées par ces points entre les parents,.

La figure 3.2 montre un croisement à deux points.

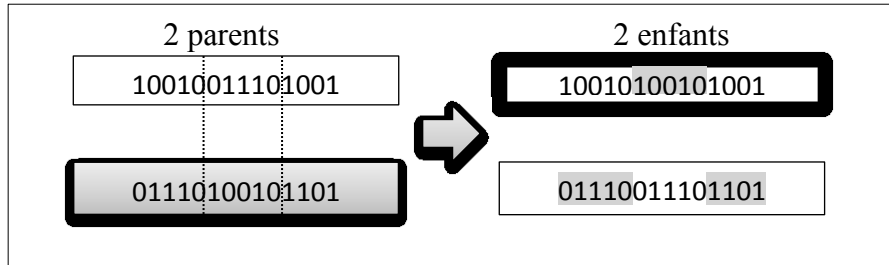


Figure 3.2 : Exemple de croisements à deux points [48]

1.6 Mutation

Une mutation est faite sur les individus de la population née du processus de croisement. Les chromosomes des fils biologiques, de cette mutation, sont distincts des chromosomes des parents biologiques. Le rôle de l'opérateur est de modifier la valeur d'un gène dans un chromosome. Cette mutation interdit l'évolution de se figer et assure l'optimum global.

La figure 3.3 est un aperçu de mutation appliquée sur un chromosome binaire à la position 9.

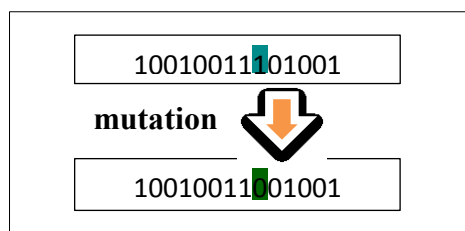


Figure 3.3 : Exemple de mutation [48].

La mutation évite la dégénérescence de la population, car cet opérateur évite une convergence prématurée vers les optimums locaux. Il est appliqué avec une probabilité fixée, pm. Le taux de mutation rend la recherche trop aléatoire s'il est trop élevé. Par ailleurs, s'il est trop faible, la recherche risque de stagner.

Il existe d'autres façons d'effectuer des mutations :

- La transposition de deux allèles consécutifs,
- La transposition d'allèles dans un chromosome,
- L'inversion de l'ordre des allèles présents entre deux couples [67].

Selon le principe de l'auto-adaptation, où chaque variable est soumise au processus d'évolution, on peut associer, à chaque gène, une probabilité de mutation différente où l'individu a ainsi un deuxième chromosome codant ces probabilités.

Souvent, l'opérateur exploite les individus non parcourus par le croisement : Si, la solution optimale doit avoir la valeur 1 à la position 9 du chromosome, bien que dans la population initiale tous les individus ont 0 dans cette position, dans ce cas l'opérateur de croisement ne pourra jamais explorer cette solution.

1.7 Autres paramètres

La réussite ou l'échec d'un algorithme génétique est influencée par certains paramètres fixés à l'avance. Ces paramètres sont les suivants :

- La grandeur de la population : Si N est trop grand, le temps de calcul de l'algorithme peut s'avérer très important, si par contre N est trop petit, il peut converger trop rapidement vers un mauvais chromosome.
- La longueur du codage de chaque individu l .
- La probabilité de croisement pc , Le choix de cette probabilité est généralement heuristique. Elle découle de la forme de la fonction d'objectif, plus elle est élevée, plus sa population connaît des changements importants. Ses valeurs généralement acceptées sont comprises entre 0.5 et 0.9.
- La probabilité de mutation pm , est habituellement faible étant donné qu'un taux élevé peut conduire à une solution sous-optimale.

2 Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les AGs s'adaptent facilement à n'importe quel espace de recherche. Ils demandent une mesure de la qualité de la solution, une définition de l'espace par un codage et des opérateurs qui leur permettent de le parcourir efficacement.

Le principal avantage des AGs par rapport aux autres techniques d'optimisation consiste en :

- Il n'est pas nécessaire de connaître les particularités de la solution du problème pour parvenir à un résultat, mais seulement de déterminer les informations relatives au fitness.
- L'exploration de l'espace de recherche, basée sur des paramètres aléatoires, grâce à une recherche parallèle.
- En utilisant un codage combinatoire afin d'optimiser plusieurs variables de décision en même temps ce qui permettra d'aborder l'aspect multidimensionnel.
- Les AGs, à l'inverse des méthodes déterministes, recherchent d'une population de solutions à l'autre, plutôt que d'une solution à l'autre.
- Pouvoir exploiter les meilleures solutions disponibles au moment donnée.

Néanmoins, Comme tous les algorithmes d'optimisation, ces algorithmes ont aussi des inconvénients parmi lesquels :

- Les spécificités du problème (taille de la population, probabilités de croisement et de mutation, nombre de générations, etc.) imposent les codages et les opérateurs les plus adéquats.
- Les AGs par leur nature sont consommateurs de temps de calcul. Ce qui, propose l'approche d'utilisation de la simulation pour l'évaluation des indicateurs de performance de la solution candidate. En conséquence, l'efficacité est encore plus importante. Pour cela, nous avons proposé un modèle bien intégré permettant une simulation non seulement complète mais aussi efficace.
- Il faut aussi noter l'impossibilité de certifier, même après un nombre important de générations, que le fonctionnement d'un tel algorithme ne garantit nullement la

réussite. On peut uniquement garantir que la solution obtenue est proche de la solution optimale.

- Il se peut que certains individus occupent une place importante au sein d'une population peuvent devenir majoritaires dans des populations futures [67].

Ces algorithmes n'en sont pas moins extrêmement performants, leur utilisation se développe dans des domaines aussi divers, comme l'optimisation des fonctions numériques difficiles avec souvent des variables discontinues, l'optimisation lors de la conception et le contrôle des systèmes industriels, l'optimisation d'emplois du temps, etc.

Ils peuvent être utilisés avec succès dans le contrôle des systèmes complexes et dynamiques comme les chaînes logistiques. D'autre part, on peut utiliser les algorithmes génétiques dans la détermination des paramètres de systèmes grâce uniquement à des mesures expérimentales.

3 L'optimisation multicritères

L'optimisation multicritères est destinée aux problèmes de prise de décision que l'on rencontre à tous les échelles de gestion, qui ont des critères multiples et qui peuvent être en conflit. Par exemple, un nouveau processus de production peut être adopté pour l'amélioration des délais de livraison, la qualité des produits et la réduction des coûts.

Ces décisions de nature complexe et ayant des conséquences graves sont dûes à l'aspect conflictuel des critères, au manque et parfois à l'absence d'informations. On doit suivre plusieurs phases pour arriver à résoudre un problème multicritères qui peuvent être considérés, comme suit :

- L'identification des critères d'optimisation.
- L'élaboration d'une solution en essayant d'exploiter les données disponibles.
- Enfin, une ou plusieurs solutions optimales seront disponibles selon la méthode adoptée.

Plusieurs fonctions d'objectif ($n \geq 2$) sont posées dans un problème d'optimisation multi-objectifs. Chaque fonction peut avoir un optimum différent. On doit arriver à de « bons compromis » plutôt qu'à une solution unique. Les notions de dominance et d'optimalité de Pareto remplace la notion d'optimum.

La dominance: une solution A domine une solution B pour un problème de minimisation si et seulement si:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(A) \leq f_i(B)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, n\} : f_j(A) < f_j(B)$$

On dit que B est dominée par A ou entre les deux solutions, A est la solution non dominée.

Pareto optimum:

Le mathématicien italien Vilfredo Pareto au XIX^{ème} siècle, a formulé un autre concept du problème multi objectif appelé plus tard optimum de Pareto. Selon lui, il y a un équilibre entre les critères du problème multi objectif qui empêche d'améliorer d'un d'eux sans détériorer au moins un des autres critères. Un point x est appelé Pareto-optimal lorsque aucun autre point de l'espace de recherche X ne le domine, ces points sont également appelés solutions *non inférieures* ou *non dominées*.

L'optimisation multi objectifs, est le résultat d'un ensemble de solutions optimales et non d'un solution unique. Toute solution de cet ensemble elle-même optimale, à tel point qu'il est impossible d'améliorer les performances d'un critère sans dégrader les performances d'au moins un autre critère.

On appelle front de Pareto la représentation des solutions non dominées dans l'espace d'objectif. La figure 1.7 montre un exemple de front de Pareto pour un problème de minimisation à deux objectifs. L'ensemble de points blancs représentent le front de Pareto.

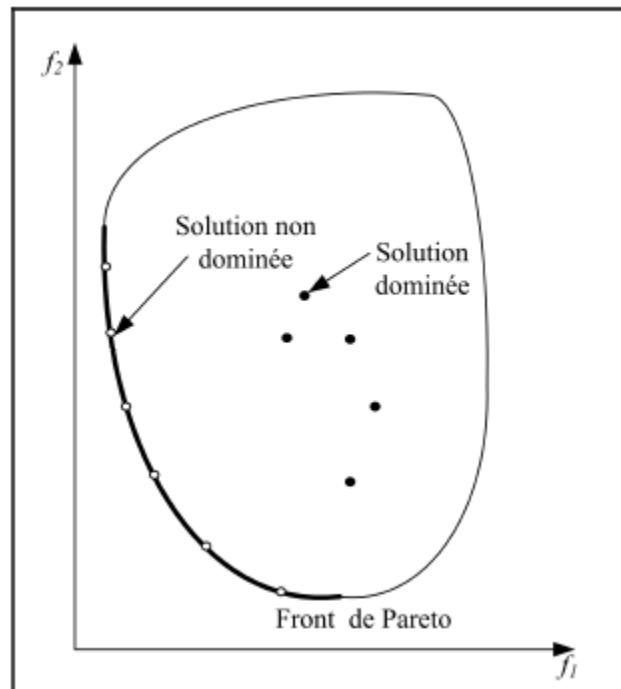


Figure 3.4 : Front de Pareto[27]

pour la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs, un bon réglage des paramètres des algorithmes génétiques constituent une approche intéressante. Le domaine des AGs ne cesse de se développer et plusieurs méthodes pour le traitement des problèmes multi objectifs ont été proposées. On peut classer ces méthodes en deux catégories principales : agrégatives et non agrégatives.

Méthode agrégative

Par la combinaison des composants f_i du vecteur objectif du problème en une seule fonction scalaire f , on transforme le problème multi objectifs en un problème mono objectif. Dans la pratique différentes façon de construire la fonction f existent, dont la plus connu et la plus utilisée est l'addition de tous les objectifs, en attribuant à chacun d'eux un poids, représente l'importance de l'objectif aux yeux du décideur.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité et sa grande efficacité si on se limite à la recherche d'une solution optimale relative au vecteur des poids associés aux différents critères. Par contre l'inconvénient de cette méthode réside dans sa difficulté de fixer les valeurs des poids appropriés.

Parmi ces méthodes on peut citer :

Vector evaluated genetic algorithm (VEGA)

Le VEGA (Vector evaluated genetic algorithm) proposé par Schaffer [57], a été la première méthode non agrégative utilisant les algorithmes génétiques pour résoudre un problème d'optimisation multi objectif.

Cet algorithme considère une population de N individus. A chaque génération, la population est aléatoirement divisée en autant de sous-populations égal au nombre d'objectifs. Chaque sous-populations vont être créées en considérant un objectif particulier. Ensuite, ces sous populations sont mélangées afin d'obtenir une nouvelle population de N individus et les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués.

L'inconvénient majeur est qu'il a tendance à générer des solutions qui excellent dans un seul objectif, sans tenir compte des autres objectifs.

Méthode non agrégative

Il s'agit de converger une population vers un ensemble de solutions efficaces en se basant sur la notion de dominance de Pareto, qui consiste en le respect de l'intégralité de chaque critère et le refus de comparer les valeurs des différents critères. Ce concept apporte une aide précieuse au décideur mais ne permet pas de choisir une alternative plutôt qu'une autre.

Parmi ces méthodes on peut citer :

- Multiple Objective Genetic algorithm (MOGA)
- Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) et sa deuxième version (NSGAI)

Multiple Objectives Genetic Algorithm (MOGA)

Le MOGA algorithme, proposé par Fonseca et Fleming [22], est une méthode qui utilise la notion de dominance pour ranger les individus de la population, dans laquelle chaque individu

de la population est rangé en fonction du nombre d'individus qui le domine. Pour démarrer l'algorithme, les relations de domination sont d'abord calculées pour chaque solution. Puis, pour un individu i , un rang égal à 1 plus le nombre d'individus n_i qui dominent l'individu i est attribué. Une fitness est ensuite attribuée à chaque solution en fonction de son rang, les individus avec les rangs les plus faibles ayant les meilleures fitness.

Cette méthode pose comme inconvénient un risque de convergence prématurée à cause de la grande pression exercée par la sélection. Afin de maintenir la diversité entre les solutions non dominées, les auteurs utilisent une fonction de partage (Sharing). Mais les performances de l'algorithme sont dépendantes de la valeur du paramètre σ_{share} utilisé dans la fonction de partage.

NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm)

Dans l'algorithme NSGA proposé par Srinivas et Deb [60], on recherche les individus non dominés de la population entière. Ces derniers constituent la première frontière de Pareto. On attribue alors à tous les individus de ce front la même valeur de fitness factice. Mais pour maintenir la diversité de la population, il est nécessaire d'appliquer une fonction de partage sur cette valeur. Ces individus sont ensuite enlevés de la population.

On recommence cette procédure jusqu'à l'identification des solutions du deuxième front. La valeur factice de fitness attribuée à ce second groupe est inférieure à la plus petite fitness, après application de la fonction de partage sur le premier front. Ce processus est répété jusqu'à ce que l'on ait traité tous les individus. L'algorithme se déroule ensuite comme un algorithme génétique standard. Grâce à sa procédure d'assignement de fitness basée à la fois sur la notion de dominance et la fonction de partage, le NSGA semble le plus approprié à maintenir la diversité de la population et à répartir plus efficacement les solutions sur le front de Pareto. Néanmoins, cet algorithme présente quelques insuffisances en raison de sa complexité de calcul et de sa sensibilité au choix de la valeur σ_{share} .

Les algorithmes génétiques multicritères présentés précédemment sont connus comme des MOGAs non élitiste du fait qu'ils ne conservent pas les solutions Pareto-optimale trouvées au cours de la recherche. Ainsi, la convergence vers la frontière Pareto est souvent lente. De plus, ces algorithmes maintiennent difficilement la diversité sur la frontière Pareto [68]. Afin de

remédier à ces genres de difficultés, de nouveaux algorithmes génétiques multicritères ont été proposés récemment avec des nouvelles procédures. Nous avons choisi de présenter uniquement le NSGA-II car il a été utilisé dans notre travail.

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)

Est une deuxième version de NSGA avec de nouvelles techniques, Deb [19] tente de résoudre toutes les critiques faites sur NSGA : complexité, utilisation du sharing et non élitisme. En remplaçant la fonction de 'sharing' afin d'éviter le réglage des paramètres exigés, une fonction de distance 'crowding' a été introduite. Cette fonction est liée à deux caractéristiques propres à chaque individu, respectivement le rang de 'non domination' et la distance de 'crowding'. Comparativement à NSGA, NSGA-II obtient de meilleurs résultats sur toutes les instances présentées dans les travaux de K. Deb [19], ce qui fait de cet algorithme un des plus utilisés aujourd'hui.

Dans cet algorithme, à chaque génération t , une population de parents (P_t) de taille (N) et une population d'enfants (Q_t) de taille de même taille (N) sont mélangées pour produire une population ($R_t = P_t \cup Q_t$), comme le montre la figure 4.11. Cet assemblage permet d'assurer l'élitisme. La population R_t de taille ($2N$) est ensuite répartie par une procédure de tri selon un critère de non-dominance pour identifier plusieurs fronts F_1, F_2 , etc. Les meilleurs individus vont se retrouver dans le ou les premiers fronts. Une nouvelle population parent (P_{t+1}) est formée en ajoutant les fronts au complet (premier front F_1 , second front F_2 , etc.) tant que ceux-ci ne dépassent pas N . Si le nombre d'individus présents dans (P_{t+1}) est inférieur à (N), une procédure de *crowding* est appliquée sur le premier front suivant, (F_i), non inclus dans (P_{t+1}).

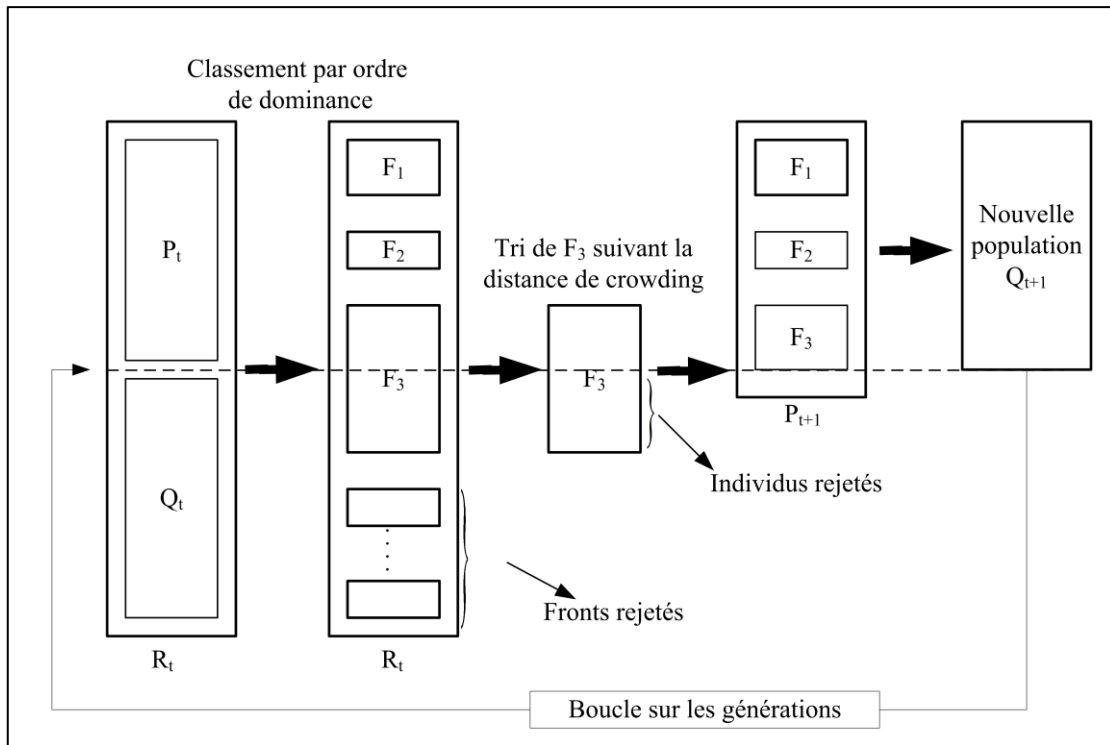


Figure 3.5 : Schéma de l'évolution de l'algorithme NSGA-II [27]

Le but de cet opérateur est d'insérer les $(N - |P_{t+1}|)$ meilleurs individus de F_i qui manquent dans la population (P_{t+1}) . Les individus de ce front sont utilisés pour calculer la distance de *crowding* entre deux solutions voisines. Une fois que les individus de la population (P_{t+1}) sont identifiés, une nouvelle population enfant (Q_{t+1}) est créée par sélection, croisement et mutation. La sélection par tournoi est utilisée mais le critère de sélection est basé sur l'opérateur de comparaison (\prec_n) défini ci-dessous. Le processus continu, d'une génération à l'autre, jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt. Une itération résume les différentes étapes décrites ci-dessus de l'algorithme NSGA-II :

Une itération de NSGA-II

Après initialisation aléatoire de la population initiale P_0 , une itération de NSGA-II se déroule comme suit :

1. Créer Q_t à partir de P_t en utilisant le tournoi et en appliquant des opérateurs de variation génétique aux individus gagnants.

2. Réunir les populations des parents et des enfants $R_t = P_t \cup Q_t$. Trier l'ensemble résultant R_t en sous-ensemble F_i .
3. Soit une nouvelle population $P_{t+1} = \emptyset$. Soit le compteur des sous-ensembles non-dominés $i=1$.
4. Tant que $|P_{t+1}| + |F_i| < N$, $P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup F_i$ et $i \leftarrow (i+1)$.
5. Ordonner l'ensemble F_i selon les "distance de surpeuplement" (*crowding distance*) et inclure $N - |P_{t+1}|$ solutions ayant les valeurs de distance les plus grandes dans la population P_{t+1} .

Il est important de noter que le tri de R_t en sous-ensembles non-dominés fait en stade 1 et le remplissage de la population P_{t+1} peuvent être effectués simultanément. Chaque fois qu'un nouveau front est trouvé on vérifie s'il peut rentrer dans P_{t+1} entièrement si ce n'est pas le cas, le processus du ranking s'arrête [27].

Calcul de la distance de crowding (distance de surpeuplement)

La distance de *crowding* d'une solution (i) (ou d'un individu) se calcule en fonction du périmètre de l'hypercube formé par les points les plus proches de (i) sur chaque objectif. La figure 4.12 montre une représentation à deux dimensions associée à la solution (i). Le calcul de la distance de *crowding* nécessite, avant tout, le tri des solutions selon chaque objectif, dans un ordre ascendant.

Ensuite, pour chaque objectif, les individus possédant les valeurs limites (la plus petite et la plus grande valeur de fonction objectif) se voient associer une distance infinie (∞). Pour les autres solutions intermédiaires, on calcule une distance de *crowding* égale à la différence normalisée des valeurs des fonctions objectives de deux solutions adjacentes. Ce calcul est réalisé pour chaque fonction objective. La distance de *crowding* d'une solution est obtenue en sommant les distances correspondantes à chaque objectif.

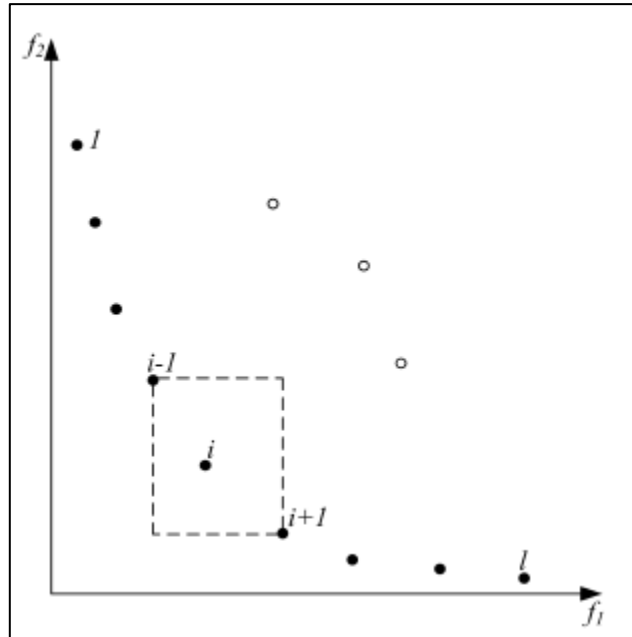


Figure 3.6 : Distance de crowding [48]

L'algorithme 1 reprend toutes les étapes décrites ci-dessus.

Algorithm 1 Calcul de la distance de crowding pour chaque solution d'un front

1. $l = |I|$, nombre de solutions dans le Front I
 2. Pour chaque solution i poser $I[i]_{\text{distance}} = 0$, Initialisation des distances.
 3. Pour chaque objectif m :
 - $I = \text{trier}(I, m)$, trier I par ordre croissant selon le critère m
 - $I[1]_{\text{distance}} = I[l]_{\text{distance}} = +\infty$
 - Pour $i=2$ jusqu'à $l-1$ faire
 - $I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + \left(\frac{f_m^{i+1} - f_m^{i-1}}{f_m^{\text{Max}} - f_m^{\text{Min}}} \right)$
-

Dans cet algorithme, f_m^{i+1} et f_m^{i-1} représentent respectivement la valeur de la i ème fonction objectif de la solution $i+1$ et $i-1$, alors que les paramètres f_m^{Max} et f_m^{Min} désignent les valeurs maximale et minimale de la i ème fonction objectif. Après ce calcul, toutes les solutions de I auront une distance métrique [48].

Opérateur de crowding de comparaison (\prec_n)

L'opérateur *crowded-comparison* (\prec_n) est utilisé pour guider le processus de sélection comme suit : chaque solution (i) de la population est identifiée par son rang (i_{rang}) et sa distance de *crowding* ($i_{distance}$). L'opérateur (\prec_n) défini ci-dessous permet d'identifier un ordre de préférence entre deux solutions :

$$i \prec_n j \text{ si } (i_{rang} < j_{rang}) \\ \text{ou } ((i_{rang} = j_{rang}) \text{ et } (i_{distance} > j_{distance}))$$

Entre deux solutions de fronts différents, on préfère la solution avec le plus petit front. Pour deux solutions qui appartiennent au même front, on préfère la solution localisée dans la région où la densité de solutions est moindre, soit l'individu possédant la plus grande valeur de distance de *crowding*.

A la différence de toutes les stratégies de préservation de la diversité vues jusqu'à présent, celle employée dans NSGA-II n'exige aucun paramètre à fixer. Notons que rien n'empêche de calculer les distances de surpeuplement dans l'espace de décision si cela est jugé plus adapté au problème.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche d'optimisation multicritères basée sur la simulation dédiée à la conception des chaînes logistiques. Nous avons présenté dans l'ordre les principes de base de ce type d'algorithmes, les versions importantes utilisées dans la pratique et plus particulièrement ceux relatifs aux cas multicritères. Un algorithme génétique multicritères NSGA-II, considéré comme l'un des meilleurs MOGAs, a été adopté et intégré dans l'approche.

Chapitre 4

Conception et développement d'un prototype

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons passer à la conception et la mise en œuvre d'un prototype en procédant par l'approche UML (The Unified Modeling Language). L'UML est un langage pour indiquer, visualiser, construire et documenter des systèmes. Nous avons choisi cette approche car il permet de modéliser d'une manière claire et précise la structure et le comportement d'un prototype. Pour permettre la validation de l'approche, des expériences numériques ont été réalisées. Enfin, nous analysons et commentons les résultats numériques obtenus.

1. L'utilisation des diagrammes

UML permet de définir et de visualiser un modèle, à l'aide de diagrammes. Un diagramme UML est une représentation graphique, qui s'intéresse à un aspect précis du modèle. C'est une perspective du modèle, pas "le modèle".

Chaque type de diagramme UML possède une structure. Un type de diagramme UML véhicule une sémantique précise (un type de diagramme offre toujours la même vue d'un système). Combinés, les différents types de diagrammes UML offrent une vue complète des aspects statiques et dynamiques d'un système.

2. Les diagrammes utilisés pour concevoir notre prototype

2.1 Diagramme de cas d'utilisation (use case)

Les use cases permettent de structurer les besoins des utilisateurs et les objectifs correspondants d'un système. Ils centrent l'expression des exigences du système sur ses utilisateurs : ils partent du principe que les objectifs du système sont tous motivés. Les

diagrammes de cas d'utilisation dans UML définissent deux concepts principaux : les acteurs, et les cas d'utilisation. Un cas d'utilisation est une fonctionnalité offerte par le système. Un acteur est une entité extérieure du système qui peut initier l'un de ses cas d'utilisation.

2.2 Diagramme de classes

Le diagramme de classes exprime la structure statique du système en termes de classes et de relations entre ces classes. L'intérêt du diagramme de classe est de modéliser les entités du système d'information. Le diagramme de classe permet de représenter l'ensemble des informations finalisées qui sont gérées par le domaine. Ces informations sont structurées, c'est-à-dire qu'elles ont regroupées dans des classes. Le diagramme met en évidence d'éventuelles relations entre ces classes. Le diagramme de classes comporte 6 concepts :

- Classe.
- Attribut.
- Identifiant.
- Relation.
- Opération.
- Généralisation / Spécialisation....

2.3 Diagramme de séquence

Les diagrammes de séquence sont la représentation graphique des interactions entre les acteurs du système. Ils représentent le séquençage chronologique des opérations réalisées en indiquant les objets que l'acteur va invoquer. Le diagramme de séquence permet de visualiser les messages par une lecture de haut en bas. L'axe vertical représente le temps, l'axe horizontal les objets qui collaborent. Une ligne verticale en pointillé est attachée à chaque objet et représente sa durée de vie.

2.4 Diagramme d'activité

Le diagramme d'activités est un diagramme comportemental pour la représentation de l'enchaînement et la modélisation du flot de contrôle entre les activités.

3. La conception de notre système décisionnel

Comme nous l'avons vu précédemment, l'architecture de notre solution est basée sur :

- Le modèle de chaîne logistique : contient l'ensemble des tâches, des ressources, les centres de production, de distribution, et de détaillant.
- Le composant fournisseurs : permet l'introduction d'informations des fournisseurs et ses livraisons.
- Le composant clients : permet l'introduction d'informations des clients et ses demandes.
- Le module décisions : permet de définir les informations nécessaires pour lancer l'optimisation et la simulation.

3.1 Diagramme de Cas d'utilisation de notre prototype

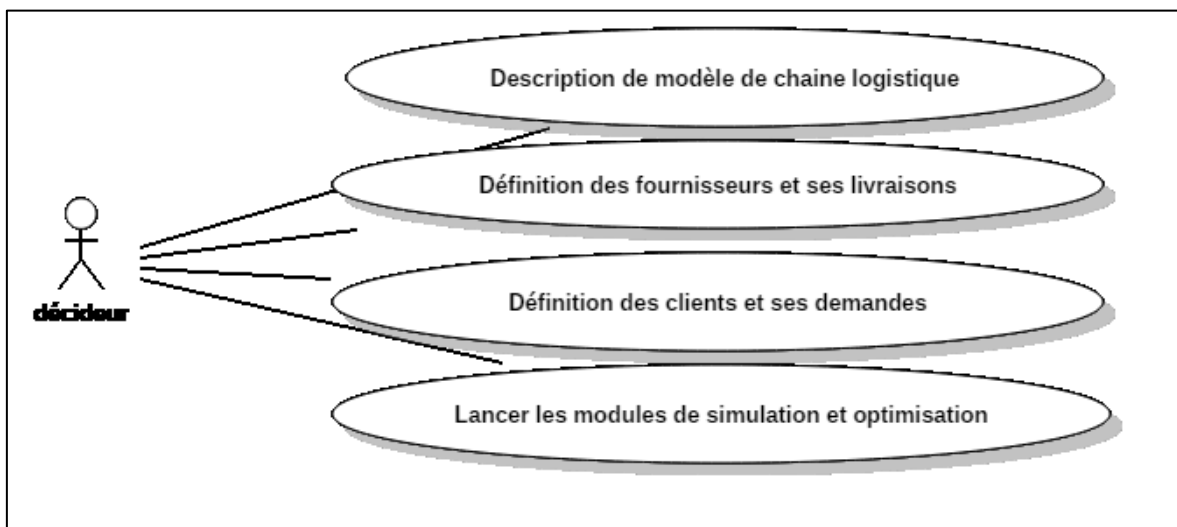


Figure 4.1 : Cas d'utilisation de notre prototype

3.2 Diagramme de Classe de notre prototype

On a utilisé les classes : Clients, Machines, opérations, produits, fournisseurs, Matières premiers et jobs.

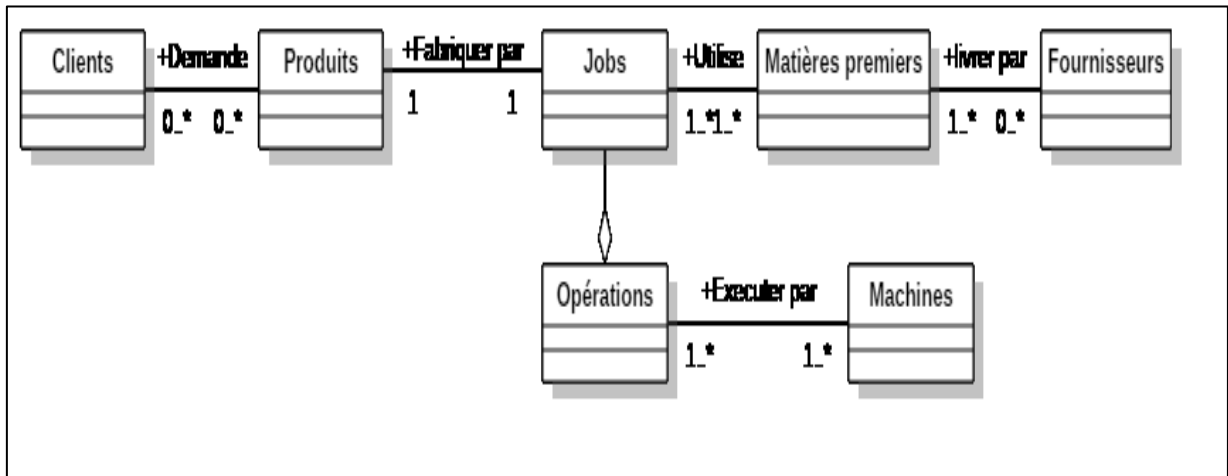


Figure 4.2 : Diagramme de classe de notre prototype

3.2 Diagrammes de séquence et d'activité de notre prototype

1. Diagramme de séquence pour le modèle d'une chaîne logistique

Ce diagramme pour expliquer les enchainements d'élaboration d'un modèle de chaîne logistique.

1. Le décideur choisit l'élaboration d'un modèle d'une chaîne logistique.
2. Il accède à la fenêtre.
3. Le système lui demande de remplir les formulaires avec les données nécessaires.
4. Le décideur entre les informations demandées.
5. Le système affiche les données.
6. Le décideur consulte et enregistre ces données.

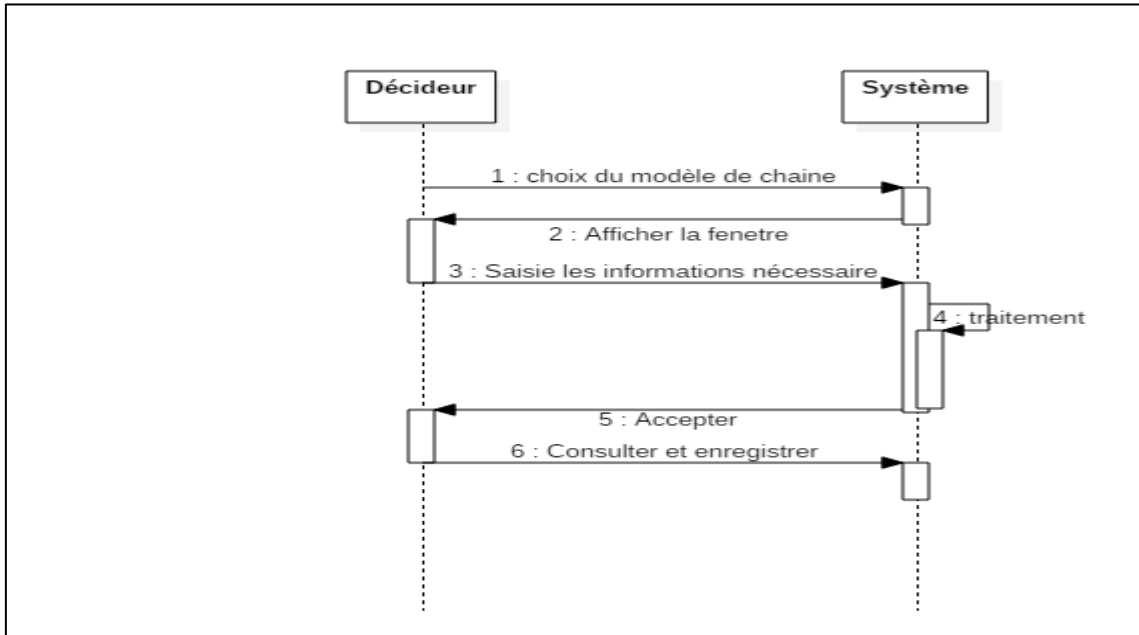


Figure 4.3 : Séquence de modèle de chaîne logistique

2. Le diagramme d'activité de modèle chaîne logistique

Ce diagramme représente les activités d'élaboration de modèle de chaîne logistique.

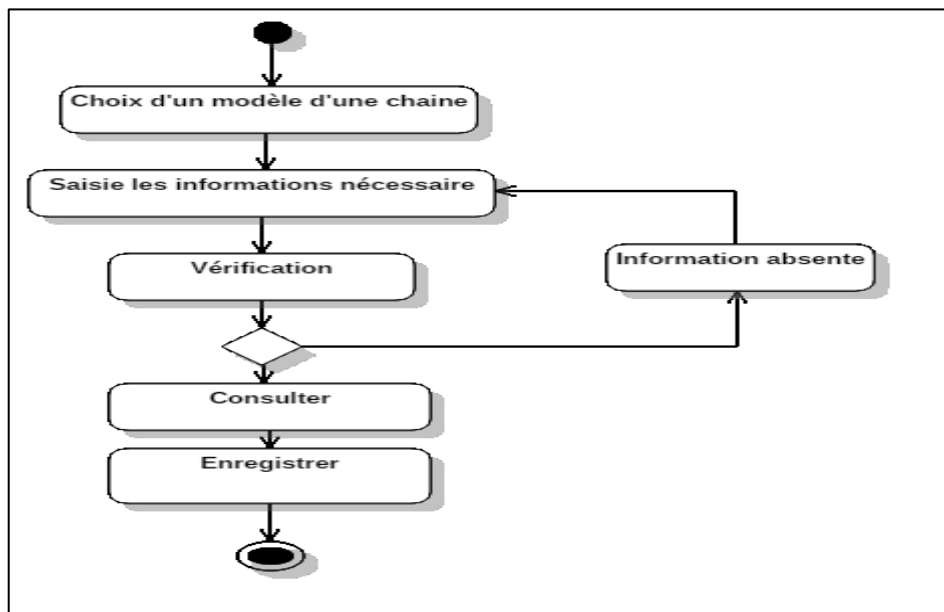


Figure 4.4 : Activité de modèle de chaîne logistique.

3. Le diagramme de séquence de fournisseurs

Ce diagramme pour expliquer les enchainements de saisie d'une livraison d'un fournisseur.

1. Le décideur choisit la saisie d'une livraison.
2. Le système affiche la fenêtre demandé.
3. Le système lui demande de remplir les formulaires avec les données nécessaires.
4. Le décideur saisie les informations.
5. Le système affiche les données.
6. Le décideur consulte et enregistre ces données.

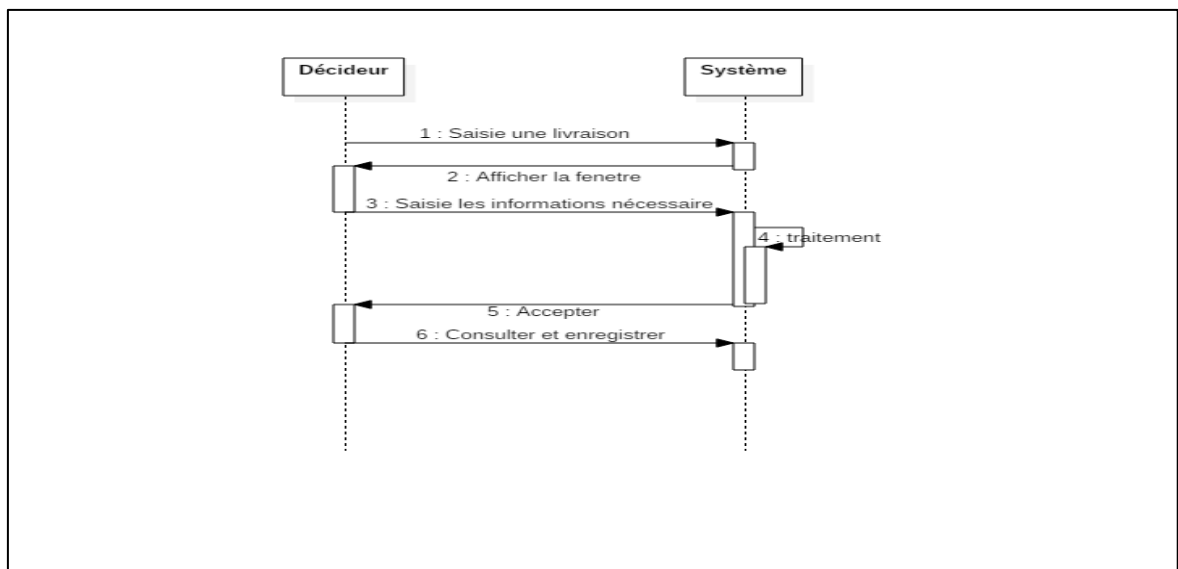


Figure 4.5 : Séquence d'une livraison

4. Le diagramme d'activité de fournisseurs

Ce diagramme décrit les activités d'élaboration d'une livraison d'un fournisseur.

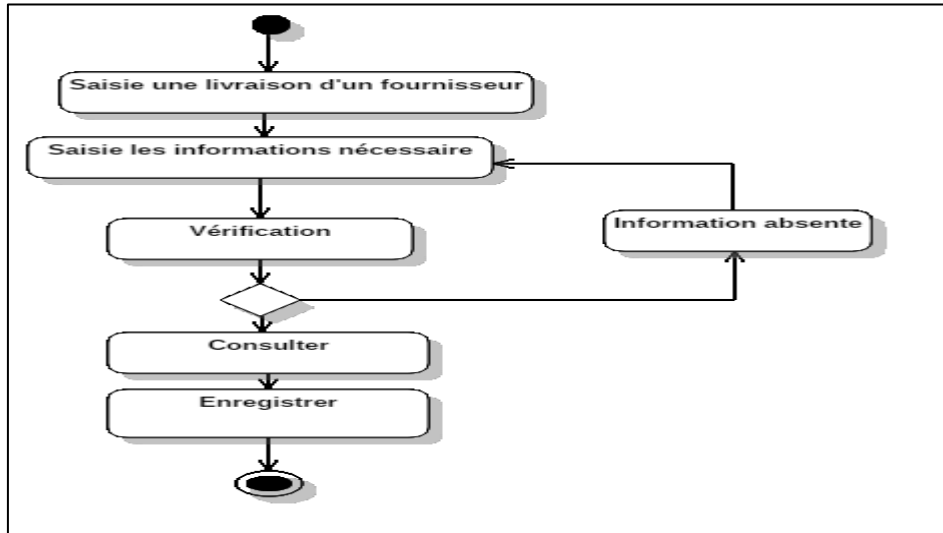


Figure 4.6 : Activité d'une livraison

5. Le diagramme de séquence pour la demande d'un client

Ce diagramme décrit tous les enchainements d'une demande d'un client. Les enchainements sont :

1. Le décideur choisit l'élaboration d'une demande client .
2. Il accède à la fenêtre voulue.
3. Le système lui demande de remplir les formulaires avec les données nécessaires.
4. Le décideur saisie les informations.
5. Le système affiche les informations.
6. Le décideur consulte et enregistre ces informations.

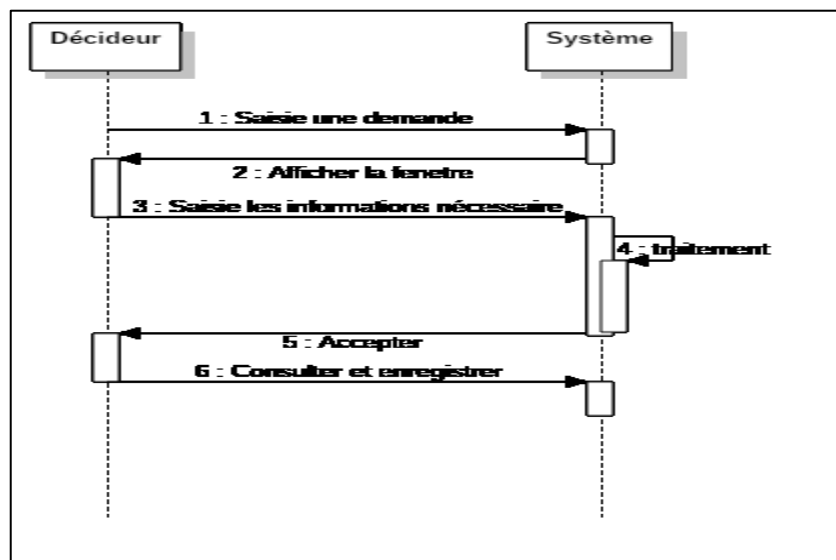


Figure 4.7 : Séquence de demande de client

6. Le diagramme d'activité pour la demande d'un client

Les activités d'élaboration d'une demande d'un client sont représentées dans ce diagramme.

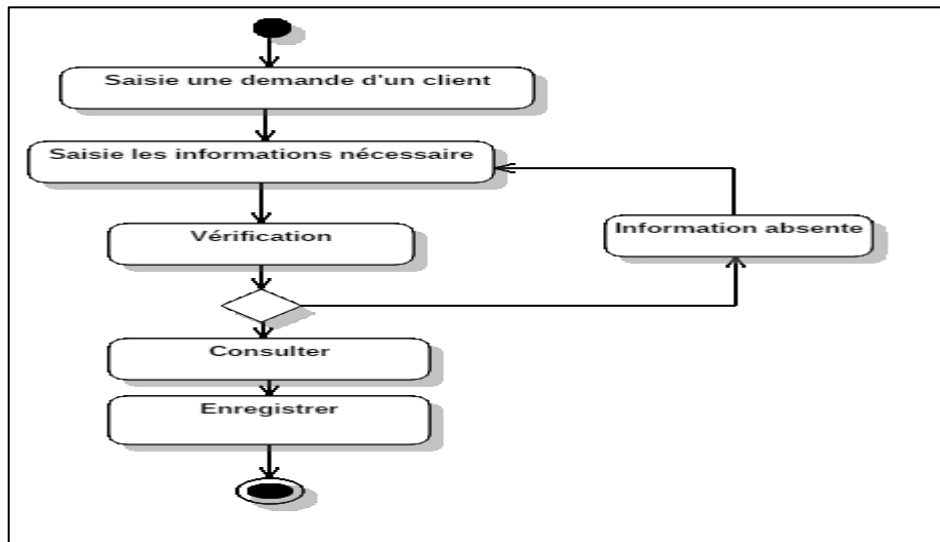


Figure 4.8 : Activité demandes d'un client

7. Le diagramme de séquence pour le module de décisions

Ce diagramme décrit tous les enchainements pour le modules de décisions. Les enchainements sont :

1. Le décideur choisit le lancement de module de décisions .
2. Il accède à la fenêtre voulue.
3. Le système lui demande de remplir les formulaires avec les données nécessaires.
4. Le décideur saisie les informations.
5. Le système affiche les résultats trouvés.
6. Le décideur consulte et enregistre le meilleur résultat.

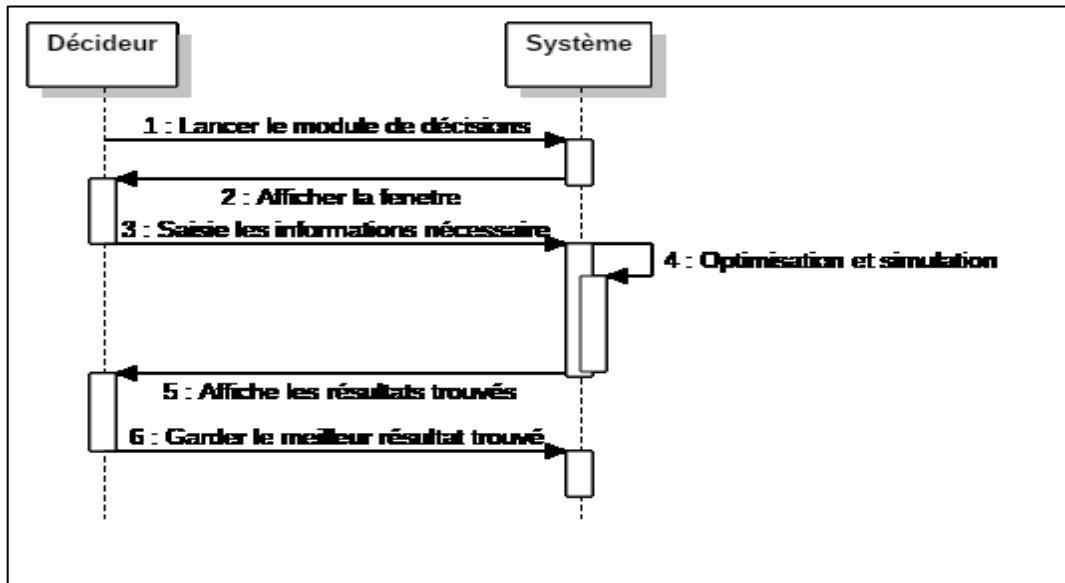


Figure 4.9 : Séquence de module de décisions

8. Le diagramme d'activité pour le module de décisions

Les activités de module de décisions sont représentées dans ce diagramme.

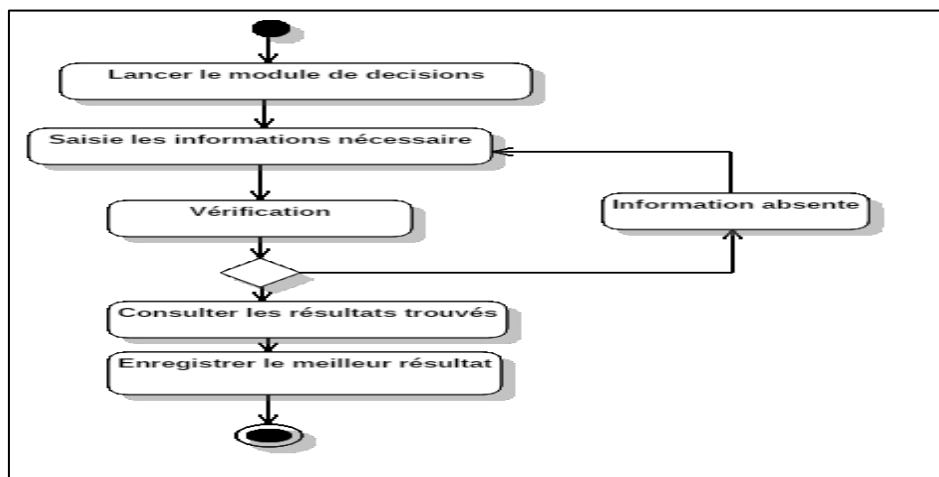


Figure 4.10 : Activité de module de décisions

4 La description des tables de base de données

➤ Table Clients

Cette table contient les informations des clients, son clé primaire est: Num_C.

Nom de champ	Type	Désignation
Num_C	Numérique	Code client
Nom_C	TEXTE	Nom client
Prenom_C	TEXTE	Prénom client
Adresse_C	TEXTE	Adresse

CodePostal_C	Numérique	Code postal
Ville_C	TEXTE	Ville de client
Tel_C	char(14)	Telephone de client

Tab 4.1 : La table clients

➤ **Table fournisseurs**

Cette table contient les informations des fournisseurs, son clé primaire est: Num_F.

Nom de champ	Type	Désignation
Num_F	Numérique	Code fournisseur
Nom_F	TEXTE	Nom fournisseur
Prenom_F	TEXTE	Prénom fournisseur
Adresse_F	TEXTE	Adresse fournisseur
CodePostal_F	Numérique	Code postal fournisseur
Ville_F	TEXTE	Ville de fournisseur
Tel_F	char(14)	Telephone de fournisseur

Tab 4.2 : La table fournisseurs

➤ **Table jobs**

Cette table contient les informations des jobs, son clé primaire est: IDJOB.

Nom de champ	Type	Désignation
IDJOB	Numérique	Code job
DESJOB	TEXTE	Désignation job

Tab 4.3 : La table jobs

➤ **Table matières premières**

Cette table contient les informations des matières premières, son clé primaire est: IDINPUT.

Nom de champ	Type	Désignation
IDINPUT	Numérique	Code matières
IDJOB	Numérique	Code job
Des_Input	TEXTE	Désignation matières

Tab 4.4: La table matières premières

➤ **Table produits**

Cette table contient les informations des produits, son clé primaire est: IDOUTPUT.

Nom de champ	Type	Désignation
IDOUTPUT	Numérique	Code produit
IDJOB	Numérique	Code job
Des_Output	TEXTE	Désignation produit

Tab 4.5: La table produits

➤ **Table Demandes clients**

Cette table contient les informations des demandes clients, son clé primaire est: ID_orders avec des clé étrangers IDOUTPUT, Num_C

Nom de champ	Type	Désignation
ID_order	Numérique	Code demande
IDOUTPUT	Numérique	Code produit
Num_C	Numérique	Code client
Qte_D	Numérique	Quantité demandes
soft_dateD	Numérique	Date de livraison souhaitée
hard_dateD	Numérique	Date de livraison impérative

Tab 4.6: La table demandes clients

➤ **Table Livraison des matières**

Cette table contient les informations des livraison des matières, son clé primaire est: ID_Liv avec des clé étrangers IDINPUT, Num_F

Nom de champ	Type	Désignation
ID_Liv	Numérique	Code Livraison
IDINPUT	Numérique	Code matières
Num_F	Numérique	Code fournisseur
Qte_M	Numérique	Quantité livrer
soft_dateL	Numérique	date de disponibilité souhaitée
hard_dateL	Numérique	date de disponibilité impérative

Tab 4.7: La table Livraison des matières

➤ **Table des opérations**

Cette table contient les informations des opérations des jobs, son clé primaire est: ID_Op avec un clé étrangers IDJOB.

Nom de champ	Type	Désignation
ID_Op	Numérique	Code opération
IDJOB	Numérique	Code job
Des_Op	TEXTE	Désignation opération
Pres_op	Numérique	Temps d'exécution de l'opération

Tab 4.8 : La table opérations

➤ **Table des Machines**

Cette table contient les informations des machines, son clé primaire est: ID_Mac avec un clé étranger ID_Op.

Nom de champ	Type	Désignation
ID_Mac	Numérique	Code machine

Des_Mac	Numérique	Désignation machine
ID_Op	Numérique	Code opération
Cout_M	Numérique	coût d'une unité de temps d'exécution sur cette

Tab 4.9: La table Machines

5 Développement d'un prototype :

Pour tester notre approche, un prototype est développé pour la production d'un modèle optimal de la chaîne logistique. Comme nous l'avons vu précédemment, au niveau opérationnel un modèle d'une chaîne logistique est divisé en deux sous-modèles communicants: un modèle de simulation qui est une approximation du comportement complexe de la chaîne logistique et d'un modèle d'optimisation d'ordonnancement représentant le reste de son comportement.

Le module de simulation va exécuter le modèle en utilisant des paramètres incertains donnés et une séquence d'ordonnancement comme un ensemble des stimulants et prendra fin lorsque cette séquence d'ordonnancement est expiré.

Les résultats de simulation sont employés comme des informations pour mesurer les métriques appropriés qui peuvent aider les décideurs à améliorer la chaîne logistique. Le code du module de simulation peut visualiser le processus de planification en montrant le progrès des jobs et la performance en montrant le temps de charge et d'inactivité pour une machine en période de temps. Les résultats de simulation sont employés par le module de décision qui emploie des règles stratégiques, tactiques et/ou opérationnelles prédéfinies pour restructurer le modèle de la chaîne logistiques. Ces règles sont définies par les décideurs comme ensemble de règles d'amélioration.

6 Outils et environnement de développement

Avant de commencer l'implémentation de notre prototype, nous allons tout d'abord spécifier les outils utilisés qui nous ont semblé être un bon choix vu les avantages qu'ils offrent.

Langage JAVA

Notre choix du langage java a été guidé par les avantages qu'offre la programmation orientée objet. Java utilise des processus qui augmentent les performances des entrées/sorties, facilitent l'internationalisation. Il examine le programme au fil de l'exécution et libère automatiquement la mémoire. Cette fonctionnalité diminue les risques de panne du programme et évite la possibilité de mal utiliser la mémoire.

Netbeans

Notre prototype est écrit en Netbeans version 7.1 sous Windows 7. Le choix de la programmation sous Windows a été pris à cause de l'interface graphique qu'offre cet environnement. Le choix de Netbeans est fondamental car c'est un logiciel permettant principalement le développement en java. Il fournit un environnement standard de développement pour créer des interfaces très puissantes.

jMetal

jMetal est une bibliothèque Java développée par Antonio J. Nebro et Juan J. Durillo. jMetal signifie Metaheuristic Algorithms in Java, dont l'objectif est de fournir un cadre d'implémentation, d'expérimentation et d'étude d'algorithmes de résolution multi-objectif basés sur des méta-heuristiques (ex : algorithmes génétiques et essaim de particules). L'approche objet de Java permet d'offrir un cadre générique et flexible pour implémenter ses propres algorithmes ou problèmes d'optimisation. Par défaut, un certain nombre de problèmes connus sont implémentés (ZDT, Kursawe, Schaffer, etc.). De même, les principaux algorithmes de la littérature sont présents : NSGA-II, SPEA2, MOPSO, etc. Sont également fournies des classes pour évaluer les résultats des algorithmes utilisés, comme le calcul de l'hyper volume ou l'espacement d'une population. jMetal est téléchargeable à l'adresse suivante : <http://jmetal.sourceforge.net/documentation.html> sur le serveur pédagogique. La dernière version de jMetal est la version (4.4) .

7 Description de l'application

Dans le cadre de l'utilisation de notre approche dans un environnement réel, nous avons développé un prototype dont le but est de démontrer la flexibilité de notre travail.

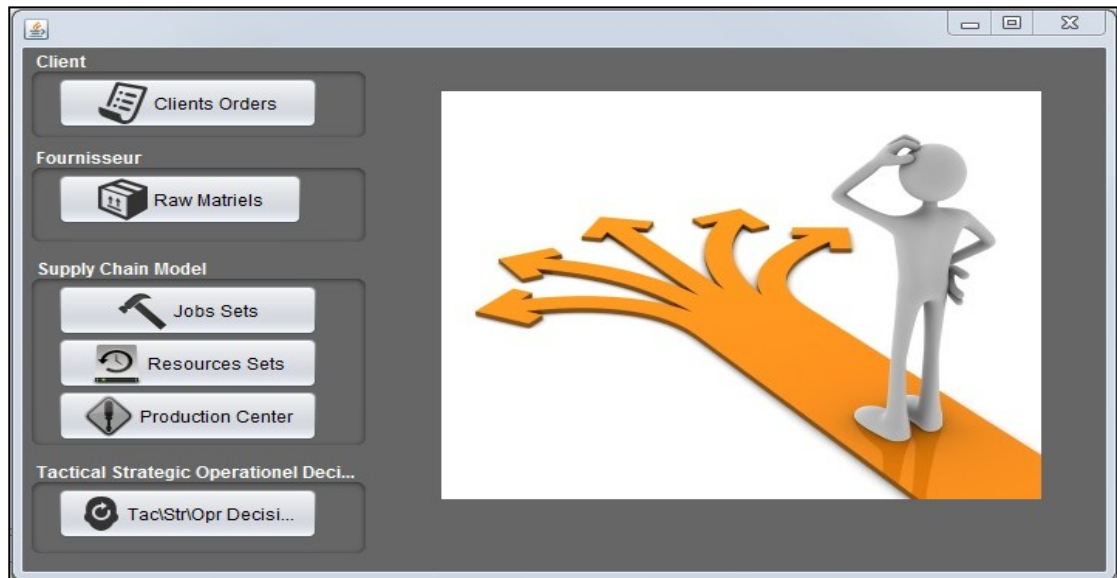


Figure 4.11 : Fenêtre principale de notre prototype

Comme nous l'avons vu précédemment, l'architecture de notre solution est basée sur :

- un modèle de chaîne logistique.
- un module de décisions stratégiques, tactiques et/ou opérationnelles.
- les fournisseurs externes de matières premières.
- les clients externes.

Livraison des matières premières:

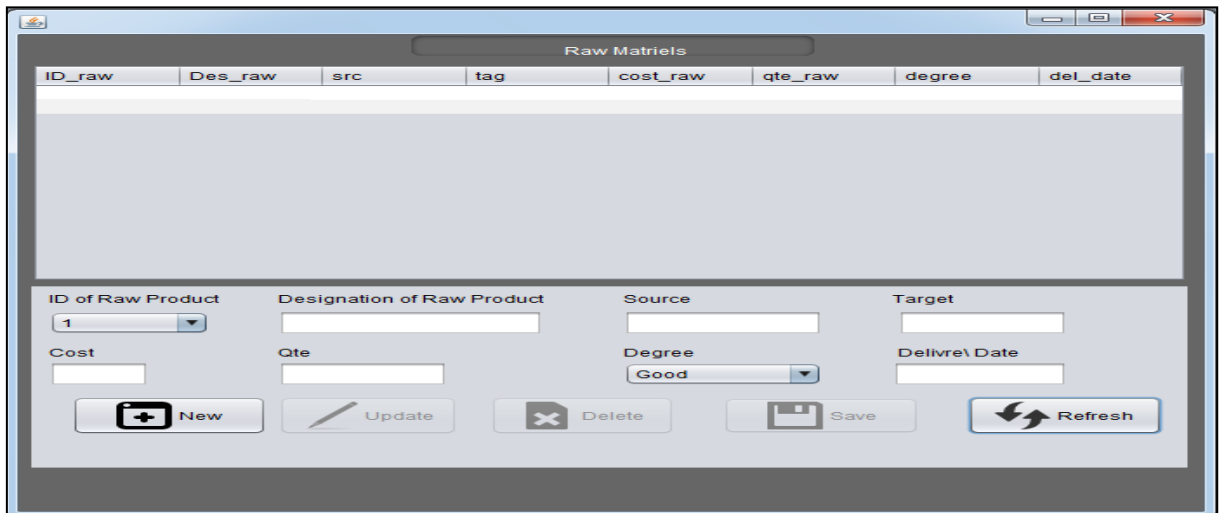


Figure 4.12 : Fenêtre matière première

Le rôle de ce composant est de recevoir des fournisseurs externes les informations des matières premières. Les actions possibles à ce niveau sont la consultation la modification ou suppression d'informations concernant les matières premières.

- *ID_raw* identifie la matière première,
- *Des_raw* est la désignation d'une matière première
- *Srce* identifie un fournisseur,
- *Tg* identifie où livrer la matière première
- *Qt* est la quantité (nombre d'unités) de la matière première exigée.
- *Cost_raw* est le coût unitaire de la matière première.
- *Degree* étant le degré de qualité de la matière première et ayant trois valeurs : *good* , *middle* et *poor* .
- *Del_date* La date de livraison qui est fixée après négociations.

Demande Client :

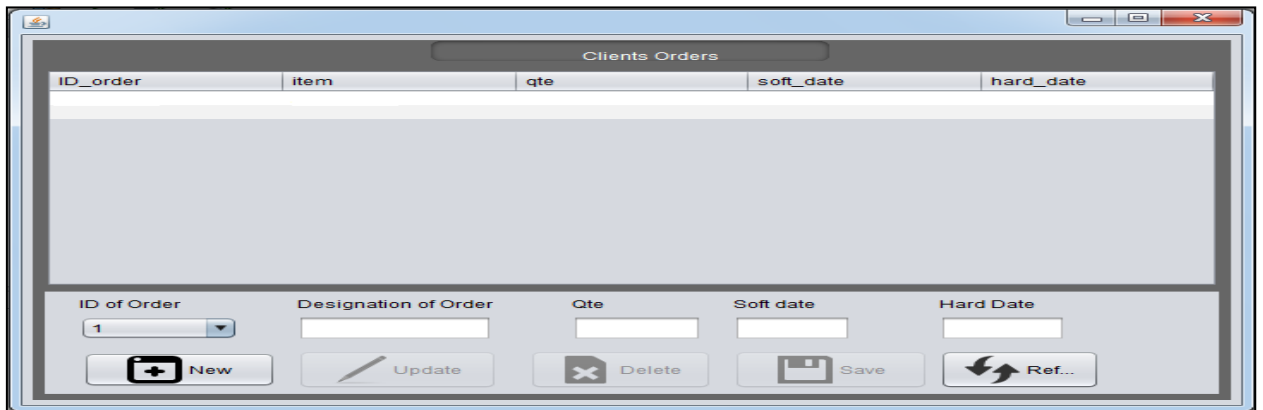


Figure 4.13 : Fenêtre demande client

Ce composant permet l'introduction des informations des demandes envoyées par les clients. La liste des actions possibles à ce niveau sont la consultation, modification et/ou suppression d'informations concernant ces demandes. Une demande, décrite par les concepts

- *Item* : est le produit demandé.
- *ID_order* : identifiant pour une demande.
- *Qte* : la quantité spécifique.
- *Soft_date* et *Hard_date* : un intervalle du temps de livraison, sa première valeur est la contrainte temporelle souhaitée et sa deuxième valeur est la contrainte temporelle impérative.

Ensemble des jobs :

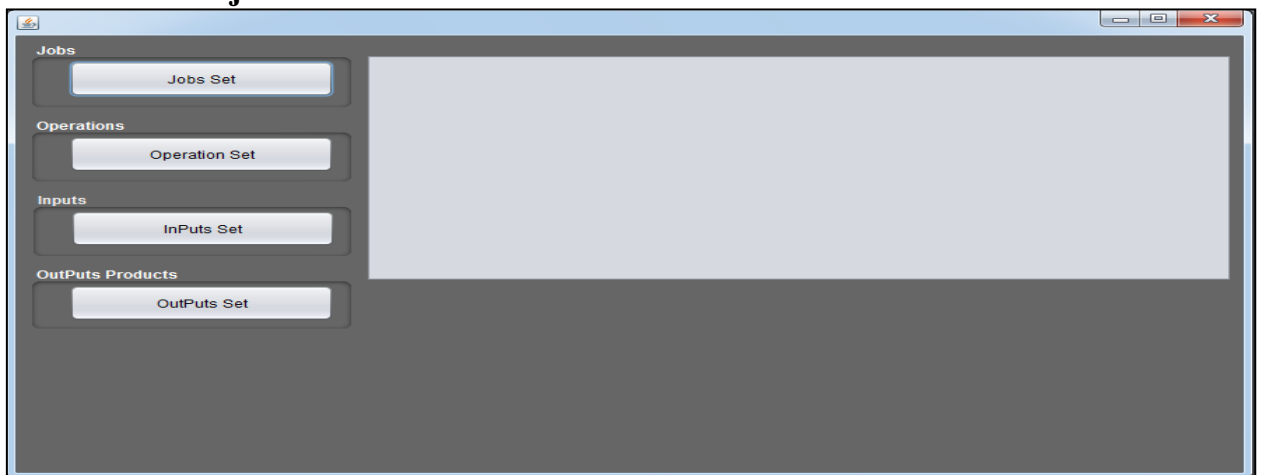


Figure 4.14 : Fenêtre ensemble des jobs

Ce composant permet de définir l'ensemble des jobs. Les éléments de cet ensemble sont les jobs(J), où le concept j est défini par un ensemble des opérations.

Ce job va utiliser un ensemble de matières premières pour produire un ensemble de produits finaux.

- *Operations Set* : désigne l'ensemble des opérations définies d'un job.
- *InPuts Set* : désigne l'ensemble des produits non fini\matières employé par le job.
- *OutPuts Set* : désigne l'ensemble des produits fabriqués par le job.

Ensemble des ressources :

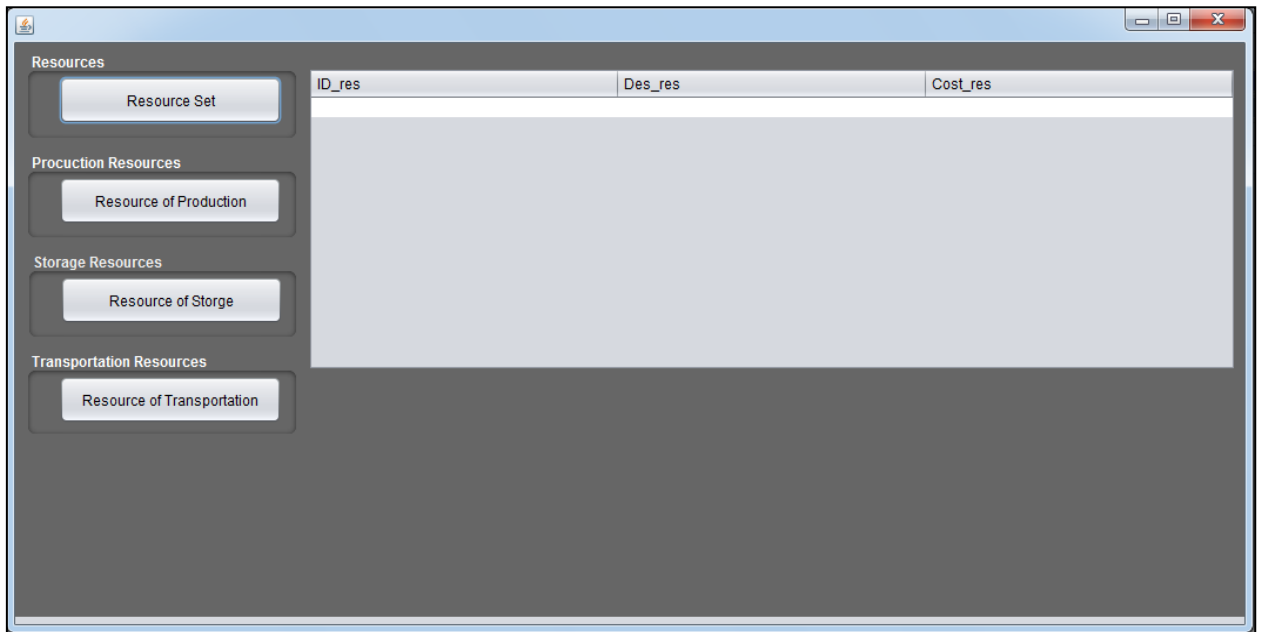


Figure 4.15 : Fenêtre ensemble des ressources

Ce composant permet de définir l'ensemble des ressources. Une ressource est caractérisée par les concepts *Des_res* et *ID_res*. *Cost_res* est le coût d'une unité de temps d'exécution sur cette ressource.

Une ressource peut être :

- une ressource de fabrication comme les machines.
- une ressource de stockage comme les entrepôts.
- une ressource de transport comme les camions.

Module de décisions:

The screenshot shows a software window titled "Decisions". Inside the window, there are three columns of input fields. The first column has "Production Cost" with an input box below it. The second column has "Inventory Cost" with an input box below it. The third column has "Lateness Cost" with an input box below it. Below these, there are three more input boxes labeled "Op1 in inventory", "Op2 in inventory", and "Op3 in inventory". Underneath those are two more input boxes labeled "Ip1 in inventory" and "Ip2 in inventory". To the right of the "Ip2 in inventory" box is a button labeled "Generate". At the bottom of the window, there is a progress bar showing "0%".

Figure 4.16 : Fenêtre modules de décisions

Ce composant est considéré comme l'étape finale de notre approche, il permet de définir les informations nécessaires pour lancer l'optimisation et la simulation. A ce niveau on va introduire les informations sur le coût unitaire de retard d'une demande, le coût unitaire d'inventaire et le coût unitaire de production. Ainsi ce composant permet de définir l'état de stock (les quantités des produits et des matières premières). Après l'introduction de ces informations on peut exécuter les modules d'optimisation et de simulation.

8 Les résultats expérimentaux

Pour expérimenter notre prototype développé, nous avons utilisé un modèle simple de chaîne logistique présentée par la configuration montrée comme suit : Cette configuration contient 5 jobs spécifiés avec leurs opérations (trois opérations pour chaque job), 5 ressources différentes au sein d'un centre de production, en plus de 2 matières premières différentes provenant des différents fournisseurs. Nous avons formulé un modèle d'optimisation tactique pour décider au sujet des quantités de produits à fabriquer et l'ordonnancement des jobs au sein du centre de production.

Les demandes des clients sont employées pour déterminer les travaux à réaliser, les contraintes temporelles, des ressources et la conception d'atelier à employer. Il y a un ensemble de règles définies pour déterminer le nombre de ressources, de matières

premières de fournisseur à employer, etc. La décision tactique était d'employer un type d'atelier (qui est composé de m machines identiques en parallèle).

Le modèle de m machines identiques en parallèle dans notre exemple contient deux étapes de production. La première se compose de trois machines de production parallèle et la deuxième se compose de deux machines d'assemblage. Les matières premières sont fournies par deux fournisseurs différents. La décision tactique produite à partir du modèle d'optimisation tactique, était de produire les quantités suivantes. 15 unités pour le produit $P1$, 18 unités pour le produit $P2$ et 17 unités pour le produit $P3$.

L'ensemble des règles seront exécutées sur les résultats de simulation en tant qu'entrée. Les résultats de simulation agissent sur la façon dont les ressources sont exploitées pour une structure incertaine particulière de chaîne logistique avec une séquence d'ordonnancement (par exemple, si une ressource est moins employée que prévue, elle peut être enlevée de la liste des ressources), si la qualité de matière première n'influence pas les contraintes temporelles, ou si les niveaux d'inventaires sont suffisants, et ainsi de suite.

Les figures 4.17 et 4.18 donnent les résultats de simulation pour les meilleures alternatives (solutions) proposées du modèle de la chaîne logistique conçue par le module de décision. Les informations de ces modèles sont prises pendant le processus de simulation. Chaque résultat dépend d'un modèle et se compose de coût total (le coût d'inventaire et de production), de date de fin d'ordonnancement et de coût de retard de la solution d'ordonnancement proposé par le module d'optimisation opérationnel. Nous avons défini une mesure d'évaluation pour choisir le meilleur modèle, qui est comme suit :

$$ModelMetric = TotalCost + Cmax + 2 * \sum T$$

La figure 4.17 donne les résultats de simulation pour les meilleurs modèles (axe des X). Les quatre courbes colorées représentent le coût total, la date de fin d'ordonnancement, le coût de retard de la solution d'ordonnancement et la mesure d'évaluation. Pour représenter toutes ces courbes dans un même graphique et puis faciliter la comparaison entre les modèles, les données d'axe des y pour les quatre courbes sont prises dans l'intervalle [0,10], ainsi la valeur réelle peut être calculée en multipliant la valeur indiquée sur la courbe par la valeur maximale pour chaque courbe.

La figure 4.18 donne une comparaison entre les meilleurs modèles, cette comparaison montre que le modèle numéro 16 est le meilleur, qui à zéro temps de retard, le coût total le plus bas et le modèle a également la valeur la plus basse de Cmax.

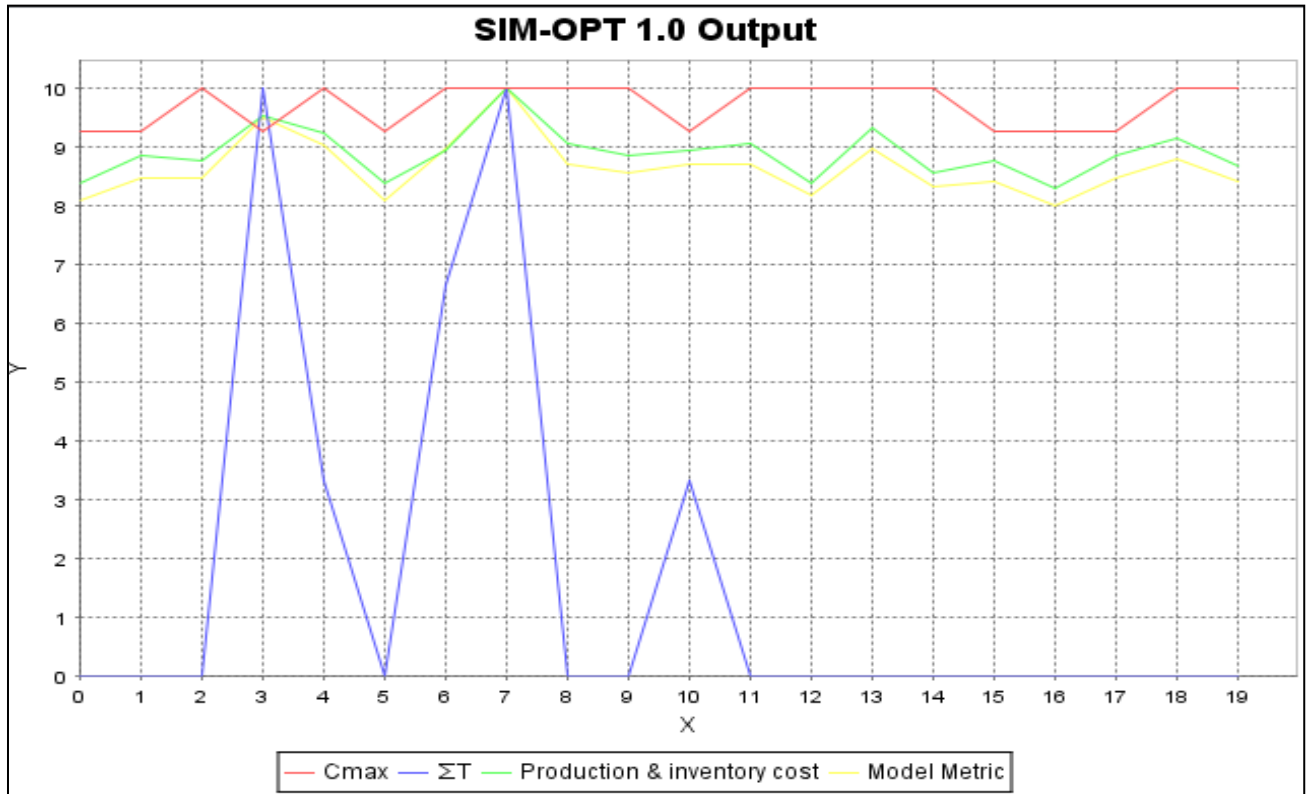


Figure 4.17 : Resultats de meilleurs modèles

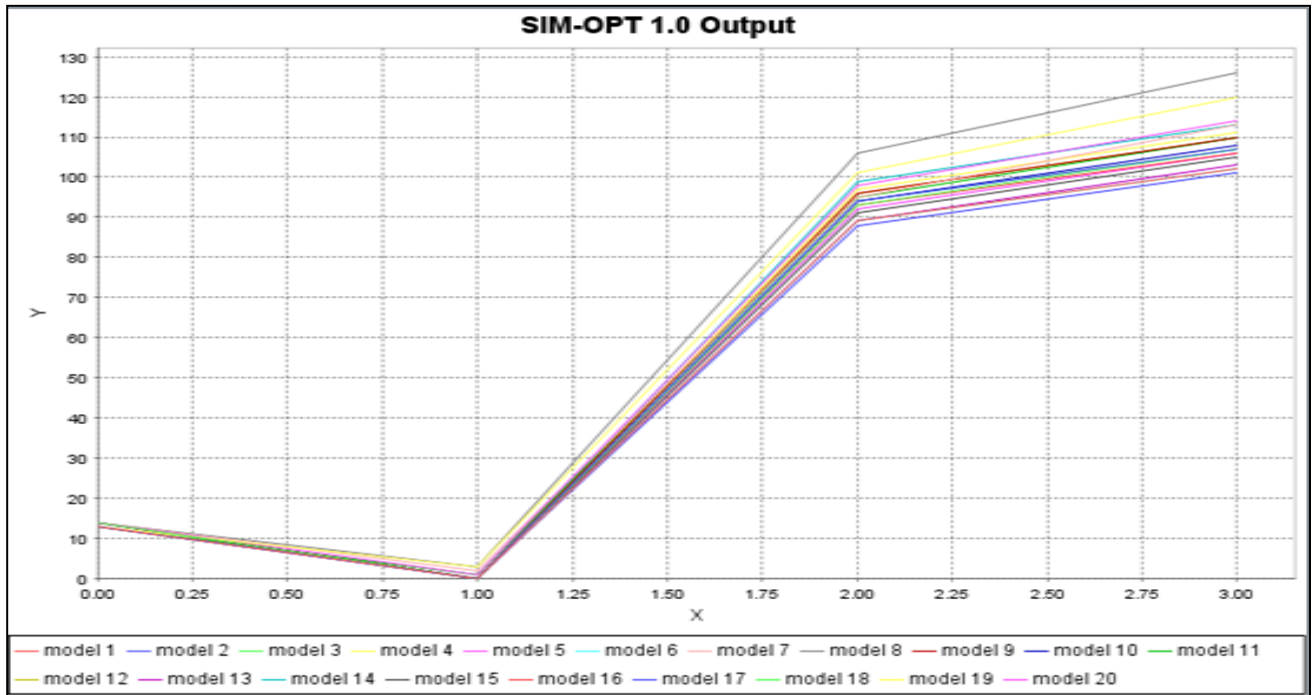


Figure 4.18 : Comparaison entre les meilleurs modèles

A partir de cette comparaison on peut visualiser les données du meilleur modèle. Les résultats sont liés aux quantités des produits requises par les clients, les quantités des matières premières reçus, les quantités des produits à produire, cette dernière représente le résultat obtenu à partir de l'optimisation tactique et l'ordonnancement des jobs au sein de centre de production. On peut aussi visualiser les taux d'activités pour chaque machines, la figure suivante représente les résultats de la configuration citée précédemment.

Raw Products			Clients Orders				Quantite will produce			
Product 1	Product 2	Arrival Date	Product 1	Product 2	Product 3	Delivery Date	Producte 1	Product 2	Product 3	Delivery Date
30	0	5	2	4	2	7	1	1	5	7
0	30	7	3	2	4	8	1	2	1	8
			5	4	3	10	6	5	2	10
			2	3	6	14	7	8	5	14
			3	5	6	16	7	9	4	16

Scheduling															
Order	2	1	1	1	3	2	1	2	3	3	4	4	2	1	2
Machine	3	2	5	3	3	5	1	2	5	2	3	5	1	4	4

The best result is 16.0

Taux of Machine 1 is 100 Taux of Machine 2 is 100 Taux of Machine 3 is 92 Taux of Machine 4 is 100 Taux of Machine 5 is 100

Figure 3.14 : Les données du meilleur modèle

Dans notre exemple, l'ensemble des matières premiers livrer est comme suit :

Code livraison	Code matières	Code fournisseur	Quantité livrer	Date de disponibilité souhaitée	Date de disponibilité impérative
Liv 1	IP1	F1	30	5	5
Liv 2	IP2	F2	30	7	7

Tab 4.10 Exemple d'une livraison

Les demandes des clients :

Code demande	Code produit	Code client	Quantité demander	Date de livraison souhaitée	Date de livraison impérative
Dem 1	OP1	C11	3	8	8
Dem 2	OP2	C11	4	10	10
Dem 3	OP3	C11	6	14	14
Dem 4	OP1	C12	5	10	10
Dem 5	OP2	C12	4	7	7
Dem 6	OP3	C12	6	16	16
Dem 7	OP1	C13	2	7	7
Dem 8	OP2	C13	2	8	8
Dem 9	OP3	C13	3	10	10
Dem 10	OP1	C14	2	14	14
Dem 11	OP2	C14	3	14	14
Dem 12	OP3	C14	2	7	7
Dem 13	OP1	C15	3	16	16
Dem 14	OP2	C15	5	16	16
Dem 15	OP3	C15	4	8	8

Tab 4.11 Exemple d'une demande

Les demandes des clients vont convertis sous la forme suivantes (trier par la date de livraison pour les clients)

Produit 1 OP1	Produit 2 OP2	Produit 3 OP3	Date de livraison imperative
2	4	2	7
3	2	4	8
5	4	3	10
2	3	6	14
3	5	6	16

Tab 4.12 Demande client trier

Le rôle de la planification au niveau tactique est de déterminer le nombre d'unités pour chaque produit à fabriquer pour chaque moment de production (liée au demande de client). Le résultat de notre exemple est comme suit

Produit 1 OP1	Produit 2 OP2	Produit 3 (OP3	Date de disponibilité imperative
1	1	5	7
1	2	1	8
6	5	2	10
7	8	5	14
7	9	4	16

Tab 4.13 Résultat de planification tactique

Le résultat de la planification au niveau opérationnel (l'ordonnancement optimal) est :

Machine\séquence				
M1	O_{31}	O_{51}		
M2	O_{12}	O_{32}	O_{41}	
M3	O_{21}	O_{11}	O_{22}	O_{42}
M4	O_{52}	O_{53}		
M5	O_{13}	O_{23}	O_{33}	O_{43}

Tab 4.14 L'ordonnancement optimal

Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie l'étude conceptuelle du futur système en utilisant l'approche UML qui nous a permis de livrer une spécification du fonctionnement du nouveau système issue de cas d'utilisation, les structure sous une forme de diagramme de classe, et enfin les diagrammes de séquence et d'activité. Afin de valider notre approche, un prototype est développé, Enfin, via des expérimentations différentes, nous avons justifié la validité et l'efficacité de l'approche développée dans cette thèse.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons présenté un système d'aide à la décision basé sur les techniques de simulation/optimisation pour optimiser la planification de la chaîne logistique en déterminant un plan faisable qui rencontre tous les besoins de demandes et les limitations de chaîne et optimisant les plans par rapport aux buts d'entreprise tels que la réduction des coûts et la rentabilité. Le temps pris par le décideur pour traiter les modèles peut varier de manière significative avec la dimension et la complexité du modèle. Cette technique fournit l'amélioration significative de la représentation et l'analyse dans le système de chaîne d'approvisionnements, sans investissement de beaucoup d'argent.

Ces études répondent à un besoin réel issu du monde des entreprises, que ce soit dans le milieu industriel de fabrication de biens physiques, ou bien dans le milieu des services. Beaucoup de ces entreprises font face quotidiennement à des problèmes pour satisfaire leurs clients, qui sont de plus en plus demandeurs de meilleures performances. Livrer à temps, réduire les coûts de stockage, utiliser au mieux la capacité de production, et répondre rapidement à la demande du marché (besoin de réactivité pour être meilleur que la concurrence), tels sont les bénéfices (non exhaustifs) de la mise en œuvre d'un bon système.

La simulation/optimisation peut bénéficier les business et la rentabilité de plusieurs manières. Plus particulièrement l'utilisation de la simulation a permis une évaluation précise des performances de la chaîne avec la prise en compte des incertitudes dans la chaîne et du système de pilotage. De plus l'algorithme génétique multicritères implémenté montre son efficacité pour trouver des solutions de bonne qualité avec un meilleur compromis entre le cout total de l'ensemble des activités de la chaîne et le niveau de service client.

Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude bibliographique qui touchent aux différents domaines liés aux travaux de cette thèse, c'est-à-dire : les chaînes logistiques, sa gestion, et l'ordonnancement dans les chaînes logistiques. Bien sûr, notre recherche n'est pas exhaustive, mais nous avons essayé néanmoins d'être le plus complet possible pour

permettre à des lecteurs non spécialistes ni en chaînes logistiques, ni en ordonnancement de pouvoir comprendre l'environnement global de l'étude.

Après avoir introduit les notions liées aux problématiques de la thèse, nous introduisons dans le chapitre 2 les travaux scientifiques menés sous le thème de couplage simulation et optimisation pour la conception des chaînes logistiques ainsi la description de l'approche d'optimisation basée sur la simulation, développée dans le cadre de cette thèse.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les algorithmes génétiques et l'optimisation multicritères. Une description plus détaillée de l'algorithme génétique multicritères implémenté est présentée. Enfin, les résultats des expériences menées pour valider l'approche de résolution décrite dans le chapitre deux.

Comme perspectives, dans un premier temps, nous envisageons d'enrichir le cadre de simulation en enrichissant i) les classes de base représentant les caractéristiques des différentes entités d'une chaîne logistique générique et ii) les règles de pilotage pour une simulation plus réaliste et intelligente des chaînes logistiques. Dans un deuxième temps, nous allons examiner d'autres algorithmes génétiques multicritères et les comparer avec le MOGA actuellement utilisé. De plus, nous avons l'intention de terminer ce travail pour couvrir la plupart des aspects des systèmes de chaîne logistique qui peuvent nous aider à examiner plus cette approche sur des cas industriels et de prouver sa valeur.

Bibliographie

- [1] Azadivar F., *Simulation optimization methodologies*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, PP. 93- 100, (1999).
- [2] Azem S., *Ordonnancement des systèmes flexibles de production sous contrainte de disponibilité des ressources*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Gardanne, (2010).
- [3] B.M. Beamon. *Supply chain design and analysis : Models and methods*. International Journal of Production Economics, (55), 281-294. (1998).
- [4] Baudet P, Azzaro C, Domenech S, Pibouleau L, *Algorithme génétique et modèle de simulation pour l'ordonnancement d'un atelier de chimie fine*, GOMAGEP 2 - Gabès & Djerba (TN), (1996).
- [5] Blum C., Andrea R., *Meta-heuristics In Combinatorial Optimization: Overview And Conceptual Comparison*, ACM Computing Survey, Vol. 35, n 3, (2003).
- [6] Boesel J., Nelson B L., Ishii N., *A framework for simulation-optimization software*. IIE Transactions, vol. 35, pp. 221- 229,(2003).
- [7] Boissière J, Cung V.D., *Couplage simulation/optimisation pour l'aide à la décision dans une chaîne logistique globale et durable*, Université de savoie, 2009.
- [8] Boudahri F., *Conception et Pilotage d'une Chaîne Logistique Agro-alimentaire. Application: produits de volaille dans la ville de Tlemcen*, Thèse de doctorat, université Abou-Bekr Belkaïd Tlemcen, Algérie (2013).
- [9] Boukef Ben Othman H., *Sur l'ordonnancement d'ateliers job-shop flexibles et flow shop en industries pharmaceutiques Optimisation par algorithmes génétiques et essais particuliers*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lille, (2009).
- [10] Bounif M E ., Bourahla M., *Decision Support Technique for Supply Chain Management*, Journal of Computing and Information Technology – CIT Vol 21, PP 255–268 (2013).
- [11] Bounif M E ., Bourahla M., *Global Optimization based Simulation in Supply chain*, In: Proceedings of The First International Symposium on Informatics and its Applications ISIA February 25-26, M'sila, Algeria (2014).
- [12] Browne J., Sackett P., Wortmann J.C., *Futur manufacturing systems- toward the extended entreprise*, Computer in Industry (25), (1995).
- [13] Carrera S, *Planification et ordonnancement de plateformes logistiques*, thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Lorraine (2010).
- [14] Chardine – Baumann E., *Modèles d'évaluation des performances économique, environnementale et sociale dans les chaînes logistiques*, Thèse de doctorat , L'institut national des sciences appliquées de Lyon, France, (2011).
- [15] Chopra S., Meindil P., *Supply chain management: Strategy, planning, and Operations, third edition*, Pearson Education, Inc. New Jersey (2007).
- [16] Christopher, M.L., *Logistics and supply chain management*. Pitman Publishing, London, (1992).
- [17] Colin, J., Mathe, H., Tixier, D., *La logistique au service de l'entreprise*, Dunod, Entreprise, (1983).
- [18] Courtois A., Martin-Bonnefous C., Pillet M., *gestion de production* , les éditions d'organisation, troisième édition, Paris, (1996).
- [19] Deb, K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T, *A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: Nsga-ii*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6(2), 182–197, (2002).

- [20] Ding H., *Une approche d'optimisation basée sur la simulation pour la conception des chaînes logistiques: Applications dans les industries automobile et textile*, thèse de doctorat, Université de Metz, (2004).
- [21] Esquirol P., Lopez P. *L'ordonnancement*, Economica, Paris, (1999).
- [22] Fonseca, C.M., P.J. Fleming, *Genetic algorithms for multi-objective optimization: Formulation, discussion and generalization*. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms (S. Forrest, Ed.). Morgan Kaufmann. San Mateo, California. pp. 416–423, (1993).
- [23] Francois J., *Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance*, Thèse de doctorat, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, Université Bordeaux 1, France (2007).
- [24] Galasso F, *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*, L'institut national polytechnique de Toulouse, France (2007).
- [25] Ganeshan R, Terry P. Harrison, *An Introduction to Supply Chain management*. Department of Management Sciences and Information Systems, 303 Beam Business Building, Penn State University, University Park, PA, USA, (1995).
- [26] Goldberg, D.E., *Algorithmes génétiques. Exploration, optimisation et apprentissage automatique*. Addison-Wesley. France, (1994).
- [27] Guenounou O., *Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé*, Thèse de doctorat, L'Université de Toulouse, (2009).
- [28] Gunasekaran A., Patel C., McGaughey R.E., *A framework for supply chain performance measurement*. International Journal of Production Economics (87) 333–347, (2004).
- [29] Gupta D., and Weerawat W., *Supplier manufacturer coordination in capacitated two stage supply chains*, European Journal of Operational research (175), 67-89, (2006).
- [30] Hadj-Hamou K, *Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes*, Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, France (2002).
- [31] Hassam A., *Développement et analyse de méthodes d'ordonnancement temps réel pour les systèmes flexibles de production*, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, (2012).
- [32] Herrera C, *Cadre générique de planification logistique dans un contexte de décisions centralisées et distribuées*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1, (2011).
- [33] Hicks D A., *A four step methodology for using simulation and optimization technologies in strategic supply chain planning*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp, 1215-1220, (1999).
- [34] Hnaïen F, *Gestion des stocks dans des chaînes logistiques face aux aléas des délais d'approvisionnements*, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France (2008).
- [35] Holland, J., *Adaptation in natural and artificial and systems*. 2nd edition. IT Press, (1992).
- [36] Hugos M., *Essentials of supply chain management*. John Wiley and sons, Inc, New Jersey, USA, (2003).
- [37] Ingalls R .G., *The value of simulation in modeling supply chains*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, pp. 1371 -1375 , Washington, (1998).
- [38] Kaddoussi A, *Optimisation des flux logistiques: vers une gestion avancée de la situation de crise*, Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, France (2012).

- [39] Khouider S, *Outils d'aide à la décision pour la prise de commandes imprévues*, Thèse de doctorat, L'Université Paul Verlaine de Metz, (2008).
- [40] Kim, T. Y., Lee, S., Kim, K., Kim, C. H., *A modeling framework for agile and interoperable virtual enterprises*. Computers in Industry, 57, p. 204–217, (2006).
- [41] Lacksonen T., *Empirical comparison of search algorithms for discrete event simulation*, Computers & Industrial Engineering, vol.40, pp . 133-148, (2001).
- [42] Lambert, D.M., J.R. Stock, et L.M. Ellram, *Fundamentals of Logistics Management*, Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill, Chapitre 14, (1998).
- [43] Letouzey A., *Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs*, Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, (2001).
- [44] Li X., Chehade H., Yalaoui F., Amodeo L., *A new method coupling simulation and a hybrid meta-heuristic to solve a multi-objective hybrid flow-shop scheduling problem*, The 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-2011), Aix-les-Bains, (2011).
- [45] Makastoris C., Leach N.P., Richards H.D, Ristic M., Besant C.B., *Addressing the planning and control gaps in semiconductor virtual enterprises*, *Proceedings of the conference on Integration in Manufacturing*, 117-129, Galway, Ireland, (1996).
- [46] Mentzer J.T., Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G., *Defining supply chain management*, Journal of business logistics Management, vol 22 (2), (2001).
- [47] Merzouk S E., *problème de dimensionnement de lots et de livraisons : application au cas d'une chaîne logistique*, Thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard (2007).
- [48] Mokeddem D., *Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques*, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Setif, (2010).
- [49] Mouloua Z, *Ordonnements coopératifs pour les chaînes logistiques*, l'Institut National Polytechnique de Lorraine (2007).
- [50] Neubert G., *Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des alés*. Thèse de doctorat en Sciences. INSA de Lyon. (1997).
- [51] Ouzizi L., *Planification de la production par co-décision et négociation de l'entreprise virtuelle*, Thèse de doctorat, l'université de Metz, France, (2005).
- [52] Paché J., *Proximité spatiale et gestion des supply chains : une approche critique à partir des logiques de radialisation*, Quatrièmes journées de la proximité, juin 17-18, (2004).
- [53] Paul R J., Chaney T., *Simulation optimization using a genetic algorithm*. Simulation Practice and Theory, vol. 6, pp.601-611,(1998).
- [54] Pichot L., *Stratégie de déploiement d'outils de pilotage de chaînes logistiques : Apport de la classification*, thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2006).
- [55] Pimor, Y., Fender M., *Logistique: Production, Distribution, Soutien*. Dunod, (2008).
- [56] Roque M., *Contribution à la définition d'un langage générique de modélisation d'entreprise*, Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, (2005).
- [57] Schaffer, J.D, *Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms*. In: Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms. pp. 93–100, (1985).
- [58] Sghaier, M, *Combinaison des techniques d'optimisation et de l'intelligence artificielle distribuée pour la mise en place d'un système de covoiturage dynamique*, Ecole Centrale de Lille, (2011).

- [59] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P, *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. Boston, MA.: McGraw Hill Professional, (2003).
- [60] Srinivas, V., K. Deb, *Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms*. Evolutionary Computation 2(3), 221–248, (1993).
- [61] Tan K C., *Framework of supply chain management literature*, European Journal of Purchasing and Supply Management, 7, 39-48 (2001).
- [62] Taylor D.A., *Supply Chains: A Manager's Guide*. Addison Wesley, USA, (2003).
- [63] Tompkins G., Azadivar F. *Genetic algorithms in optimizing simulated systems*. Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, pp. 757-762, (1995).
- [64] Tounsi J, *Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques*, Thèse de doctorat ,Université de Savoie,(2009).
- [65] Truong T H., Azadivar F., *Simulation based optimization for supply chain configuration design*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference pp. 1268-1275. (2003).
- [66] Vallée T., Yildizoglu M., *Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie*, Revue d'économie politique 114 (6), 711-745, (2004).
- [67] Zidi K., *Système interactif d'aide au déplacement multimodal (SIADM)*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, (2006).
- [68] Zitzler E., Deb K., Thiele L., *Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: Empirical results*, Evolutionary Computation, vol. 8, PP. 173-195,(2000).